



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXII

SAYI / NUMBER: 5

EKİM / OCTOBER 2022

## FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Ahmet Necdet Sezer Kampüsü  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
AFYONKARAHİSAR  
Tel: 444 03 03 / 1460-1470  
Belgegeçer: 0 272 218 14 62  
E-posta: fmbd@aku.edu.tr

## Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University  
Journal of Science and  
Engineering



<http://fmbd.aku.edu.tr>

<http://fmbd.aku.edu.tr>

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN VE MÜHENDİSLİK  
BİLİMLERİ  
DERGİSİ**

*Afyon Kocatepe University  
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 22  
Sayı / Number 5

e – ISSN: 2149-3367

EKİM 2022

OCTOBER 2022



## **Derginin Amacı ve İÇeriği**

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi (AKÜ FEMÜBİD), fen ve mühendislik bilimleri alanlarındaki güncel gelişmeleri takip etmek, meslek kuruluşları ve bireylerin ulusal ve uluslararası gelişimlerine katkıda bulunmak ve bu alanlarda nitelikli bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlanmaktadır.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren bir dergidir. Dergide, fen ve mühendislik bilimlerinde yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki çalışmalara yer verilir.

Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi; Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından 1999'dan bu yana yılda 2 sayı (Haziran ve Aralık) Türkçe veya İngilizce olarak hazırlanan çalışmaları yayımlanan, bilimsel ve hakemli bir dergidir.

Dergimizde makale değerlendirme sürecinin daha şeffaflaştırılması ve hızlandırılması için Şubat 2013 itibarıyla online makale değerlendirme ve takip sistemi uygulamaya alınmıştır.

Ocak 2015 itibaren dergimiz; yayımlanma süreci ile yazarlara ve gerekse yapılan çalışmalara pratik ulaşma imkânları nedeniyle okuyuculara birçok avantajlar sağlayan; elektronik dergi (e-ISSN: 2149-3367) olarak yılda 3 sayı (Nisan, Ağustos ve Aralık) Türkçe ve İngilizce makaleleri kabul edecek ve çift taraflı kör hakemlik esasına göre en az iki hakemli olarak değerlendirilmektedir. Makale göndermek isteyen yazarlarımız, dergi sayfamızdan (<https://fenbildergi.aku.edu.tr/> yada <https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid>) kayıt yaptırarak, özgün bilimsel makalelerini çevrimiçi olarak gönderebilir ve süreci takip edebilirler. Özellikle lisansüstü tezlerden hazırlanan yayınlar veya bu tezlerin bir alt çalışması olarak yapılan özgün bilimsel çalışmalar teşvik edilmektedir.

Ocak 2020 yılından itibaren dergimiz; yılda 6 sayı (Şubat, Nisan, Haziran, Ağustos, Ekim ve Aralık) olmak üzere özgün araştırma makalelerini kabul etmektedir.

Dergimizde yayımlanan makaleler izin alınmaksızın başka bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Makalelerin bir kısmı veya tamamı dergimiz kaynak gösterilmeden kullanılamaz.

Dergimize hem hakem hem de yazar olarak katkılarınızı beklemekteyiz. Dergimize olan desteğiniz için şimdiden teşekkür eder, çalışmalarınızda başarılar dilerim.



**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**  
*Afyon Kocatepe University*  
*Journal of Science and Engineering*

**İMTİYAZ SAHİBİ/OWNER**

---

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ierol@aku.edu.tr*

**EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF**

---

Tamer BAYBURA, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: tbaybura@aku.edu.tr*

**YARDIMCI EDİTÖR/ ASSOCIATE EDITOR**

---

Hakan ÖZTÜRK, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: hozturk@aku.edu.tr*

**ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD**

---

Afife Binnaz HAZAR, Metallurgy and Materials Engineering, Yıldız Teknik University, (Turkey)  
*e-mail: afife.hazar@gmail.com*

Ahmet ÇETKİN, Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: acetkin@aku.edu.tr*

Ahmet SERTESER, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: aserteser@aku.edu.tr*

Ahmet YILDIZ, Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ayildiz@aku.edu.tr*

Atilla EVCİN, Material Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: evcin@aku.edu.tr*

Bojan Zlender, Civil Engineering, University of Maribor, (Slovenia)  
*e-mail: bojan.zlender@um.si*

Cevat İNAL, Survey Engineering, Konya Teknik University, (Turkey)  
*e-mail: cinal@ktun.edu.tr*

Engin TAŞ, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: engintas@aku.edu.tr*

Ersin KIVRAK, Department of Science Education, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ekivrak@aku.edu.tr*

Ertuğrul ERGÜN, Internet and Information Technologies Management, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ertugrulergun@gmail.com, ertue@aku.edu.tr.*

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: fohocaoglu@gmail.com*

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: hayalim@aku.edu.tr*

Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: bceken@aku.edu.tr*

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ierol@aku.edu.tr*

İbrahim Hakkı CİĞERCİ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University,  
(Turkey)  
*e-mail: cigerci@aku.edu.tr*

İsmail DEMİR, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: idemir@aku.edu.tr*

İsmail Sedat BÜYÜKSAĞIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: sbsagis@aku.edu.tr*

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: izarluer@aku.edu.tr*

Levent ÖZCAN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: leventozcan@aku.edu.tr*

Mehmet ÇAKMAKKAYA, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: cakmakkaya@aku.edu.tr*

Mehmet KAHRAMAN, Computer, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: kahraman@aku.edu.tr*

Mehmet ÖZKAN, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mozkan@aku.edu.tr*

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mdilek@aku.edu.tr*

Muhammed YÜRÜSOY, Mechanical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: yurusoy@aku.edu.tr*

Murat ALÇIN, Mechatronic Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: muratalcin@aku.edu.tr*

Mustafa Kemal YILDIZ, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: myildiz@aku.edu.tr*

Mustafa Serhat BAŞPINAR, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

*e-mail: sbaspinar@aku.edu.tr*

Mustafa YILMAZ, Survey Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

*e-mail: mustafayilmaz@aku.edu.tr*

Mustaque Hossain, Civil Engineering, Kansas State University, (USA)

*e-mail: mustak@k-state.edu*

Ramazan ŞEVİK, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

*e-mail: ramazansevik03@yahoo.com*

Regita Bendikiene, Department of Production Technologies, Kaunas University of Technology, (Lithuania)

*e-mail: regita.bendikiene@ktu.lt*

Yüksel OĞUZ, Electrical Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

*e-mail: yukseloguz@aku.edu.tr*

**ADRES/ADDRESS:**

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR

Telefon: 444 03 03 / 1460-1470

Belgegeçer: 0 272 218 14 62

e-posta: fmbd@aku.edu.tr

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

#### *FİZİK / PHYSICS (11)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b>	
Fermiyon Benzeri İstanton Çözümlerinin Dalgacık Entropi Analizinin İncelenmesi Study of Wavelet Entropy Analysis of the Fermion-like Instanton Solutions Beyrul CANBAZ	<b>051101 (972-978)</b>

#### *KİMYA / CHEMISTRY (12)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b>	
Bazı Selektif Serotonin Geri Alım İnhibitörlerinin Termodinamik Protonasyon Sabitlerinin Su-Asetonitril İkili Karışımlarında Belirlenmesi Determination of Thermodynamic Protonation Constants of Some Selective Serotonin Reuptake Inhibitors in Water-Acetonitrile Binary Mixtures Yaşar Doğan DALDAL , Ebru ÇUBUK DEMİRALAY	<b>051201 (979-988)</b>

#### *MATEMATİK & İSTATİSTİK / MATHEMATICS & STATISTICS (13)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b>	
Mikro Hasarlı Plakların Riesz-Caputo Kesirli Türevi ile Titreşim Analizi Vibration Analysis of Micro-Damaged Plates with Riesz-Caputo Fractional Derivative Soner AYDINLIK , Ahmet KIRIŞ	<b>051301 (989-997)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b>	
Kesirli Mertebeden Pseudo Hiperbolik Diferansiyel Denklemlerin Sonlu Fark Metodu ile Nümerik Çözümleri Numerical Solutions of Fractional Order Pseudo Hyperbolic Differential Equations by Finite Difference Method Fatih ÖZBAĞ , Mahmut MODANLI	<b>051302 (998-1004)</b>

## MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING

### BİLGİSAYAR & BİLİŞİM / COMPUTER & INFORMATICS (51)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Yeniden Örnekleme Metotlarının Kredi Kartı Sahtecilik Tespiti için Topluluk Öğrenmesine Kapsamlı Analizi Comprehensive Analysis of Resampling Methods on Ensemble Learning for Credit Card Fraud Detection Ali Kemal AY, Esra Nergis YOLAÇAN	<b>055101 (1005-1015)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Bilgisayar Ağlarında Anomali Tespiti Yaklaşımı ile Saldırı Tespiti Intrusion Detection on Computer Networks Using Anomaly Detection Approach Burak EKİCİ, Hidayet TAKCI	<b>055102 (1016-1027)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Rüzgar Gücü Tahmininde Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi Feature Selection by Genetic Algorithm for Wind Power Prediction Ece YAĞMUR, Sercan YAĞMUR	<b>055103 (1028-1040)</b>

### ELEKTRİK & ELEKTRONİK / ELECTRICAL & ELECTRONICS (52)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Hibrit Düşey Rüzgâr Türbini Tasarım ve Analizi Hybrid Vertical Wind Turbine Design and Analysis Barış AKBUDAK , Rasim DOĞAN	<b>055201 (1041-1050)</b>
---	---------------------------

### GIDA, ÇEVRE & ORMAN / FOOD, ENVIRONMENTAL & FOREST (54)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Farklı Sıcaklıklarda Kurutulmuş Madımak Bitkisinin (Polygonum cognatum Meisn.) Kuruma Hızının ve Bazı Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi Determination of Drying Rate and Some Quality Parameters of Madımak (Polygonum cognatum Meisn.) Dried at Different Temperatures Elif UĞUR, Ferda SARI	<b>055401 (1051-1060)</b>
--	---------------------------

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Parselasyon Planına Göre İmar Parseli Üretimi İçin Yeni Bir Uygulama Stratejisi Geliştirme Developing A New Execution Strategy for the Production of Zoning Parcels According to the Parcel Plan Hakan AKÇIN , Sercan AKSOY	<b>055501 (1061-1074)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Taşınabilir Lazer Tarama Sistemleri ile Farklı Alanlarda Doğruluk Analizi Accuracy Assessment of Mobile Lidar System in Different Environments Zübeyir Bilal ÇAKMAK, Burak AKPINAR, Mahmut Oğuz SELBESOĞLU	<b>055502 (1075-1086)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Kamulaştırmaz El Atma Sorununun Çözülmesinde Düzenleme Ortaklık Payı Yöntemi ve Melikgazi Belediyesi Uygulamaları Development Readjustment Share Method to Solve The Problem of Confiscation Without Expropriation and The Practices of Melikgazi Municipality H. Mustafa PALANCIOĞLU	<b>055503 (1087-1107)</b>

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Yağış ve Sıcaklık Anomali Hesaplanmasında Referans Veri Etkinliğinin Araştırılması Investigation of the Efficiency of Reference Data Selection for the Precipitation and Temperature Anomaly Determination Hasan Törehan BABACAN , Ömer YÜKSEK	<b>055601 (1108-1121)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Elvaloy ve Polifosforik Asitle Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Physical and Rheological Properties of Elvaloy and Polyphosphoric Acid Modified Bitumen Hakan AYDIN, Erkut YALÇIN, Mehmet YILMAZ, Taner ALATAŞ	<b>055602 (1122-1127)</b>

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Hidrojel Esaslı Kompozit Kullanılarak Naftol Yeşili B İçeren Atıksuların Arıtımında Ortam Parametrelerinin Etkisi The Effect of Environmental Parameters on the Treatment of Naphthol Green B Containing Wastewater Using Hydrogel Based Composite Mehtap TANYOL, Güzin PIHTILI	<b>055701 (1128-1137)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Enhancement of Optical and Photonic Properties of the Micro-sized ZnO Particles by Cerium Doping Mikro Boyutlu ZnO Parçacıklarının Optik ve Fotonik Özelliklerinin Seryum Katkılama ile İyileştirilmesi Ramazan DALMIŞ	<b>055702 (1138-1147)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Perlit Katkılı Seramik Bünye Özelliklerinin Araştırılması Investigation Of Perlite Added Ceramic Body Properties Fatma Sena BAŞAR, Buket ACARTÜRK	<b>055703 (1148-1155)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Olivin Mineralinin Seramik Sırlarında Kullanım Olanaklarının Araştırılması ve Uygulamaları Investigation of Olivine Mineral's Use in Ceramic Glazes and Applications Beyza TURAN, Buket ACARTÜRK	<b>055704 (1156-1166)</b>

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Türkiye Piyasasında Satılan Bazı Talk Pudralarının Mineralojik ve Yarı Nicel Kimyasal Bileşimi Mineralogical and Semi-Quantitative Chemical Composition of Some Talc Powders Sold on the Turkish Market Muazzez ÇELİK KARAKAYA, Necati KARAKAYA	<b>055801 (1167-1174)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Uranium Potentiality of Coal Occurences in Dinar (Afyonkarahisar, western Turkey) region: Geologic Factors Controlling the Accumulation of the Uranium Dinar (Afyonkarahisar, Batı Türkiye) Bölgesindeki Kömür Oluşumlarının Uranyum Potansiyeli: Uranyum Birikimini Kontrol Eden Jeolojik Faktörler Anıl SOYLU, Zeynep DÖNER, Ali Tuğcan ÜNLÜER, Abdullah FişNE, Mustafa KUMRAL	<b>055802 (1175-1182)</b>

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Hallaçlar Volkanitleri'nde (Bayramiç, Çanakkale) Stratejik Element Zenginleşmeleri</p> <p>Strategic Element Enrichments in Hallaçlar Volcanites (Bayramiç, Çanakkale)</p> <p>Demet KIRAN YILDIRIM, Zeynep DÖNER , Ali Tuğcan ÜNLÜER</p>	<p><b>055803 (1183-1190)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Modeling the Throughput of Horizontal Shaft Impact Crushers Using Regression Analyses, Artificial Neural Networks and Multivariate Adaptive Regression Spline</p> <p>Yatay Milli Kırıcılarda Kırma Kapasitesinin Regresyon, Yapay Sinir Ağları ve Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Analizi Kullanılarak Modellenmesi</p> <p>Ekin KÖKEN</p>	<p><b>055804 (1191-1201)</b></p>

*MAKİNE , İMALAT & OTOMOTİV / MACHINERY, MANUFACTURING & AUTOMOTIVE (59)*

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Kesme Parametrelerinin Haynes 242 Nikel Bazlı Süper Alaşım Malzemenin Tornalamasında Güç Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin RSM ve GA ile İncelenmesi</p> <p>Investigation the Effects of Cutting Parameters on Power Consumption in Turning of Haynes 242 Nickel-Based Super Alloy by RSM and GA</p> <p>Hakan KAZAN , Engin Ufuk ERGÜL</p>	<p><b>055901 (1202-1210)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Buji Ateşlemeli Bir Motorda Ultrasonik Yakıt Sistemi Kullanılmasının Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi</p> <p>Investigation of the Effect of Using Ultrasonic Fuel System on Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine</p> <p>Cengiz ÖNER, Gökhan ÖZTÜRK, Burak TANYERİ</p>	<p><b>055902 (1211-1221)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>AISI 1040 Malzemesinin Yüksek Performanslı Otonom Daire Testere Makinesi ile Kesiminde Kesme Parametrelerinin Talaş Sıcaklığına Etkisi</p> <p>The Effect of Cutting Parameters on Chip Temperature in Cutting of AISI 1040 Material with a High Performance Autonomous Circular Saw Machine</p> <p>Seda YILDIZ</p>	<p><b>055903 (1222-1234)</b></p>



# Fermiyon Benzeri İntanton Çözümlerinin Dalgacık Entropi Analizinin İncelenmesi

Beyrul CANBAZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: beyrul.canbaz@yeniyuzuil.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5633-2296>

Geliş Tarihi: 27.05.2022

Kabul Tarihi: 12.09.2022

## Öz

### Anahtar kelimeler

Dalgacık dönüşümü;  
Faz uzayı; Fermiyon benzeri instanton;  
Dalgacık entropisi

İntantonlar klasik topolojik çözümlerdir, parçacık fiziği ve kozmolojide önemli rol oynarlar. Bu çalışmada, Heisenberg anatzıyla elde edilen iki boyutlu Thirring modelde fermiyon benzeri instanton çözümlerinin yörüngelerinin periyodikliği incelenmiştir. Fermiyon benzeri instanton çözümlerinin yörüngeleri, Shannon dalgacık entropisi (WE) yöntemi kullanılarak incelenmektedir. Ayrıca, faz uzayında WE ve WE spektrumları, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin yörüngelerinin karakteristiği hakkında bilgi sahibi olabilmek için analiz edilmektedir. Çalışma sonucunda, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin kararlı nokta etrafında düzenli, diğer noktalarda ise düzensiz yörüngelere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca bilinen diğer entropi yöntemleriyle (Renyi entropi ve Tsallis entropi) karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar gözlemlenmiştir.

## Study of Wavelet Entropy Analysis of the Fermion-like Instanton Solutions

### Abstract

### Keywords

Wavelet transform;  
Phase space; Fermion-like instanton; Wavelet entropy

Instantons are classical topological solutions, playing an important role in particle physics and cosmology. In this study, the periodicity of the orbits of the fermion-like instanton solutions in the two-dimensional Thirring model obtained with the Heisenberg ansatz is investigated. The trajectories of fermion-like instanton solutions are investigated by the Shannon wavelet entropy (WE) method. In addition, WE and WE spectrum in phase space are analyzed in order to have information about the characteristics of the trajectories of fermion-like instanton solutions. As a result of the study, it was seen that the fermion-like instanton solutions have regular trajectories around the stable point and irregular trajectories at other points. It was also compared with other known entropy methods (Renyi entropy and Tsallis entropy) and similar results were observed.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

### 1. Giriş

İntantonlar sıfır enerjili, sonlu ve sıfırdan farklı eylemlerdeki klasik çözümlerdir ve vakumlar arasındaki tünelleme süreçleri olarak tanımlanır. Bu özellik kuarkların parçacıklar içinde hapsolmesi problemlerini anlamada önemli bir rol oynamaktadır (Shifman 1994). Thirring model, 2D konformal invaryant saf fermiyonik bir modeldir (Thirring 1958). Konformal invaryant saf spinör Thirring alan denkleminin spinör tipi instanton çözümleri, konformal invaryant simetrisinin kırılmasıyla bulundu (Akdeniz *et al.* 1979). Thirring

modelde, fermiyon benzeri instantonlara karşılık gelen çözümler Heisenberg anatzı (Canbaz *et al.* 2012) kullanılarak elde edilmiştir. Faz uzayında fermiyon benzeri instanton çözümlerinin evrimi ve kuplaj sabitinin rolü araştırılmıştır (Canbaz *et al.* 2012). Değişen kuplaj sabitine göre fermiyon benzeri instanton çözümlerinin kararlılığı Ölçek İndeks Metodu ile incelenmiştir (Yılmaz *et al.* 2018). Ayrıca, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin de kaos Genelleştirilmiş Hizalama İndeksi (GALI) yöntemi ile araştırılmış (Canbaz 2022a, Ak 2022) ve Lyapunov üstelleri incelenmiştir (Canbaz 2022b).

Entropi bir sistemdeki düzensizliklerin ölçüsüdür. Sistem düzensizliği arttıkça, sistemdeki bileşenler arasındaki enerji alışverişi azalmakta ve entropi değeri artmaktadır (Anderson 2008). İlk olarak Clausius (Clausius 1850), bir sistemdeki enerjiyi hesaplamak için termodinamikte entropiyi kullandı ve sonrasında Boltzmann entropi kavramını geliştirdi (Boltzmann 1871). Shannon (Shannon 1948) bir bilgi kaynağı tarafından üretilen bilginin ne orada ve ne kadar olduğunu ölçen olarak tanımlamıştır. Entropi ise rastgele veri kaynakları tarafından üretilen bilginin ortalama hızı olarak tanımlanmaktadır (Nicolis *et al.* 2020). Shannon entropisi, bilgi kaynaklarının belirsizliğini temsil etmek amacıyla ortaya çıkmış olsa da, diğer farklı alanlarda belirsizliği veya düzensizliği ölçmek için de kullanıldı (Shannon 1948). Bu çalışmada Shannon entropisi tercih edilmesinin sebeplerinden biri de budur. Ayrıca, bilimsel araştırmalarda farklı yöntemler kullanılsa da Shannon entropisi çoğunlukla tercih edilen belirsizlik ölçüsüdür (Ubriaco 2009, Bouzebda and Elhattab 2014).

Dinamik sistemlerde davranış özelliklerinin doğru ve süratli olarak belirlenebilmesi, uzun süreden beri oldukça mühim bir araştırma mevzusudur (Brown 2018). Yüksek zaman-frekans çözünürlüğüne sahip bir sinyaldeki düzensizlik derecesini tahmin etmede kullanılan dalgacık entropisi; düzenli sinyaller için düşük, düzensiz sinyaller için ise yüksektir (Meyer 1993). Bu çalışmada, farklı başlangıç koşulları altında fermiyon benzeri instanton çözümlerinin davranışını incelemek için Shannon dalgacık entropi yöntemi kullanılmıştır. Yörüngeler hakkında bilgi elde etmek için, faz uzayındaki Shannon dalgacık entropisi (WE), değişen  $\beta$  değerlerinde farklı başlangıç koşulları altında analiz edilir. Çalışma sonucunda, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin kararlı noktalar etrafında düzenli, diğer noktalarda ise düzensiz yörüngelere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Makale şu şekilde planlanmıştır: Sonuçlarımızın metodolojik olarak daha iyi anlaşılabilmesi için, Materyal ve Yöntem' de Heisenberg anzati aracılığıyla Thirring modelinde elde edilen fermiyon benzeri instanton çözümleri ve yörüngelerin düzenini belirlemek amacıyla kullanılan dalgacık

entropisi tanıtılacaktır. Bulgular ve Tartışma'da, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin dalgacık entropisi değişen  $\beta$  değerlerine karşılık gelen farklı başlangıç koşullarına göre grafikleri, faz uzayındaki çözümlerin dalgacık entropisi grafikleri çizilmiş, diğer entropi yöntemleriyle (Renyi entropi ve Tsallis entropi) karşılaştırılmış ve ayrıca sonuçlar verilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Thirring Model

1958'de, Thirring Model (Thirring 1958) 2 boyutlu konformal simetriye sahip saf bir fermiyon alan teorisi modeli olarak tanıtıldı. Bu model, farklı vakum durumları arasındaki kuantum etkilerini incelemek için iyi bilinen bir oyuncak kuantum alan modelidir (Akdeniz *et al.* 1979).

Modelin konformal değişmez Lagrange denklemi,

$$L = i\bar{\psi}\sigma_{\mu}\partial_{\mu}\psi + \frac{g}{2}(\bar{\psi}\psi)^2 \quad (1)$$

ile verilir.  $g > 0$  kuplaj sabiti ve  $\psi(x)$  fermiyon alanıdır (Thirring 1958). Hareket denklemi,

$$i\sigma_{\mu}\partial_{\mu}\psi + g(\bar{\psi}\psi)\psi = 0 \quad (2)$$

ile verilir. Heisenberg anzatının (Heisenberg 1954) karmaşık Öklid konfigürasyonu

$$\psi = [ix_{\mu}\gamma_{\mu}\chi(s) + \varphi(s)]C \quad (3)$$

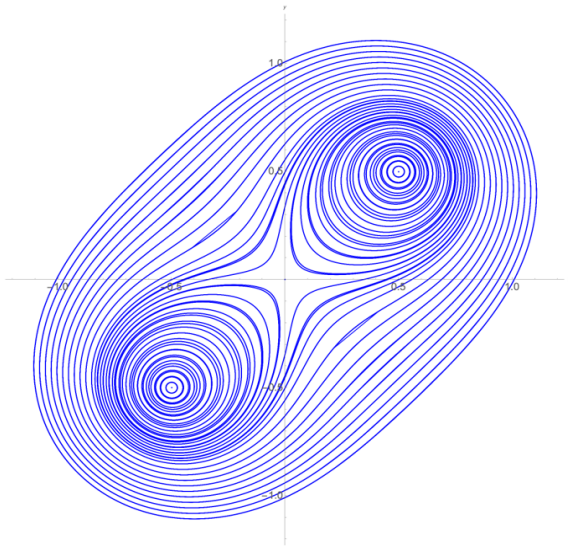
şeklinde verilir. Keyfi bir spinör sabiti  $C$  dir.  $s = x^2 + t^2$  ( $x_1 \equiv x$ ,  $x_2 \equiv t$ ) olarak  $\chi(s)$  ve  $\varphi(s)$  reel fonksiyonlarıdır. (Canbaz *et al.* 2012)'de boyutsuzlaştırma işlemi sonrasında ikinci dereceden lineer olmayan adi diferansiyel denklem sisteminin (4a) ve (4b) boyutsuz formu,

$$2\frac{dF(t)}{dt} + \frac{1}{2}F(t) - \alpha AB(F(t)^2 + G(t)^2)G(t) = 0 \quad (4a)$$

$$2\frac{dG(t)}{dt} - \frac{1}{2}G(t) - \alpha AB(F(t)^2 + G(t)^2)F(t) = 0 \quad (4b)$$

Elde edilir. Burada F ve G fonksiyonları reel fonksiyonlardır ve A, B pozitif sabitlerdir (Canbaz et al. 2012). Bu denklem sisteminin  $\beta=\alpha(AB)=1$  için çözümü, (Canbaz et al. 2012)'de verilen Thirring instantonlarına karşılık gelmektedir.

Kuplaj sabitinin değişimine göre faz uzayında fermiyon benzeri instanton çözümlerinin evrimi incelenmiştir (Şekil 1) (Canbaz et al. 2012). Son zamanlarda farklı  $\beta=\alpha(AB)$  değerlerine sahip fermiyonik instanton çözümlerinin kararlılığı ölçek indeks yöntemi ile araştırılmış ve fermiyon benzeri instanton çözümlerinin  $\beta=1$  değeri için kararlı olduğu belirlenmiştir (Yılmaz et al. 2018). Ayrıca fermiyon benzeri instanton çözümlerindeki kaosun araştırılması GALI yöntemi ile çalışılmış ve Lyapunov üstelleri incelenmiştir (Canbaz 2022, Canbaz 2022).



Şekil 1. Thirring instanton çözümlerine karşılık gelen faz diyagramı (Canbaz et al. 2012).

## 2.2 Dalgacık Dönüşümleri

Dalgacık dönüşüm analizleri, sürekli ve ayrık dalgacık dönüşüm olarak 2 ayrı biçimde tanımlanmaktadır. (Burrus et al. 1998, Goswami and Chan 1999). Dalgacık dönüşüm fonksiyonu, sinyallerin zaman ve frekans gösterimi için kullanılan bir matematiksel yöntemdir. Bu dalgacık dönüşüm yöntemi birbirinden bağımsız farklı birçok bilim dalında kullanılmaktadır.

Dalgacık fonksiyonları, belirli matematiksel gereksinimler için veri veya bazı fonksiyonları temsil etmede kullanılan fonksiyonlardır. Bir dalgacık kümesi  $\psi_{a,b}$ , ana dalgacık  $\psi(t)$ 'nin açılımları ve ötelemeleri tarafından üretilen temel fonksiyonlar kümesidir ve

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (5)$$

ile verilir. Burada ölçek s, dönüşüm parametreleri u ve t zamandır. Dalgacık dönüşümleri

$$(W_{\psi}f)(u, s) = \langle f, \psi_{u,s} \rangle = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (6)$$

şeklinde verilir. Ayrık parametre seti için  $s_j = 2^{-j}$  ve  $u_{j,k} = 2^{-j}k$  ile ana dalgacık fonksiyonunun özel seçimi için  $\psi(t)$ ,

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (7)$$

ile ifade edilir. Sonlu enerji sinyallerinden oluşan Hilbert uzayı,  $L^2(\mathcal{R})$ 'nin bir ortonormal temelidir. Ayrıca bilgi,  $L^2(\mathcal{R})$ 'de iç içe geçmiş alt uzayların hiyerarşik bir şemasında düzenlenebilir. Örnekleme süresi  $t_s$ 'nin, tekdüze bir zaman ızgarasına rağmen örneklenen  $S=\{s_0(n), n=1, \dots, M\}$  değerleri tarafından verildiği varsayılır.  $t_s = 1$  alınarak basitlik sağlanır. Ayrıştırma tüm çözünürlük seviyelerinde yapılırsa, dalgacık genişlemesi

$$S(t) = \sum_{j=-N}^{-1} \sum_k C_j(k) \psi_{j,k}(t) = \sum_{j=-N}^{-1} r_j(t) \quad (8)$$

şeklinde verilir. Burada dalgacık katsayıları  $C_j(k)$ , j ve j+1 ardışık sinyal yaklaşımları arasındaki yerel artık hatalardır ve  $r_j(t)$ , j ölçeğindeki artık sinyaldir.  $2^{j-1}\omega_s \leq |\omega| \leq 2^j\omega_s$  frekanslarına karşılık gelen S(t) sinyalinin bilgisini içerir.

$\{\psi_{j,k}(t)\}$ ,  $L^2(\mathcal{R})$  için ortonormal bir temel olduğundan, enerji kavramı Fourier teorisinden

türetilmiştir. Dalgacık katsayıları  $C_j(k) = \langle S, \psi_{j,k} \rangle$  ile verilir. Ayrıntı sinyalinin enerjisi ve her k örneklemedeki enerji şu şekilde tanımlanır:

$$E(k) = \sum_{j=-N}^{-1} |C_j(k)|^2 \quad (9)$$

Sonuç olarak, toplam enerji

$$E_{tot} = \|S\|^2 = \sum_{j<0} \sum_k |C_j(k)|^2 = \sum_{j<0} E_j \quad (10)$$

şeklinde hesaplanır. Göreceli dalgacık enerjisine karşılık gelen normalize değerler,

$$\rho_j = \frac{E_j}{E_{tot}} \quad (11)$$

$j = -1, -2, \dots, -N$  için çözünürlük seviyesi enerjinin farklı ölçeklerde olasılık dağılımını ifade eder.

Olasılık dağılımını analiz etmek ve karşılaştırmak için etkili bir yöntem olan Shannon entropisi (Shannon 1948), herhangi bir dağılım bilgisi ölçüsünü hesaplayabilir. Toplam Shannon WE (Meyer 1993, Blanco *et al.* 1998, Rosso and Mairal 2002),

$$S_{WT}^S[P] = - \sum_{j<0} \rho_j \cdot \ln[\rho_j] \quad (12)$$

şeklinde ifade edilir. WE, sinyalin düzen veya düzensizlik ölçüsünü ve sinyalin temel dinamikleri hakkında bilgi sağlar. Düzenli bir sistemde, WE sıfıra yakın veya çok düşük bir değer olacaktır. Düzensiz bir sistemde ise, WE maksimum değerlerde olacaktır.

### 3. Bulgular

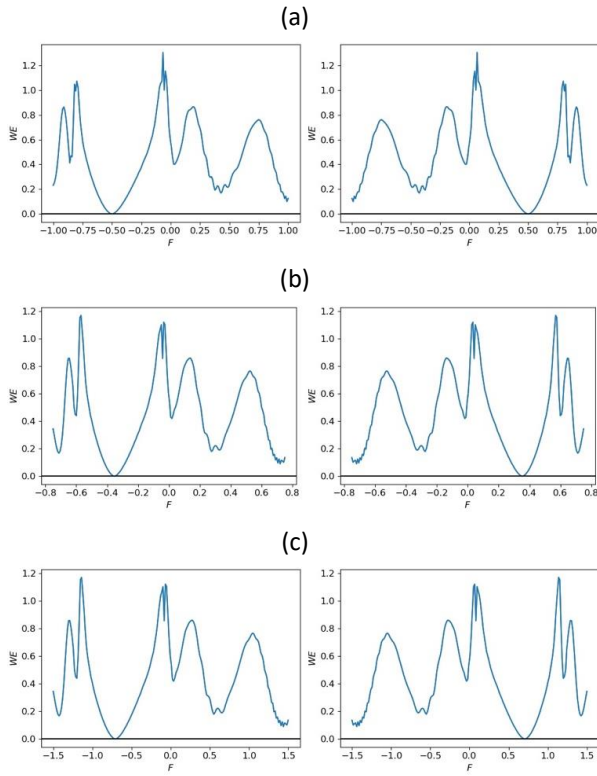
Fermiyon benzeri instanton çözümlerinin WE spektrumları ve faz uzayında WE renkli grafikleri çizilerek incelenmiştir. Ayrıca bilinen diğer entropi yöntemleriyle (Renyi entropi ve Tsallis entropi) karşılaştırılmıştır. Öncelikle  $F(t)$  ve  $G(t)$  için WE, denklem (4a) ve (4b)'de  $\beta=1, 2, 0.5$  parametreleri için değişen başlangıç koşulları altında, sırasıyla  $[-1, 1]$ ,  $[-0.75, 0.75]$ ,  $[-1.5, 1.5]$  aralıklarında 0.01 adım boyutuyla hesaplanır.  $t = 1$  adım boyutunda 0'dan

1000'e önceki bölümde verilen denklemler sırayla hesaplanarak, (4a) ve (4b) denklemlerinin çözümlerinden elde edilen  $F(t)$  ve  $G(t)$  zaman serileri olan  $f(n)$  ve  $g(n)$  sinyalleri elde edilir.

Fermiyon benzeri instanton çözümlerinin başlangıç koşullarına göre değişen  $\beta$  değerlerinde WE spektrumları çizilmiştir. Şekil 2 (a)'ya baktığımızda,  $\beta=1$  için  $(F, G) = (-0.5, -0.5) = (0.5, 0.5)$  kararlı noktalar,  $(F, G) = (0, 0)$  ise çatallanma noktası olduğu görülmektedir ve bu değerler fermiyon benzeri instanton çözümlerine karşılık gelmektedir (Canbaz *et al.* 2012). Fermiyon benzeri instanton çözümlerinin  $\beta$  değerlerine göre değişimini izleyebilmek için, Şekil 2 (b)'de  $\beta=2$  ve Şekil 2 (c)'de  $\beta=0.5$  parametreleri gelişigüzel seçilmektedir. (Canbaz *et al.* 2012) çalışmasına göre,  $\beta=2$  için  $(F, G) = \left(-\frac{1}{2\sqrt{2}}, -\frac{1}{2\sqrt{2}}\right) = \left(\frac{1}{2\sqrt{2}}, \frac{1}{2\sqrt{2}}\right)$  ve  $\beta=0.5$  için  $(F, G) = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$  kararlı noktalardır ve  $(F, G) = (0, 0)$  çatallanma noktasıdır.

Şekil 2 (a)'yı incelediğimizde,  $G=-0.5$  sabit tutularak  $F=-0.5$ 'te ve  $G=0.5$  sabit tutularak  $F=0.5$ 'te WE'nin sıfır olduğu görülmektedir ve periyodik yörüngelere sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca diğer noktalarda yörüngeler periyodik değildir ve WE sıfırdan farklı değerlerdedir. Yine Şekil 2 (b), Şekil 2 (c)'yi incelediğimizde  $\beta=2$  ve  $\beta=0.5$  değerleri için kararlı noktalar etrafında yörüngelerin periyodik, diğer noktalarda ise periyodik olmadığı şeklinde yorumlayabiliriz. Şekil 2 (a)'yı incelediğimizde  $F = \{-0.8, 0\}$  ve  $F = \{0, 0.8\}$  değerleri civarında, Şekil 2 (b)'yi incelediğimizde  $F = \{-0.6, 0\}$  ve  $F = \{0, 0.6\}$  değerleri civarında ve Şekil 2 (c)'yi incelediğimizde,  $F = \{-1.1, 0\}$  ve  $F = \{0, 1.1\}$  değerleri civarında WE en büyük değerlerdedir.

Şekil 2'ye baktığımızda  $\beta$  arttıkça kararlı noktaların değerinin azaldığı,  $\beta$  azaldıkça kararlı noktaların değerinin arttığı görülmektedir. Sonuç olarak,  $\beta$  değiştiğinde yörüngelerin özelliklerinin değişmediği, yörüngelerin benzer özellikler gösterdiği görülmüştür.



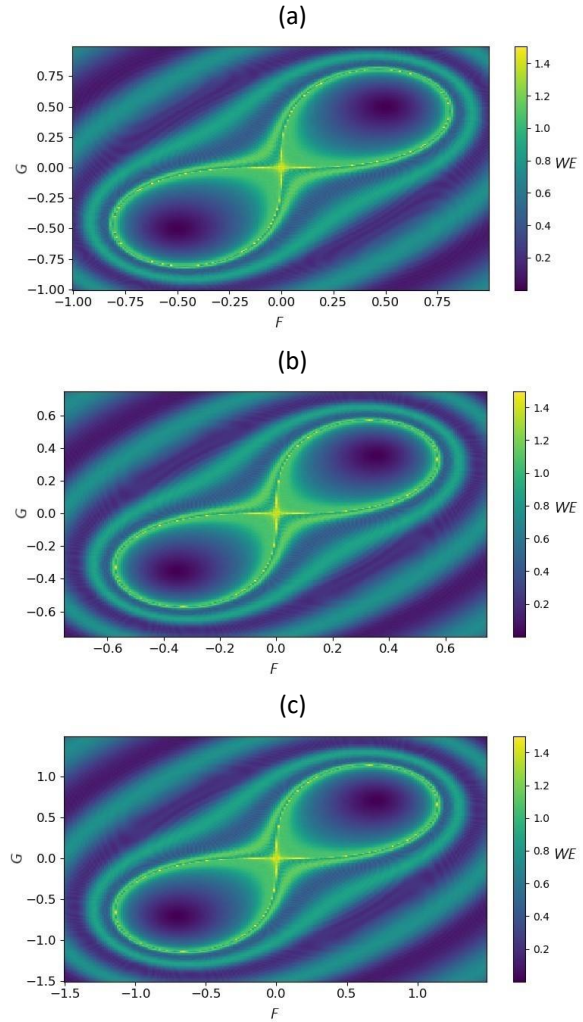
**Şekil 2.** (a)  $\beta=1$ , (b)  $\beta=1.2$  ve (c)  $\beta=0.5$  için değişen  $F$  değerlerine göre fermiyon benzeri instanton çözümlerinin WE spektrumu.

WE konturu, değişen başlangıç koşullarına göre değişen  $\beta$  değerleri için fermiyon benzeri instanton çözümlerinin değişimini net bir şekilde görebilmek için çizilmektedir. Değişen  $\beta$  değerleri için değişen  $F(t)$  ve  $G(t)$  değerlerine göre renkli grafikleri incelenmiştir.

Şekil 3 (a), (b) ve (c)'de çatallanma noktası  $(F, G) = (0, 0)$ , kararlı noktalar ise sırasıyla yaklaşık olarak  $(F, G) = (-0.5, -0.5) = (0.5, 0.5)$ ,  $(-0.35, -0.35) = (0.35, 0.35)$  ve  $(-0.7, -0.7) = (0.7, 0.7)$  periyodik yörüngeler koyu renktedir. Açık renkte görülenler ise periyodik olmayan yörüngelerdir. WE'nin en yüksek değerinde olduğu yer, çatallanma yörüngesidir. Ayrıca periyodik ve kararlı noktalar çevresinde dalgacık entropi değerinin 0 olduğu görülmektedir. Genel olarak Şekil-3'e bakıldığında, fermiyon benzeri instanton çözümlerinde değişen  $\beta$  parametreleri için başlangıç koşulları dikkate alındığında mühim bir değişiklik yoktur.

WE'nin fermiyon benzeri instanton çözümlerinin faz uzayında temsili Şekil 3 incelendiğinde, periyodik ve periyodik olmayan yörüngeler daha net bir şekilde

görülmektedir. Sonuç olarak, fermiyon benzeri instanton çözümlerinin kararlı noktalar çevresinde periyodik yörüngelere sahip olduğu söylenebilir. Periyodik ve çatallanma yörüngesi arasında WE değerleri artmaktadır. WE değerleri çatallanma yörüngesinde en yüksek düzensizlikte ve bu yörünge dışındaki yerlerde daha düşük değerlere sahiptir.



**Şekil 3.** (a)  $\beta=1$ , (b)  $\beta=2$  ve (c)  $\beta=0.5$  için fermiyon benzeri instanton çözümlerinin faz uzayında WE'si.

Modellerden kaynaklanan değişimleri analiz edebilmek için diğer iyi bilinen entropi modelleri olan Tsallis entropi (Tsallis 1988) ve Rényi entropi (Renyi 1970) yöntemleri de incelenmiştir. Rényi dalgacık entropisi (RWE) ve Tsallis dalgacık entropisi (TWE) de sırasıyla aynı yöntemle aşağıdaki gibi hesaplanır:

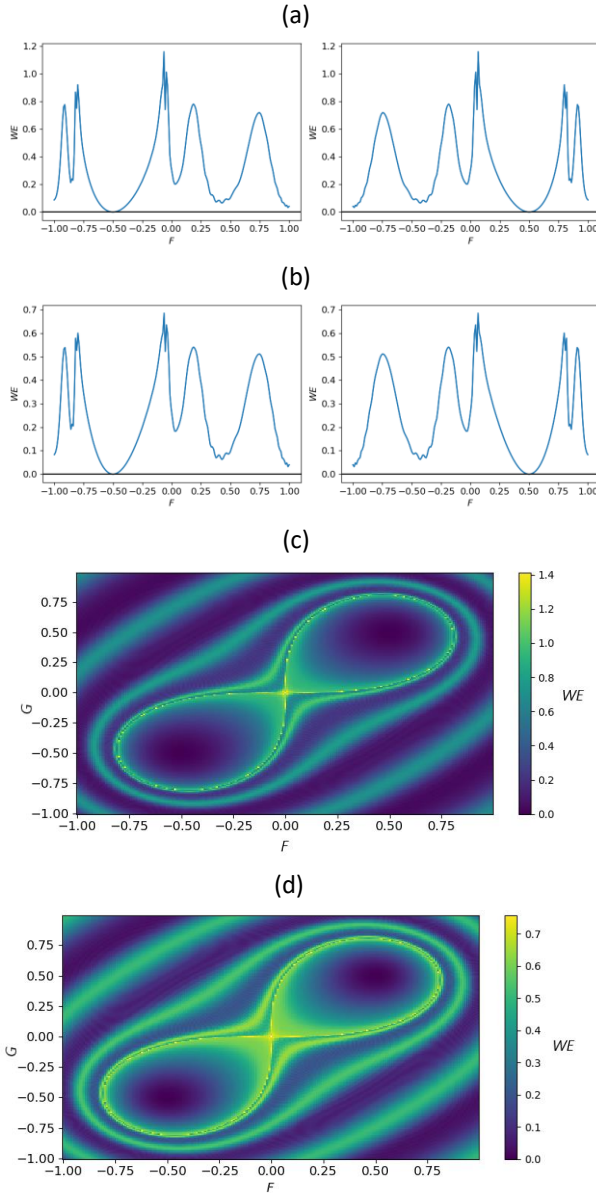
$$S_{WT}^R [P] = \frac{1}{1-q} \ln \left( \sum_{j=1}^N (\rho_j)^q \right) \quad (13)$$



$$S_{WT}^T[P] = \frac{1}{q-1} \left(1 - \sum_{j=1}^N \rho_j\right)^q \quad (14)$$

Çalışmada  $q=2$  olarak alınmıştır.

Şekil 4'te WE değerlerinin önceki WE değerlerine göre değiştiği, düzenli ve düzensiz olduğu durumların aynı kaldığı görülmektedir. Bu farklı yöntemlerle incelenen WE değerleri göz önüne alındığında, WE spektrumu ve faz uzayındaki WE doğrusal olmayan denklemlerin yörüngelerinin özelliklerini analiz etmek için kullanılabilir.



**Şekil 4.**  $\beta=1$  için değişen  $F$  değerlerine sahip fermiyon benzeri instanton çözümlerinin (a) RWE spektrumu ve (b) TWE spektrumu,  $\beta =1$  için fermiyon benzeri instanton çözümlerinin faz uzayında (c) RWE ve (d) TWE.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Thirring modelde fermiyon benzeri instanton çözümlerinin yörüngelerinin düzen-düzensizlik durumları hakkında bilgi sahibi olabilmek için WE spektrumu ve WE'nin kontur grafiği incelenmiştir. WE yöntemiyle, (Canbaz *et al.* 2012) çalışmasında analitik olarak belirlenen fermiyon benzeri instanton çözümlerinin kararlı noktaları tespit edilebilir. Analizlere bakıldığında; kararlı nokta etrafında periyodik yörüngelere, kararlı nokta dışındaki yerlerde periyodik olmayan yörüngelere sahip olduğu görülmektedir. WE, çatalanma yörüngesinde en yüksek düzensizliğe eriştikten sonraki artış ve azalmalar dikkat çekmektedir. Neticede, faz uzayında WE yöntemiyle fermiyon benzeri instanton çözümlerinin yörüngelerinin düzen-düzensizliği hakkında fikir sahibi olabilmenin mümkün olduğunu söyleyebiliriz. WE'ler faz uzayında incelenerek, lineer olmayan dinamik sistemlerin yörüngelerinin periyodikliği hakkında hızlı ve doğru sonuçlar alınabileceği sonucuna varabiliriz.

#### Teşekkür

Bu makaleyi hazırlarken verdiği destekler için K. Gediz Akdeniz'e teşekkür ederim.

#### 5. Kaynaklar

- Anderson, D.R., 2008, *Information Theory and Entropy*, Springer, New York, 61-95.
- Ak, M., 2022. 4 Boyutlu Fermiyonik Modelde Kaosun Genelleştirilmiş Hizalama İndeksi Yöntemiyle İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, **12** (2), 726-734.
- Akdeniz, K.G., Smailagic, A., 1979. Classical solutions for fermionic models. *Il Nuovo Cimento A*, **51**, 345– 357.
- Blanco, S., Figliola, A., Quian-Quiroga, R., Rosso, O.A., Serrano, E., 1998. Time–frequency analysis of electroencephalogram series (III): wavelet packets and information cost function. *Physical Review E*, **57**, 932-940.
- Boltzmann, L., 1871. Einige allgemeine Satze über Warmegleichgewicht unter Gas-molekullen, Sitzungsber. *Akad Wiss Wien*, **63**, 679–711.
- Bouzebda, S., Elhattab, I., 2014. New Kernel-types

- Estimator of Shannon's Entropy. *Comptes Rendus Mathematique*, **352(1)**, 75–80.
- Brown, R., 2018, A Modern Introduction to Dynamical Systems, Oxford University Press, 1-12.
- Burrus, C.S., Gopinath, R.A., Guo, H., 1998, Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer. Prentice Hall, New Jersey, 15-37.
- Canbaz, B., Onem, C., Aydogmus, F., Akdeniz, K.G., 2012. From Heisenberg ansatz to attractor of Thirring Instanton. *Chaos, Solitons & Fractals*, **45(2)**, 188–191.
- Canbaz, B., 2022. Genel Hizalama İndeksi Yöntemiyle 2 Boyutlu Saf Fermiyonik Modelde Kaosun İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **33**, 161-166.
- Canbaz B., 2022. Lyapunov Exponents of Thirring Instantons, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **11(2)**, 529-536.
- Clausius, R., 1850. On the motive power of heat & on the laws which may be deduced from it for the theory of heat. *Annalen der Physik*, **79**, 368-500.
- Goswami, J.C., Chan, A.K., 1999, Fundamentals of Wavelets: Theory, Algorithms, and Applications, 2nd Edition, John Wiley & Sons, USA.
- Heisenberg, W., 1954. Zur quantentheorie nichtrenormierbarer wellengleichungen. *Zeitschrift für Naturforschung A*, **9**, 292–303.
- Meyer, Y., 1993. Wavelets: Algorithms and Applications, SIAM, Philadelphia, 1-11.
- Nicolis, O., Mateu, J., Contreras-Reyes, J.E., 2020. Wavelet-Based Entropy Measures to Characterize Two-Dimensional Fractional Brownian Fields. *Entropy*, **22(2)**, 196.
- Renyi, A., 1970, Probability theory, Amsterdam: North-Holland.
- Rosso, O.A., Mairal, M.L., 2002. Characterization of time dynamical evolution of electroencephalographic records. *Physica A*, **312**, 469–504.
- Shannon, C., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, **27**, 379–423.
- Shifman, M., 1994, Instantons In Gauge Theories, World Scientific Publishing Company.
- Thirring, W., 1958. A Soluble Relativistic Field Theory. *Annals of Physics*, **3(1)**, 91-112.
- Tsallis, C., 1988. Possible generalization of Boltzmann–Gibbs statistics. *Journal of Statistical Physics*, **52**, 479–487.
- Ubricco, M.R., 2009. Entropies based on fractional calculus. *Physics Letters A*, **373(30)**, 2516–2519.
- Yılmaz, N., Canbaz, B., Akıllı, M., Onem, C., 2018. Study of the stability of the fermionic instanton solutions by the scale index method. *Physics Letters A*, **382**, 2118-2121.

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 051201 (979-988)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 051201 (979-988)

DOI: 10.35414/akufemubid.1126047

Araştırma Makalesi / Research Article

## Bazı Selektif Serotonin Geri Alım İnhibitörlerinin Termodinamik Protonasyon Sabitlerinin Su-Asetonitril İkili Karışımlarında Belirlenmesi

Yaşar Doğan DALDAL<sup>1\*</sup>, Ebru ÇUBUK DEMİRALAY<sup>2</sup><sup>1</sup> Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Eczane Hizmetleri Bölümü, Kahramanmaraş<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Temel Eczacılık Bilimleri Bölümü, IspartaSorumlu Yazar <sup>1</sup>e-posta: yasardogan.daldal@istiklal.edu.tr\* ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1211-2686><sup>2</sup>e-posta: ebrucubuk@sdu.edu.trORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6270-7509>

Geliş Tarihi: 04.06.2022

Kabul Tarihi: 24.10.2022

### Öz

Bu çalışmada, trisiklik antidepresanlara alternatif olarak kullanılan selektif serotonin geri alım inhibitörleri (SSRI)'nden sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin su-asetonitril ikili karışımında, ters faz sıvı kromatografik (RPLC) yöntemle alıkonma davranışı incelenmiştir. Kromatografik analizler, mobil faz pH'sı 6,5 ila 10,5 arasında değişen, %45-%55 (h/h) arasında asetonitril içeren asetonitril-su ikili karışımlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca, kolon sıcaklığı ve akış hızı sırasıyla, 30 °C ve 0,8 mL/dakika'da sabitlenmiştir. Bu çalışmada, mobil faz pH değerlerine karşı bileşiklerin alıkonma değerlerinin lineer solvasyon enerjisi ilişkisi (LSER) yaklaşımıyla değerlendirilmesiyle teorik alıkonma değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca farklı pH değerlerindeki mobil fazların aktivite katsayıları değerleri hesaba katılarak doğrusal olmayan regresyon programıyla bileşiklerin termodinamik protonasyon sabitleri ( $\log K_a$ ) belirlenmiştir. Hidrofobik özellikteki bileşiklerin  $\log K_a$  değerleri kullanılarak iki farklı yaklaşımla su ortamındaki protonasyon sabiti değerleri hesaplanmıştır. Çalışma sonunda her iki ekstrapolasyon yönteminden elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

### Anahtar kelimeler

Selektif serotonin geri alım inhibitörü;  
Termodinamik protonasyon sabiti;  
Alıkonma davranışı;  
Su-asetonitril ikili karışımı

## Determination of Thermodynamic Protonation Constants of Some Selective Serotonin Reuptake Inhibitors in Water-Acetonitrile Binary Mixtures

### Abstract

In this study, the retention behaviour of citalopram, fluvoxamine, and sertraline, selective serotonin reuptake inhibitors (SSRIs) used as alternatives to tricyclic antidepressants, was investigated in a binary water-acetonitrile mixture by reverse-phase liquid chromatographic (RPLC) method. Chromatographic analyzes were performed in binary acetonitrile-water mixtures with mobile phase pH ranging from 6.5 to 10.5 and acetonitrile content between 45% and 55% (v/v). Throughout the study, the column temperature and flow rate were fixed at 30 °C and 0.8 mL/min, respectively. In this study, the theoretical retention values were calculated by evaluating the retention values of the compounds against the pH values of the mobile phase using the linear solvation energy relationship (LSER) approach. In addition, the thermodynamic protonation constants ( $\log K_a$ ) of the compounds were determined with a nonlinear regression program, considering the activity coefficients of the mobile phases at different pH values. Using the  $\log K_a$  values of the hydrophobic compounds, the values of the protonation constants in the water medium were calculated using two different approaches. At the end of the study, it was found that the results obtained by both extrapolation methods were compatible with each other.

### Keywords

Selective serotonin reuptake inhibitor;  
Thermodynamic protonation constant;  
Retention behaviour;  
Binary mixture of water-acetonitrile



## 1. Giriş

Selektif serotonin geri alım inhibitörleri (SSRI'ler), depresyon ve duygu durum bozuklukları, anksiyete, bazı kişilik bozuklukları ve yeme bozuklukları gibi psikiyatrik hastalıkların tedavisinde, trisiklik antidepressanlara alternatif olarak kullanılan önemli antidepressanlardır (Jacobsen *et al.* 2015, Bermel *et al.* 2015). SSRI'ler, daha az belirgin antikolinergik yan etki göstermeleri ve şiddetli kardiyotoksositeye sahip olmamaları gibi önemli avantajlarından dolayı, trisiklik antidepressanlara alternatif olarak tercih edilirler (Aronson 2015). Bu grup ilaçlar spesifik organellerde depolanmadan önce, plazma zarı boyunca serotonin alımını engellerler ve bu sayede, histaminerjik, adrenerjik, serotonerjik, dopaminerjik ve kolinerjik reseptörler üzerinde çok az inhibitör etkisi vardır veya hiç yoktur. Sitalopram, fluvoksamin ve sertralin bu grubun önemli ilaçlarındandır (Aronson 2015, Hoirsch-Clapauch *et al.* 2014).

İlaçların hücre zarlarından geçişi ve dokularda absorpsiyonu ve dağılımı, pasif difüzyon ile ilacın moleküler halde olduğu formda gerçekleşir. Bir ilacın iyonlaşmamış formu, iyonize formuna kıyasla lipidlerde daha fazla çözünür olduğundan, ilacın hücre zarından geçişi ve dokularda absorpsiyonu ve dağılımı bu formda gerçekleşir. Bundan dolayı, ilaçların absorpsiyon, dağılım, metabolizma ve atılım (ADME) özelliklerinin belirlenmesinde iyonlaşma, büyük bir etkiye sahiptir. Asidik veya bazik özelliklere sahip bir molekülün iyonlaşma/protonasyon sabiti ( $pK_a$ ) değerinin bilinmesi, o molekülün belirli bir pH'da iyonlaşma derecesini tahmin etmeye yardımcı olur.

$pK_a$  değeri, ters faz sıvı kromatografik (RPLC), potansiyometrik, UV-VIS spektrometrik ve kapiler elektroforetik (CE) (Daldal vd. 2014, Beltran *et al.* 2003, Barbosa *et al.* 2001) gibi çeşitli analitik yöntemlerle belirlenebilmektedir. Bu yöntemler arasında RPLC, diğer tekniklere kıyasla, hızlılığı, spesifikliği, doğruluk ve kesinliğinin yüksekliği ve kullanımının kolaylığı gibi birçok avantajından dolayı, ilaç keşif, geliştirme ve üretiminin tüm aşamalarında kullanılan önemli bir analitik yöntemdir. (Lunn 2005, Kazakevich and LoBrutto,

2007, Meyer 2010). RPLC yöntem ile  $pK_a$  sabitinin belirlenmesi, yapısında iyonlaşabilir fonksiyonel grup içeren bileşikler için mobil fazın pH'sı ile bu pH'da elde edilen alıkonma değerleri ( $t_R$ ) arasındaki ilişkiye dayanır. Bu ilişki, lineer solvasyon enerjisi (LSER) yaklaşımıyla mobil faz pH'sı, mobil faz derişimi ve  $pK_a$ 'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilebildiğinden, bu metod kullanılarak bileşiklerin mobil fazdaki iyonlaşma/protonasyon sabiti ( ${}^s pK_a$ ) değerleri kolaylıkla belirlenebilir (Barbosa *et al.* 1996, Nikitas *et al.* 2002, Ortak and Demiralay 2019, Nane and Demiralay 2021, Daldal and Demiralay 2022). Suda çözünürlüğü yetersiz bileşiklerin su ortamındaki  $pK_a$  değerleri ( ${}^w pK_a$ ), su ve organik çözücü ortamlarında elde edilen  ${}^s pK_a$  değerleri ve bu hidro-organik karışımlardaki çözücünün mol kesri, dielektrik sabiti vb. gibi makroskopik parametreleri ile ilişkisi kullanılarak hesaplanır. Bu ekstrapolasyon metodlarını uygulayabilmek için en az 3 farklı su-organik çözücü ikili karışımında elde edilen  ${}^s pK_a$  değerlerine ihtiyaç duyulur (Herrero-Martínez *et al.* 2008).

Yapılan literatür taramasına göre, sertralin dışında, sitalopram ve fluvoksamin için su-organik çözücü ikili karışımlarında  $pK_a$  değeri ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır (Völgyi *et al.* 2007, Deák *et al.* 2006, Sun and Avdeef 2011, Avdeef and Sun 2011). Ayrıca, bu üç bileşiğin termodinamik protonasyon sabitlerinin tayiniyle alakalı herhangi bir analitik yöntemle yapılmış çalışma da bulunmamaktadır. Bu çalışma ile LSER metoduyla bileşiklerin mobil faz pH'sı ve alıkonma ilişkilerinin değerlendirilmesi, tayini gerçekleştirilen su-organik çözücü ikili karışımlarında hesaplanan aktivite katsayıları kullanılarak doğrusal olmayan regresyon (NLREG) programıyla termodinamik  ${}^s pK_a$  değerlerinin belirlenmesi ve su ortamındaki  $pK_a$  ( ${}^w pK_a$ ) değerlerinin hesaplanması amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deneyde Kullanılan Kimyasal Maddeler

Çalışmada kullanılan ilaç etken maddeleri (safılık  $\geq$  %99) Sigma-Aldrich'ten (St. Louis, MO, ABD) tedarik edilmiştir. Mobil faz hazırlamasında kullanılan asetonitril (MeCN), sodyum hidroksit, potasyum asit

ftalat ve amonyum klorür Merck firmasından (Darmstadt, Almanya), o-fosforik asit ve amonyak (HPLC grade) Riedel-de Haen firmasından (Almanya) temin edilmiştir.

## **2.2. Deneide Kullanılan Cihazlar**

İncelenen bileşiklerin sıvı kromatografik davranışlarını araştırmak ve  $pK_a$  değerlerini belirlemek için Shimadzu marka yüksek performanslı sıvı kromatografi cihazı kullanılmıştır. Sistem pompa (LC -20AD), UV dedektörü (SPD-20A), kolon fırını (CTO -20A) ve gaz giderme ünitesinden (DGPU-20A3) oluşmaktadır.

HPLC mobil fazının pH ölçümleri için Mettler Toledo MA 235 pH/iyon metre (Schwerzenbach, İsviçre) ve Mettler Toledo InLab 413 Ag/AgCl (Schwerzenbach, İsviçre) kombine cam elektrodu kullanılmıştır. IUPAC kurallarına göre, asetonitril-su ikili karışımlarında elektrot kalibrasyonu için referans standart çözelti olarak potasyum asit ftalat (0,05 mol/kg) seçilmiştir (Rondinini *et al.* 1987). Mobil fazın pH'sının ayarlanması sırasında kolon sıcaklığı  $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Çalışmada kullanılan ultra saf su, Direct-Q<sup>®</sup>3 UV su arıtma sisteminden (Millipore, Bedford, MA, ABD) temin edilmiştir.

## **2.3. Standart Çözeltilerin ve Mobil Fazın Hazırlanması**

Sıvı kromatografik çalışma için her ilaçtan 0,0010 g tartılmış, 10 mL çalışılan mobil fazda çözülmüştür ve 100  $\mu\text{g/mL}$ 'lik standart madde çözeltileri elde edilmiştir. Bu çalışmada, mobil fazlardaki asetonitril (MeCN) miktarının değişiminin bileşiklerin alıkonmasına etkisi %45, %47,5, %50, %52,5 ve %55 (h/h) MeCN olmak üzere, su-MeCN ikili karışımlarında analiz edilmiştir. Hazırlanan mobil fazların tampon derişimi 30 mM olacak şekilde ve pH değerleri 6,0 ila 10,5 arasında değişen mobil fazlar hazırlanmıştır. 30 mM o-fosforik asit içeren mobil fazların pH'sı 6,0 ila 8,0 aralığında, 1 M sodyum hidroksit eklenerek, 30 mM amonyum klorür içeren mobil fazların pH'sı 8,5 ile 10,5 aralığında, derişik amonyak eklenerek ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm çözeltiler günlük taze hazırlanıp, kullanımına kadar  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de saklanmıştır.

## **2.4. Yöntem**

Bu çalışmada, sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin sıvı kromatografik tayini Gemini NX C18 (250x3,0 mm I.D., 5  $\mu\text{m}$ , Phenomenex<sup>®</sup>, ABD) kolonda gerçekleştirilmiştir. Çalışma için seçilen bu kolon, geniş çalışma pH'sı aralığına sahip, bazik özellikteki bileşiklerin analizine uygun ve tekrarlanabilirliği yüksek yeni nesil bir kolondur.

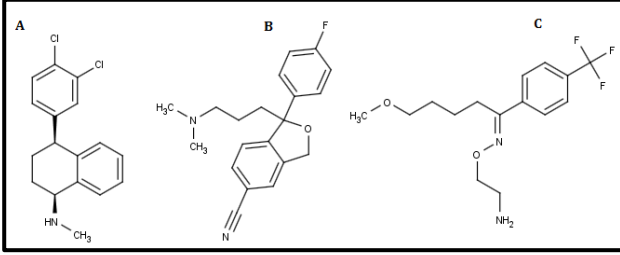
Hazırlanan standart ilaç çözeltilerinden 20  $\mu\text{L}$  sıvı kromatografi cihazına enjekte edilmiş, her bileşik için üç enjeksiyon yapıp, ortalama alıkonma süreleri ( $t_R$ ) belirlenmiştir. Hesaplanan  $t_R$  değerlerinin bağıl standart sapması (%RSD) % 1,0'in altında hesaplanmıştır. Sıvı kromatografik ölçümler, 0,8 mL/dakika akış hızında,  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştirilmiştir. Çalışılan bileşikler 210 nm'de belirlenmiştir.

## **3. Bulgular**

### **3.1. LSER Metodolojisi Alıkonma Davranışının ve Termodinamik $pK_a$ Değerlerinin Belirlenmesi**

SSRI grubuna ait antidepresanlardan olan sertralin, sitalopram ve fluvoksamin, kimyasal yapılarındaki amin gruplardan dolayı bazik özellik gösteren, lipofilite sabiti ( $\log P$ ) değerleri sırasıyla 5,76; 3,76; 2,80 ve suda çözünürlüğü zayıf olan apolar özellikteki bileşiklerdir (Şekil 1) (Int Kyn. 1). Genellikle, RPLC yöntemde bazik bileşiklerin analizi, bileşiğin özellikle iyonlaşmış formunun, kolonun dolgu materyalindeki silanol kalıntılarıyla reaksiyona girmesi sonucu, sıvı kromatografik analizlerde istenmeyen pik simetrisinin oluşmasından dolayı zordur. Ayrıca, klasik silika gruplarını içeren kromatografik kolonların çalışma pH aralıkları, 2 ila 7 arasında kısıtlıdır. Bu nedenlerden dolayı, bazik bileşiklerin sıvı kromatografik analizinde, modifiye edilmiş pH aralıkları geniş, kolonlar tercih edilmektedir (Miguel and Barbas 2003, Volná *et al.* 2017). Bu çalışmada, çalışılan bileşiklerin kimyasal özelliklerine uygun, geniş bir pH aralığında çalışma imkanı sunan (pH 1-12) yeni nesil kolonlardan Gemini NX C18 kolonu seçilmiştir. Ayrıca, sıvı kromatografik çalışma boyunca elde edilen piklerin

simetrisi ve tekrarlanabilirliği, seçilen kolonun bu çalışma için uygun olduğunu göstermektedir.



**Şekil 1.** A) Sertralin, B) sitalopram ve C) fluvoksaminin kimyasal yapısı

Bu çalışmada, sertralin, sitalopram ve fluvoksaminin  $t_R$  değerleri, %45, %47,5, %50, %52,5 ve %55 (h/h) MeCN içeren su-MeCN ikili karışımlarında analiz edilmiştir. Mobil faz pH aralığı 6,0 ila 10,5 olan, bileşiklerin iyonik ve moleküler formlarda olduğu pH aralıklarında çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bileşiklerin 3 tekrarlı olarak elde edilen  $t_R$  değerlerinin ortalaması alınarak, LSER modeliyle değerlendirilmiştir. LSER modelinde bazik fonksiyonel gruplara sahip iyonlaşabilir bir bileşiğin  $t_R$  değeri, aşağıdaki denklem ile matematiksel olarak ifade edilebilir: (Li 2002)

$$\log t_{R} = \log t_{R_{HA}} + \frac{U}{1+V \cdot 10^{\pm(pH-pK_a)}} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de U ve V değerleri, ayarlama (fitting) katsayılarıdır. Bu denklemde U,  $\log f$  değeriyle açıklanır.  $f$  değeri, bileşiğin iyonlaşmış formunun alıkonma değerinin, bileşiğin moleküler formuna oranını ifade etmektedir (Eşitlik 2).

$$\left( f = \left( \frac{t_{R_{A^-}}}{t_{R_{HA}}} \right) \right) \quad (2)$$

V ise yapısında organik çözücü içeren mobil fazın  $pH - pK_a$  değişimini ifade eder. Başlangıç değeri olarak U ve V değerleri sırasıyla, -1 ve 4 olarak alınır (Li 2002).

RPLC yöntem kullanılarak belirlenen bileşiklerin deneysel ortalama  $t_R$  değerleri kullanılarak, Eşitlik 1 ile çalışılan her mobil faz pH değerinde ve su- MeCN ortamı için teorik  $t_R$  hesaplanmıştır. Teorik alıkonma zamanlarının logaritması ( $\log t_{R_{teo.}}$ ) ve deneysel olarak elde edilen alıkonma değerlerinin logaritması ( $\log t_{R_{den.}}$ ) arasındaki farklar alınarak ve hesaplanan artık kareler toplamı (RSS) değerleri minimize

edilerek sonuçlar elde edilmiştir. %45 MeCN-su ortamı için LSER yöntemiyle hesaplanmış  $\log t_{R_{den.}}$  ve  $\log t_{R_{teo.}}$  değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1'deki artık kareler toplamı (RSS) değerleri incelendiğinde, bu değerlerin oldukça küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca, LSER yaklaşımının bileşiklerin  $pK_a$  değerlerinin tayininde kullanılabilmesi için, teorik  $t_R$  ve deneysel  $t_R$  değerleri arasında çizilen grafiğin doğrusal olması (korelasyon katsayısı en az 0,99) ve eğimi kesim değerlerinin sırasıyla 1 ve 0'a yakın olması gereklidir (Şekil 2).

Yapılarında iyonlaşabilen gruplar içeren bileşikler, farklı pH değerlerinde farklı alıkonma değerlerine sahiptir (Kazakevich and LoBrutto, 2007). Çalışılan bileşikler bazik özellikte olduğu için pH 6'da iyonlaşmış, pH 10,5'da da moleküler formda bulunur. Bileşiklerin %50 (h/h) MeCN içeren MeCN-su ikili karışımda elde edilen alıkonmalarını gösteren kromatogramlar Şekil 3'de verilmiştir.

Çalışılan mobil faz pH (6,0-10,5 aralığında) değerlerine karşın analizlenen  $t_R$  değerleri grafiğe geçirildiğinde sigmoidal davranış gözlenmiştir (Şekil 4). Bileşiklerin termodinamik  $\xi pK_a$  değerleri hesaplanan aktivite katsayıları ( $\gamma$ ) kullanılarak doğrusal olmayan regresyon (NLREG) programı ile belirlenmiştir. Sonuçlar standart sapma değerleriyle birlikte, Çizelge 2'de verilmiştir.

Sertralin ve sitalopram tek bir  $pK_a$  değerine sahiptir. Sertralin ve sitalopram için hesaplanan  $\xi pK_a$  değerleri sırasıyla bileşiklerin yapısındaki sekonder ve tersiyer amine aittir. Fluvoksaminin yapısında iki bazik fonksiyonel grup bulunmaktadır. Fluvoksaminin birinci iyonlaşması, benzen halkasına 1 nolu yerden bağlanmış N-(2-aminoetoksi)-5-metoksipentanimidoil yapısındaki birinci azota ait olduğundan ve bu iyonlaşmaya ait  $pK_a$  değerinin teorik olarak 1,52 olarak hesaplanmasından (Int Kyn. 1) ve ayrıca çalışmada kullanılan kolonun pH değeri 1'in altında çalışmaya uygun olmadığından, bileşiğin  $pK_{a1}$  değeri belirlenememiştir. Bu yapıda bulunan primer amine ait  $pK_{a2}$  değeri ise kullanılan kromatografik kolonun geniş pH aralığına sahip olması nedeniyle belirlenebilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü gibi MeCN derişimi arttıkça bileşiklerin

$s_pK_a$  değerinin azalmaktadır. Bu bazik bileşiklerde beklenen sıvı kromatografik davranıştır.

**Çizelge 1.** %45, %50 ve %55 (h/h) MeCN içeren MeCN-H<sub>2</sub>O ikili karışımlarında bileşiklerin LSER yaklaşımıyla hesaplanan  $\log t_{R_{teo}}$  ve  $\log t_{R_{den}}$  değerleri

pH	Sitalopram			Fluvoksamin			Sertralin		
	$\log t_{R_{den}}$ (den.)	$\log t_{R_{teo}}$ (teo.)	$(\log t_{R_{den}} - \log t_{R_{teo}})^2$	$\log t_{R_{den}}$ (den.)	$\log t_{R_{teo}}$ (teo.)	$(\log t_{R_{den}} - \log t_{R_{teo}})^2$	$\log t_{R_{den}}$ (den.)	$\log t_{R_{teo}}$ (teo.)	$(\log t_{R_{den}} - \log t_{R_{teo}})^2$
<b>%45 MeCN-H<sub>2</sub>O (h/h)</b>									
6	0.652	0.657	3.049x10 <sup>-05</sup>	0.608	0.611	1.183x10 <sup>-05</sup>	0.773	0.836	4.040x10 <sup>-03</sup>
6.5	0.668	0.660	6.248x10 <sup>-05</sup>	0.624	0.616	7.214x10 <sup>-05</sup>	0.872	0.847	6.070x10 <sup>-04</sup>
7	0.668	0.670	3.056x10 <sup>-06</sup>	0.624	0.631	3.768x10 <sup>-05</sup>	0.872	0.881	7.927x10 <sup>-05</sup>
7.5	0.707	0.699	6.107x10 <sup>-05</sup>	0.667	0.673	3.332x10 <sup>-05</sup>	1.030	0.974	3.138x10 <sup>-03</sup>
8	0.780	0.776	1.250x10 <sup>-05</sup>	0.786	0.773	1.687x10 <sup>-04</sup>	1.209	1.183	6.849x10 <sup>-04</sup>
8.5	0.907	0.935	7.882x10 <sup>-04</sup>	0.932	0.938	3.730x10 <sup>-05</sup>	1.443	1.483	1.633x10 <sup>-03</sup>
9	1.131	1.135	1.535x10 <sup>-05</sup>	1.085	1.090	2.074x10 <sup>-05</sup>	1.705	1.724	3.806x10 <sup>-04</sup>
9.5	1.320	1.275	2.085x10 <sup>-03</sup>	1.177	1.173	1.527x10 <sup>-05</sup>	1.848	1.843	2.593x10 <sup>-05</sup>
10	1.362	1.338	6.069x10 <sup>-04</sup>	1.208	1.205	7.120x10 <sup>-06</sup>	1.898	1.887	1.141x10 <sup>-04</sup>
10.5	1.372	1.361	1.211x10 <sup>-04</sup>	1.221	1.216	2.744x10 <sup>-05</sup>	1.909	1.902	4.888x10 <sup>-05</sup>
	RSS*			RSS*			RSS*		
	3.787x10 <sup>-03</sup>			4.315x10 <sup>-04</sup>			1.075x10 <sup>-02</sup>		
<b>%50 MeCN-H<sub>2</sub>O (h/h)</b>									
6	0.639	0.637	7.596x10 <sup>-06</sup>	0.602	0.600	3.953x10 <sup>-06</sup>	0.755	0.804	2.383x10 <sup>-03</sup>
6.5	0.634	0.639	1.890x10 <sup>-05</sup>	0.605	0.603	7.302x10 <sup>-06</sup>	0.814	0.811	6.610x10 <sup>-06</sup>
7	0.655	0.646	8.186x10 <sup>-05</sup>	0.616	0.611	2.348x10 <sup>-05</sup>	0.867	0.835	1.015x10 <sup>-03</sup>
7.5	0.660	0.666	2.770x10 <sup>-05</sup>	0.632	0.635	7.861x10 <sup>-06</sup>	0.914	0.902	1.467x10 <sup>-04</sup>
8	0.714	0.718	1.644x10 <sup>-05</sup>	0.695	0.700	1.902x10 <sup>-05</sup>	1.077	1.061	2.756x10 <sup>-04</sup>
8.5	0.823	0.822	1.832x10 <sup>-06</sup>	0.816	0.829	1.660x10 <sup>-04</sup>	1.309	1.311	6.662x10 <sup>-06</sup>
9	0.936	0.942	2.965x10 <sup>-05</sup>	0.986	0.985	2.986x10 <sup>-06</sup>	1.508	1.535	7.245x10 <sup>-04</sup>
9.5	1.031	1.021	1.087x10 <sup>-04</sup>	1.115	1.090	6.294x10 <sup>-04</sup>	1.640	1.652	1.454x10 <sup>-04</sup>
10	1.066	1.055	1.174x10 <sup>-04</sup>	1.149	1.136	1.792x10 <sup>-04</sup>	1.705	1.698	5.451x10 <sup>-05</sup>
10.5	1.073	1.067	3.395x10 <sup>-05</sup>	1.160	1.152	6.370x10 <sup>-05</sup>	1.721	1.713	5.348x10 <sup>-05</sup>
	RSS*			RSS*			RSS*		
	4.441x10 <sup>-04</sup>			1.103x10 <sup>-03</sup>			4.812x10 <sup>-03</sup>		
<b>%55 MeCN-H<sub>2</sub>O (h/h)</b>									
6	0.630	0.626	1.488 x10 <sup>-05</sup>	0.599	0.599	9.609 x10 <sup>-08</sup>	0.755	0.804	2.383 x10 <sup>-03</sup>
6.5	0.632	0.627	2.390 x10 <sup>-05</sup>	0.605	0.604	1.838 x10 <sup>-06</sup>	0.814	0.811	6.610 x10 <sup>-06</sup>
7	0.632	0.630	1.428 x10 <sup>-06</sup>	0.622	0.618	1.861 x10 <sup>-05</sup>	0.867	0.835	1.015 x10 <sup>-03</sup>
7.5	0.633	0.640	4.415 x10 <sup>-05</sup>	0.656	0.657	1.103 x10 <sup>-06</sup>	0.914	0.902	1.467 x10 <sup>-04</sup>
8	0.661	0.664	1.195 x10 <sup>-05</sup>	0.737	0.748	1.220 x10 <sup>-04</sup>	1.077	1.061	2.756 x10 <sup>-04</sup>
8.5	0.708	0.714	3.133 x10 <sup>-05</sup>	0.889	0.887	2.774 x10 <sup>-06</sup>	1.309	1.311	6.662 x10 <sup>-06</sup>
9	0.778	0.776	5.693 x10 <sup>-06</sup>	1.014	1.006	6.505 x10 <sup>-05</sup>	1.508	1.535	7.245 x10 <sup>-04</sup>
9.5	0.829	0.819	1.053 x10 <sup>-04</sup>	1.074	1.066	6.030 x10 <sup>-05</sup>	1.640	1.652	1.454 x10 <sup>-04</sup>
10	0.847	0.838	8.304 x10 <sup>-05</sup>	1.093	1.089	1.417 x10 <sup>-05</sup>	1.705	1.698	5.451 x10 <sup>-05</sup>
10.5	0.848	0.845	1.114 x10 <sup>-05</sup>	1.101	1.097	1.351 x10 <sup>-05</sup>	1.721	1.713	5.348 x10 <sup>-05</sup>
	RSS*			RSS*			RSS*		
	4.441x10 <sup>-04</sup>			1.103x10 <sup>-03</sup>			4.812x10 <sup>-03</sup>		

\*RSS: Artık Kareler Toplamı

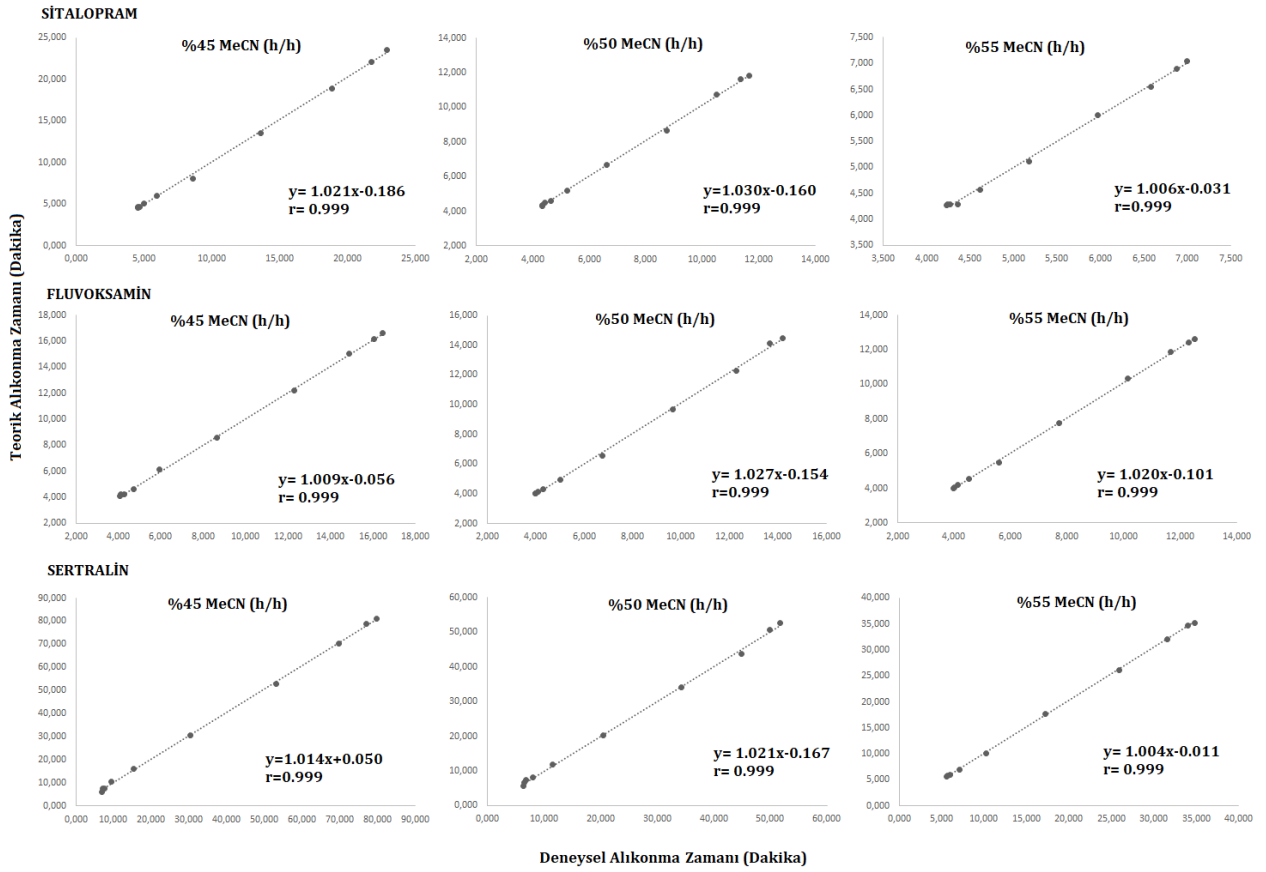
**Çizelge 2.** İncelenen bileşiklerin çalışılan asetonitril-su ortamlarında RPLC yöntemle elde edilen  $s_pK_a$  değerleri

Bil.	Param.	%45 (h/h)	%47.5 (h/h)	%50 (h/h)	%52.5 (h/h)	%55 (h/h)
Sit.	$s_pK_a$	8.464±	8.340±	8.209±	8.087±	7.957±
		0.024	0.023	0.025	0.015	0.027
Flu.	$s_pK_{a2}$	7.970±	7.865±	7.757±	7.648±	7.537±
		0.021	0.010	0.025	0.020	0.041
Sert.	$s_pK_a$	8.640±	8.580±	8.521±	8.459±	8.396±
		0.016	0.024	0.022	0.012	0.019

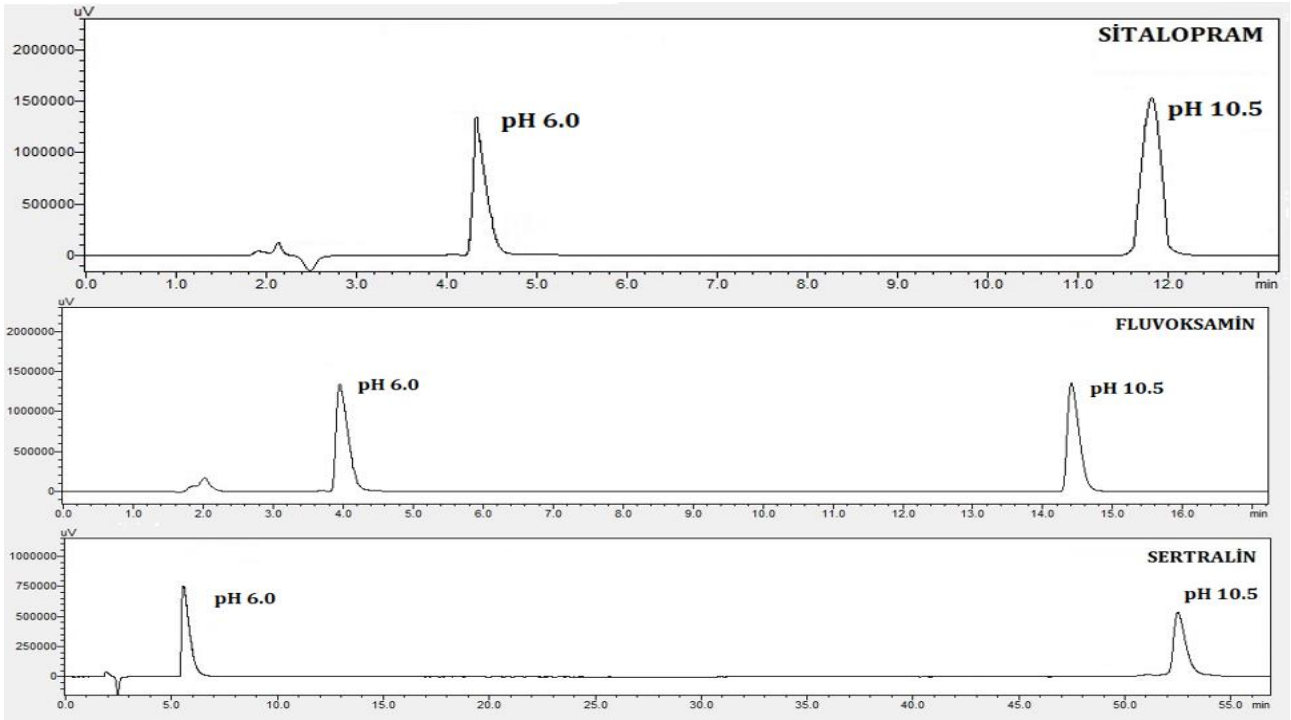
### 3.2. Çalışılan Bileşiklerin Su Ortamındaki Termodinamik Protonasyon Sabitinin ( $w_pK_a$ ) Belirlenmesi

Sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin su ortamındaki termodinamik protonasyon sabiti değerleri ( $w_pK_a$ ), Yasuda-Shedlovsky eşitliği ve mol kesri- $s_pK_a$  ( $X_{MeCN}-s_pK_a$ ) doğrusal ilişki kullanılarak, bileşiklerin MeCN-su ortamlarında elde edilen  $s_pK_a$  değerlerinden hesaplanmıştır (Daldal and Demiralay 2022). Bileşiklerin  $w_pK_a$  değerlerini hesaplamak için bu çalışmada kullanılan ilk yaklaşım,  $X_{MeCN}-s_pK_a$ 'dır. Bu yaklaşım, bileşiklerin farklı ikili asetonitril-su karışımlarında elde edilen  $s_pK_a$  değerleri ile asetonitrilin mol kesri ( $X_{MeCN}$ ) arasındaki doğrusal ilişkiyi kullanır. Bu doğrusal ilişkidenden elde edilen

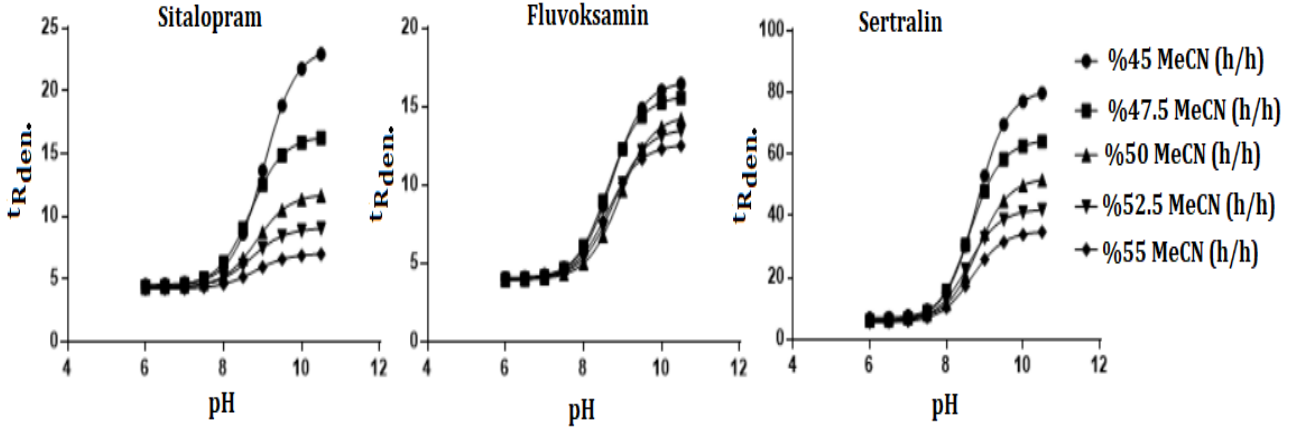
kesim değeri kullanılarak, bileşiğin  $w_pK_a$  değeri hesaplanır.



Şekil 2. Çalışılan bileşikler için deneysel alıkonma zamanlarına karşı teorik alıkonma zamanlarına göre çizilen grafikler



Şekil 3. Bileşiklerin %50 MeCN-su (h/h) ortamında elde edilen moleküler ve iyonik türlerine ait kromatogramlar



Şekil 4. Sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin mobil faz pH'sı ve  $t_R$  değerleri arasındaki ilişki

Bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerlerini hesaplamada kullanılan ikinci yaklaşım olan Yasuda-Shedlovsky eşitliği, çalışılan mobil fazlardaki asetonitrilin dielektrik sabiti değerlerinin tersi ( $1/\epsilon$ ) ile bileşiklerin  ${}^s pK_a + \log [H_2O]$  değerleri arasındaki doğrusal ilişkiye dayanmaktadır. Bu ilişkiden elde edilen doğrusal denklemde, suyun molar derişim ve dielektrik sabiti değerlerinin yerine konulmasıyla bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerleri elde edilir.

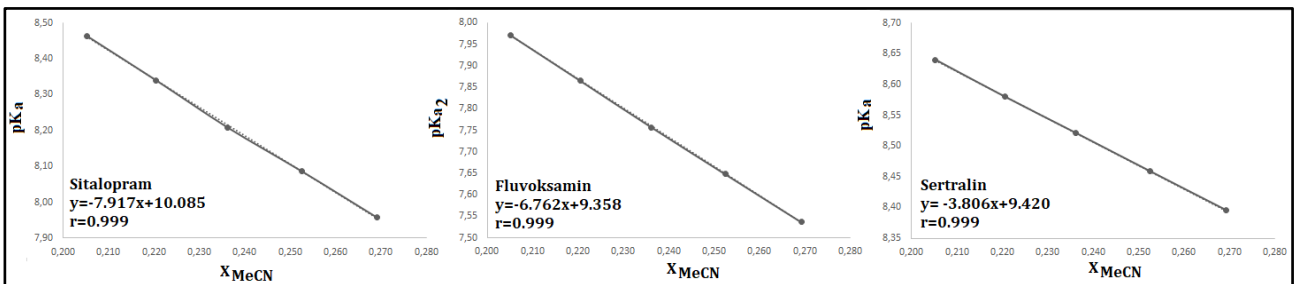
Her iki ekstrapolasyon metodunun bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerlerinin tayininde kullanılabilmesi için en az 3 farklı organik çözücü-su ikili karışımlarında elde edilen bileşiklerin  ${}^s pK_a$  değerlerine ihtiyaç vardır (Herrero-Martínez *et al.* 2008). Sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin mol kesri- ${}^s pK_a$  yönteminden elde edilen doğrusal ilişki Şekil 5'de, Yasuda-Shedlovsky yaklaşımından elde edilen doğrusal ilişkisi ise Şekil 6'da verilmiştir. Ayrıca, bileşiklerin her iki yaklaşım kullanılarak hesaplanan  ${}^w pK_a$  değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Çalışılan bileşiklerin farklı yaklaşımlarla hesaplanan  ${}^w pK_a$  değerleri

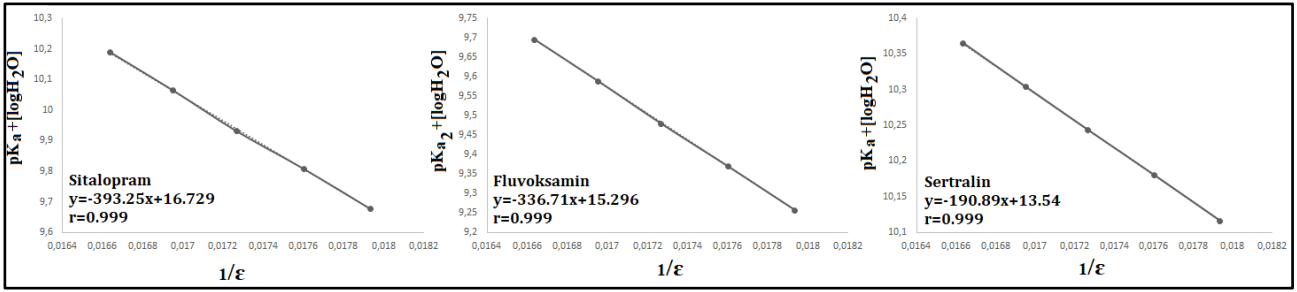
Bil.	Yasuda-Shed.	$X_{ACN}$ - ${}^s pK_a$	Chemicalize	Lit.
Flu.	${}^w pK_{a1}$	-	${}^w pK_{a1}$	1.521
	${}^w pK_{a2}$	9.252	${}^w pK_{a2}$	9.163
Sit.	9.963	10.085	9.785	9.38 <sup>1</sup> 9.07 <sup>2</sup>
Sert.	9.358	9.420	9.853	9.16 <sup>3</sup> 8.85 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Luan et al. 2005, <sup>2</sup>Sun and Avdeef 2011,<sup>3</sup>Deák et al. 2006,<sup>4</sup>Avdeef and Sun 2011

Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen doğrusal grafiklerin denklemlerinde eğim değeri negatiftir. Bu negatif değer, bileşiklerin bazik fonksiyonel grup içerdiğini göstermektedir. Çizelge 3'de sunulan veriler incelenildiğinde, her iki metotla hesaplanan bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerleri arasında uyum görülmektedir. Literatürde, sertraline hariç, çalışılan diğer bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerlerine ait deneysel bir veri bulunamadığından, bileşiklerin  ${}^w pK_a$  değerleri kimyasal yapılarını temel alarak teorik olarak hesaplama yapan Chemicalize programından elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır (Int Kyn. 1).



Şekil 5.  ${}^s pK_a$  ve MeCN'nin mol kesri arasındaki ilişki



Şekil 6. Çalışılan bileşikler için Yasuda-Shedlovsky yaklaşımıyla elde edilen grafikler

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Fluvoksamin ve sitalopram için deneysel olarak elde edilen verilerden hesaplanan  $^w pK_a$  değerleri ile Chemicalize programı kullanılarak hesaplanan  $^w pK_a$  değerleri birbirine yakındır. Fluvoksamin ve sitalopramın  $pK_a$  değerinin deneysel olarak tayiniyle alakalı herhangi bir çalışma bulunmamakla birlikte, sitalopramın  $pK_a$  değerini teorik olarak hesaplayan bir çalışma mevcuttur (Luan et al. 2005).

Sertralin için Völgyi vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, metanol, dioksan ve asetonitril eşit hacimde karıştırılarak (MDM çözeltisi) farklı hacimlerde su ile (26-56,%a/a) ikili karışımlar oluşturulmuş ve potansiyometrik metotla titre edilmiştir. Titrasyon 25 °C'de sabit iyonik şiddette (I=0,15 M KCl) gerçekleştirilmiştir. Aynı çalışma koşullarında metanol-su ikili karışımlarında da sertralin titre edilmiştir. Bu su-organik çözücü karışımlarında hesaplanmış  $pK_a$  değerleri kullanılarak Yasuda-Shedlovsky metoduyla su ortamındaki  $pK_a$  değerleri hesaplanmıştır. Sertralinin su ortamındaki  $pK_a$  değeri MDM'den ekstrapole edilerek  $9,07 \pm 0,02$ ; metanolden ekstrapole edilerek olarak  $9,16 \pm 0,01$  hesaplanmıştır.

Deák vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, sertralin potansiyometrik yöntem kullanılarak %43.64-%63.97 (%a/a) derişim aralığında metanol-su ikili karışımlarında titre edilmiştir. Ortamın iyonik şiddeti 0.15 M KCl ile sabitlenmiştir. Bileşik 0.5 M KCl ile asitlendirilmiştir ve 0.5 M KOH ile azot atmosferinde, 25°C'de ve pH aralığı 1.8-12.2 aralığında titre edilmiştir. Çalışılan metanol-su ortamında hesaplanan  $pK_a$  değerleri Yasuda-Shedlovsky metodu kullanılarak ekstrapole edilmiş,

su ortamındaki  $pK_a$  değerleri 9.16 olarak hesaplanmıştır.

Sun ve Avdeef (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sertralinin 25 °C'deki  $pK_a$  değeri 9.07 ve Abraham çözücü parametre (A,B,S,E,V) değerleri kullanılarak 37°C'deki  $pK_a$  değeri teorik olarak 9.03 olarak hesaplanmıştır.

Avdeef ve Sun (2011) tarafından yapılan çalışmada sertralinin 37 °C'deki  $pK_a$  değeri %15-31 (%a/a) derişim aralığında 1-propanol-su ikili karışımında titre edilmiştir. Ortamın iyonik şiddeti 0.15 M KCl ile sabit tutulmuştur. Çalışılan 1-propanol-su ortamında hesaplanan  $pK_a$  değerleri Yasuda Shedlovsky metodu kullanılarak ekstrapole edilmiş, su ortamındaki  $pK_a$  değeri  $8.85 \pm 0.09$  olarak hesaplanmıştır.

Sertralin için deneysel olarak yapılan bu çalışmalar potansiyometrik yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile gerçekleştirilen çalışma arasındaki küçük farklar, kullanılan farklı çözücü ortamından ve yöntem farklılığından kaynaklanmaktadır. Potansiyometrik yöntem uygulama pratikliği sayesinde, her ne kadar diğer analitik metotlara  $pK_a$  tayini için ön veri sağlaması açısından önemli olsa da, yöntemin  $pK_a$  tayininde uygulanmasında aşırı ve saf analit gereksinimleri, yüksek derişimden kaynaklanan analitin çözünme problemleri ortaya çıkarması gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Ayrıca potansiyometrik metotta, titrasyonu gerçekleştirilen analitteki bulunması muhtemel iyonlaşabilen safsızlıklarında titrasyona dahil olmasından dolayı, eşdeğerlik noktası doğru bir şekilde belirlenememe ve bundan dolayı da tayini yapılacak maddenin  $pK_a$  değeri belirlenirken hatalı sonuçlar elde etme olasılığı yüksektir. (Kazakevich



and LoBrutto 2007, Yıldız *et al.* 1997). Bu dezavantajlarından dolayı, ilaç araştırma-geliştirme laboratuvarlarında ve ilaç endüstrisinde, geliştirilen yöntemin doğruluğu, seçiciliği, kesinliği, uygulama kolaylığı, tekrarlanabilirliği, az ve saf olmayan analitle çalışma imkânı sunması gibi önemli avantajlarından dolayı tercih edilen metot, ters faz sıvı kromatografi metodudur (Kazakevich and LoBrutto 2007, Meyer 2010). Bu nedenle gerçekleştirilen bu çalışmada, literatürdeki veri eksikliğini gidermek ve elde edilebilecek en doğru sonuçlara ulaşmak amacıyla, RPLC yöntemi kullanılarak su-MeCN ikili karışımlarında sitalopram, fluvoksamin ve sertralinin sıvı kromatografik davranışı belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen veriler, RPLC yöntemiyle ve asetonitril-su ikili karışımlarında belirlenmiş ilk verilerdir.

## 5. Kaynaklar

- Aronson, J.K., 2016. *Meyler's Side Effects of Drugs*. Elsevier, 250-340.
- Avdeef, A., Sun, N., 2011. A New in situ brain perfusion flow correction method for lipophilic drugs based on the pH-dependent crone-renkin equation. *Pharmacological Research*, **28**, 517–530.
- Barbosa, J., Barrón, D., Jiménez-Lozano, E., Sanz-Nebot, V., 2001. Comparison between capillary electrophoresis, liquid chromatography, potentiometric and spectrophotometric techniques for evaluation of pKa values of zwitterionic drugs in acetonitrile–water mixtures. *Analytica Chimica Acta*, **437**, 309–321.
- Barbosa, J., Sanz-Nebot, V., Toro, I., 1996. Solvatochromic parameter values and pH in acetonitrile-water mixtures Optimization of mobile phase for the separation of peptides by high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, **725**, 249-260.
- Beltran, J.L., Sanli, N., Fonrodona, G., Barrón, D., Ozkan, G., Barbosa, J., 2003. Spectrophotometric, potentiometric and chromatographic pKa values of polyphenolic substances in water and acetonitrile-water media. *Analytica Chimica Acta*, **484**, 253–264.
- Bermel, R.A., Hashmonay, R., Meng, X., Randhawa, S., von Rosenstiel, P., Sfikas, N., Kantor, D., 2015. Fingolimod first-dose effects in patients with relapsing multiple sclerosis concomitantly receiving selective serotonin-reuptake inhibitors. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, **4**, 273–280.
- Daldal, Y.D., Çakır, C., Yılmaz, H., Demiralay, E.Ç., Özkan, S.A., Alsancak, G., 2014. Liquid Chromatographic, Spectrophotometric and Potentiometric pKa Determination of Ranitidine and Famotidine. *Current Drug Therapy*, **9**, 277-284.
- Daldal, Y.D., Demiralay, E.Ç., 2022. Development of liquid chromatographic and UV-visible spectrophotometric methods for determination of pKa values of folic acid antimetabolites. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **212**, 1-8.
- Deák, K., Takács-Novák, K., Tihanyi, K., Béla, N., 2006. Physico-Chemical profiling of antidepressive sertraline: solubility, ionisation, lipophilicity. *Medicinal Chemistry*, **2**, 1-6.
- Herrero-Martínez, J., M., Repollés, C., Bosch, E., Rosés, M., Ràfols, C., 2008. Potentiometric determination of aqueous dissociation constants of flavonols sparingly soluble in water. *Talanta*, **74**, 1008–1013.
- Hoirisch-Clapach, S., Nardi, A.E., Gris, J., Brenner, B., 2014. Are the antiplatelet and profibrinolytic properties of selective serotonin-reuptake inhibitors relevant to their brain effects?. *Thrombosis Research*, **134**, 11–16.
- Jacobsen, N.W., Hansen, C.H., Nellemann, C., Styrisshave, B., Halling-Sørensen, B., 2015. Effects of selective serotonin reuptake inhibitors on three sex steroids in two versions of the aromatase enzyme inhibition assay and in the H295R cell assay. *Toxicology in Vitro*, **29**, 1729–1735.
- Kazakevich, Y., LoBrutto, Y., 2007. *HPLC for Pharmaceutical Scientists*. Wiley-Interscience, 139-249.
- Li, J., 2002. Prediction of internal standards in reversed-phase liquid chromatography III. Evaluation of an alternative solvation parameter model to correlate and predict the retention of ionizable compounds. *Journal of Chromatography A*, **982**, 209–223.
- Luan, F., Ma, W., Zhang, H., Zhang, X., Liu, M., Hu, Z., Fan, B., 2005. Prediction of pKa for Neutral and Basic Drugs Based on Radial Basis Function Neural Networks and the Heuristic Method. *Pharmaceutical Research*, **22(9)**, 1454-1460.
- Lunn, G., 2005. *HPLC Methods For Recently Approved Pharmaceuticals*. John Wiley and Sons, 38-387.
- Meyer, V.R., 2010. *Practical High-Performance Liquid Chromatography*. John Wiley and Sons, 5-55.



- Miguel, L., Barbas, C., 2003. LC determination of impurities in azithromycin tablets. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **33(2)**, 211–217.
- Nane, I.D., Demiralay, E.C., 2021. Thermodynamic protonation constant values of meclizine and buclizine in acetonitrile-water binary mixtures, *Journal of Research in Pharmacy*, **25(1)**, 42–51.
- Nikitas, P., Pappa-Louisi, A., Agrafiotou, P., 2002. Effect of the organic modifier concentration on the retention in reversed-phase liquid chromatography II. Tests using various simplified models. *Journal of chromatography A*, **946(1–2)**, (2002) 33–45.
- Ortak, H.Y., Demiralay, E.C., 2019. Effect of temperature on the retention of Janus kinase 3 inhibitor in different mobile phase compositions using reversed-phase liquid chromatography, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **164**, 706–712.
- Rondinini, S., Mussini, P.R., Mussini, T., 1987. Reference value standard and primary standard for pH measurements in organic solvents and water–organic solvent mixtures of moderate to high permittivities. *Pure and Applied Chemistry*, **59**, 1549–1560.
- Sun, N., Avdeef, A., 2011. Biorelevant pKa (37°C) predicted from the 2D structure of the molecule and its pKa at 25°C. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **56(2)**, 173–182.
- Völgyi, G., Ruiz, R., Box, K., Comer, J., Bosch, E., Takács-Novák, K., 2007. Potentiometric and spectrophotometric pKa determination of water-insoluble compounds: Validation study in a new cosolvent system. *Analytica Chimica Acta*, **583**, 418–428.
- Volná, T., Motyka, K., Hlaváč, J., 2017. RP-HPLC determination of dissociation constant using solely aqueous mobile phase. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **134**, 143–148.
- Yıldız, A., Genç, Ö., Bektaş, S., 1997. Enstrümental Analiz Yöntemleri. Hacettepe Üniversitesi Yayınları, 321-322.

#### **İnternet Kaynakları**

- 1- <http://www.chemicalize.org>, (01.06.2022)

**Mikro Hasarlı Plakların Riesz-Caputo Kesirli Türevi ile Titreşim Analizi**Soner AYDINLIK<sup>1\*</sup>, Ahmet KIRIS<sup>2</sup><sup>1</sup>Doğuş Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği, Ümraniye, 34775, İstanbul<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Matematik Mühendisliği, Maslak, 34469, İstanbulSorumlu yazar e-posta: saydinlik@dogus.edu.tr\* ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0321-4920>

kiris@itu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3687-6640>

Geliş Tarihi: 08.02.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

**Öz****Anahtar kelimeler**

Riesz-Caputo kesirli türevi; Nonlokal plak titreşimi; Uzay-zaman kesirli türev; Mikrojenleşme teorisi

Bu çalışmada Riesz Caputo kesirli türev tanımı yardımıyla, nonlokal çekirdekler tanımlamadan, mikrojenleşme teorisi ile modellenen mikro hasarlı plakların nonlokal titreşim analizi yapılmıştır. Dört ucu ankastre-“clamped” (CCCC) mikro hasarlı plağın frekans spektrumu ve mod şekilleri kesirli türev mertebesinin ( $\alpha$ ) ve birim uyum katsayısının ( $l$ ) farklı değerleri için elde edilmiştir. 3-boyutlu titreşim analizi Ritz enerji yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bilimsel literatüre temel katkısı, kesirli türev kavramıyla modellenen nonlokal titreşim analizinin klasik teoriye göre daha uygun bir model olduğunun ve deneysel sonuçlarla daha iyi örtüşüğünün gösterilmesidir.

**Vibration Analysis of Micro-Damaged Plates with Riesz-Caputo Fractional Derivative****Keywords**

Riesz-Caputo fractional derivative; Nonlocal plate vibration; Space-time fractional derivative; Microelongation theory

**Abstract**

In this study, with the help of Riesz Caputo fractional derivative definition, non-local analysis of micro-damaged plates are investigated by micro-elongation theory without defining the nonlocal kernels. The frequency spectrum and mode shapes of the microelongated plate with four clamped edges for different values of the fractional continua order ( $\alpha$ ) and the material length scale parameter ( $l$ ) are carried out. 3-dimensional vibration analysis are done using the Ritz energy method. The main contribution of the study to the scientific literature is the demonstration that the nonlocal vibration analysis modeled with the concept of fractional derivative is a more suitable model than the classical theory and it fits better with the experimental results.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

**1. Giriş**

Klasik sürekli ortamlar mekaniği, makro özellik gösteren malzemelerin modellenmesinde deneysel sonuçlara uygun sonuçlar vermesine rağmen mikro hasarlar, mikro yapıli kompozitler gibi mikro yapılar içeren malzemeler için yeterince iyi bir model sunamamaktadır. Örneğin akustik dalga yayılımında, yüzey dalgaları altında doğrusal olmayan yer değiştirmelerin hesabında, tek boyutlu durum için bile klasik teorinin yetersizliği gözlenebilmektedir (Mindlin and Eshel 1968, Eringen and Edelen 1972). Eringen'in mikropolar ve mikrogerme teorileri (Eringen 1968, 1990), Mindlin' in birinci ve ikinci mertebeye genleme gradyanı teorileri (Mindlin 1964,

1965) gibi alternatif yaklaşımlar, Cosserat kardeşlerin yaklaşık yarım yüzyıldır unutulmuş çalışmalarını (Cosserat 1896) ortaya çıkarmıştır. Eringen'in mikropolar teorisi Cosserat teorisi ile tamamen örtüşmekte olup, elementer parçacığın makro hareketinin yanısıra, mikro çapta bağımsız bir mikro dönme hareketi yaptığı kabulüne dayanmaktadır. Mikrogerme teorisinde ise, bu mikro dönme hareketine ek olarak parçacığın, yine makro hareketten bağımsız bir hacimsel genleşme yapabildiği varsayılır. Mikrojenleşme teorisi ise, parçacığın sadece mikro hacimsel genleşme yapabildiği özel bir durum olarak düşünülebilir. Mikropolar ve mikrogerme teorileri mikro

parçacıklar, kompozitler içeren mikro yapılı malzemeler için iyi sonuç verirken, mikrogenleşme teorisi bu teorilerin getirdiği denklem ve bilinmeyen malzeme sabiti sayısını azaltmakla birlikte özellikle mikro hasarlı malzemelerin modellenmesinde daha iyi sonuçlar vermektedir.

Günümüzün gelişen teknolojisi ile birlikte, önceki yüzyıllara göre daha üstün mekanik, termal, elektriksel ve manyetik etki gösteren malzemelere duyulan ihtiyaç her geçen gün daha fazla artmaktadır. Bu tür malzemeler için gerilme ve şekil değiştirmenin doğru olarak hesaplanması özellikle gemi, uçak, uzay bilimleri, inşaat, otomotiv, elektronik ve biyomedikal alanlarında oldukça önemlidir. Dahası, malzemelerin bu üstün özelliklerinin yanısıra, ağırlık ve boyut olarak mümkün olduğunca küçük olmasının istenmesi bir başka güçlüktür. Deneyle, bu sınırlamalar altında, boyut-etkisinin daha önemli olduğunu ve bu etkinin hesaplamalara katılması gerektiğini göstermektedir (Cottone *et al.* 2009).

Eringen' in mikropolar ve mikrogerme teorileri klasik teoriye göre daha iyi sonuç verseler de, sadece incelenen noktanın katkısıyla sınırlı olup, nonlokal davranışı yansıtamazlar. Nonlokalite, malzemenin bir noktadaki davranışının sadece o noktadaki özelliklerine değil, o noktanın civarındaki noktaların özelliklerinden de etkilendiği gerçeğine dayanır. Bu nonlokal etki, küçük boyut ölçekli malzemelerin davranışının tahmini ve açıklanmasında etkilidir. Örneğin, zaman-harmonik Rayleigh yüzey dalgalarının nonlokal teorisiyle elde edilen dispersiyon eğrileri atomik dispersiyon eğrileri ile tamamen çakışır (Khuruna and Tomar 2017). Sarmal dislokasyon ve Rayleigh yüzey dalgaları (Eringen 1983) ve doğrusal isotropik nonlokal mikropolar elastik katılarda enine düzlem dalgalar için dispersiyon ilişkilerinin analizi (Eringen 1984) nonlokalite teorisinin üstünlüğünü açıkça göstermektedir.

Mikrogerme ve mikropolar teorileri bu üstünlüklerine rağmen, klasik teoriye göre daha çok malzeme özelliği ve daha fazla sayıda karmaşık denklem içermektedir. Ayrıca nonlokalitenin etkisi

de nonlokal çekirdekler kullanılarak işlemlere dahil edildiğinde, hesaplar daha da güçleşmektedir. Dolayısıyla bu karmaşıklık yerine, kesirli türev kavramından faydalanan, kesirli mekaniğin doğal nonlokal yapısı, var olan modellerin kesirli mekaniğe genişletilmesini oldukça popüler kılmaktadır (Aydınlik ve Kırış 2020, Aydınlik vd. 2021a, Aydınlik vd. 2021b)

Bu çalışmada, dört ucu ankastre (CCCC) mikro hasarlı plaklar mikrogenleşme teorisi ile modellenmiş ve 3-boyutlu nonlokal titreşim analizi kesirli mekanik kapsamında incelenmiştir. Bu anlamda çalışmada verilen kesirli Kirchoff-Love plak teorisi genelleştirilmiştir (Sumelka 2015) ve klasik birinci mertbe gradyanlar yerine, nonlokaliteyi modelleyen yerdeğiştirme alanının kesirli Riesz-Caputo türevi kullanılmıştır. Zhou vd.' nin (2002) çalışmasına benzer şekilde, frekans spektrumu ve mod şekilleri için Ritz enerji yaklaşımı kullanılmıştır. Genlik fonksiyonları sınır koşullarına uygun sınır fonksiyonları ile çarpılan üçlü Chebyshev serileri cinsinden yazılmıştır. Plagın frekans spektrumu ve mod şekilleri kesirli türev mertebesinin ve uzunluk ölçü parametresi parametresinin farklı değerleri için şekil ve tablolarla verilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel frekanslarla (Low *et al.* 1998) karşılaştırılarak, kesirli malzeme özelliklerinin belirli değerleri için kesirli hesapla elde edilen frekansların klasik frekanslara göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu gözlenmiştir, ki bu durum, çalışmanın temel sonuçlarından biridir. Ayrıca kesirli türevin mertebesi tamsayı türeve ve birim uyum katsayısı sıfıra yaklaştıkça, sonuçların beklendiği üzere klasik sonuçlarla uyum içinde olduğu da gösterilmiştir.

Bu çalışmada, Riesz-Caputo kesirli türev opertörü ve kesirli türev tanımına genişletilen modifiye trapez yöntemi (Odibat 2006) 2. Bölümde verilmiştir. 3. Bölümde, mikrogenleşen dikdörtgen plakların nonlokal titreşim analizi verilmiştir. 4. Bölüm, sunulan kesirli modelin etkinliğinin deneysel olarak doğrulanmasına ayrılarak, bu bölümde kesirli modelin klasik modele göre deneysel sonuçları daha iyi yansıttığı gösterilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Riesz-Caputo Kesirli Türevi

**Tanım.** Riesz-Caputo kesirli türevi

$${}^{RC}D_b^\alpha f(t) := \begin{cases} \frac{1}{2}({}_a^C D_t^\alpha f(t) + (-1)^n {}_t^C D_b^\alpha f(t)), & n-1 \leq \alpha < n, \\ \frac{d^n}{dt^n} f(t), & \alpha = n, \end{cases} \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Burada,  ${}_a^C D_t^\alpha f(t)$  ve  ${}_t^C D_b^\alpha f(t)$  sırasıyla sol ve sağ Caputo kesirli türevine karşılık gelmektedir ve bu türevler

$${}_a^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(s)}{(t-s)^{\alpha-n+1}} ds \quad a > t, \quad n-1 \leq \alpha < n, \quad (2)$$

$${}_t^C D_b^\alpha f(t) = \frac{(-1)^n}{\Gamma(n-\alpha)} \int_t^b \frac{f^{(n)}(s)}{(s-t)^{\alpha-n+1}} ds \quad t < b, \quad n-1 \leq \alpha < n. \quad (3)$$

olarak tanımlanırlar. Bu çalışmada, sol ve sağ Caputo kesirli türevlerinin yaklaşık değerleri modifiye trapez kuralı kullanılarak elde edilmiştir (Odibat 2006). Ayrıca bu çalışmada Riesz-Caputo kesirli türevi

$${}_{t-l_t}^{RC} D_{t+l_t}^\alpha f(t) := \begin{cases} \frac{\Gamma(n+1-\alpha)}{2} I_t^{\alpha-1} ({}_t^C D_t^\alpha f(t) + (-1)^n {}_t^C D_{t+l_t}^\alpha f(t)), & n-1 \leq \alpha < n, \\ \frac{d^n}{dt^n} f(t), & \alpha = n, \end{cases} \quad (4)$$

olacak şekilde tanımlanmıştır. Burada  $l_t$  birim uyum katsayısıdır. (4) denkleminde sadece  $\alpha \rightarrow n$  değil  $l_t \rightarrow 0$  iken, kesirli türev tamsayıli mertebeden türeve yakınsar;

$$\begin{aligned} \lim_{l_t \rightarrow 0} {}^{RC} D_{t+l_t}^\alpha f(t) &= \\ \frac{\Gamma(n+1-\alpha)}{2\Gamma(n-\alpha)} \lim_{l_t \rightarrow 0} I_t^{\alpha-1} \left( \int_{t-l_t}^t \frac{f^{(n)}(s)}{(t-s)^{n-\alpha-1}} ds + \int_t^{t+l_t} \frac{f^{(n)}(s)}{(s-t)^{n-\alpha-1}} ds \right) &= \\ \frac{\Gamma(n+1-\alpha)}{2\Gamma(n-\alpha)} \lim_{l_t \rightarrow 0} \frac{\left( \int_{t-l_t}^t \frac{f^{(n)}(s)}{(t-s)^{n-\alpha-1}} ds + \int_t^{t+l_t} \frac{f^{(n)}(s)}{(s-t)^{n-\alpha-1}} ds \right)}{I_t^{1-\alpha}} &= \\ \frac{\Gamma(n+1-\alpha)}{2\Gamma(n-\alpha)} \lim_{l_t \rightarrow 0} \frac{\left( \frac{f^{(n)}(t-l_t)}{I_t^\alpha} + \frac{f^{(n)}(t+l_t)}{I_t^\alpha} \right)}{I_t^\alpha (n-\alpha)} &= f^{(n)}(t). \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 Mikro Hasarlı Dikdörtgen Plakların Nonlokal Titreşim Analizi

Mikrogenleşme teorisinde şekil değiştirme bileşenleri

$$\varepsilon_{kl} = \frac{u_{l,k} + u_{k,l}}{2} \quad \gamma_k = \theta_{,k} \quad (6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada,  $\mathbf{u}$  ve  $\theta$ , sırasıyla yer değiştirme vektörü ve mikrogenleşme katsayısıdır. Virgül ve sonrasında gelen indis  $\mathbf{x}$  konum vektörünün  $k$ . elemanına göre kısmi türevini göstermektedir. Burada bundan sonra tekrarlanan indisler üzerine Einstein'ın toplama uzlaşımı kullanılacaktır. Genleme alanlarının kesirli formları

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^\alpha &= \frac{1}{2} \left( {}_{x_j-l_{x_j}}^{RC} D_{x_j+l_{x_j}}^\alpha u_i + {}_{x_i-l_{x_i}}^{RC} D_{x_i+l_{x_i}}^\alpha u_j \right), \\ \gamma_i^\alpha &= {}_{x_i-l_{x_i}}^{RC} D_{x_i+l_{x_i}}^\alpha \theta, \end{aligned} \quad (7)$$

olarak tanımlanmıştır ve burada  $l_{x_i}$ ,  $x_i$  doğrultusundaki birim uyum katsayısıdır.

Üç boyutlu elastisite teorisinde gerilmenin kesirli mekaniğe genişletilmesi

$$\boldsymbol{\sigma}^\alpha = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^\alpha \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j, \quad (8)$$

denkleminde verilir. Kesirli elastik genleme enerjisi integral formda

$$V = \frac{1}{2} \int_v \boldsymbol{\sigma}^\alpha \boldsymbol{\varepsilon}^\alpha dv. \quad (9)$$

dir. Mikrogenleşme teorisinde kesirli elastik genleme enerjisi

$$V = \frac{1}{2} \int_v \left( (\sigma^\alpha \varepsilon^\alpha)_{\text{klasik}} + ((s^\alpha - t^\alpha)\theta)_{\text{mikrogenleşme}} \right) dv \quad (10)$$

olarak tanımlanır. Burada,

$$\begin{aligned} \sigma_{kl}^\alpha &= \lambda \varepsilon_{mm}^\alpha \delta_{kl} + \mu \varepsilon_{kl}^\alpha + \mu \varepsilon_{lk}^\alpha + \lambda_0 \theta \delta_{kl}, \\ m_k^\alpha &= a_0 \theta_{,k}^\alpha, \\ s^\alpha - t^\alpha &= \lambda_1 \theta + \lambda_0 \varepsilon_{kk}^\alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

$\sigma_{kl}^\alpha$  kesirli gerilme bileşeni iken  $m_k^\alpha$  mikrogenleşme vektörünün bileşenidir ve  $s^\alpha = m_{kk}^\alpha$ ,  $t^\alpha = \sigma_{kk}^\alpha$  şeklindedir.  $\lambda$  ve  $\mu$  Lamé sabitleri ve  $\lambda_0, \lambda_1, a_0$  mikrogenleşme katsayılarıdır.

Elastik genleme enerjisinin indis notasyonu yardımıyla gösterimi

$$V = \frac{1}{2} \int_v \left( \left( \frac{1}{2} (\lambda \varepsilon_{kk}^\alpha \varepsilon_{ll}^\alpha + 2\mu \varepsilon_{kl}^\alpha \varepsilon_{kl}^\alpha) \right)_{\text{klasik}} + \left( \frac{1}{2} \lambda_1 \theta^2 + \lambda_0 \theta \varepsilon_{kk}^\alpha + \frac{1}{2} a_0 \gamma_k^\alpha \gamma_k^\alpha \right)_{\text{mikrogenleşme}} \right) dv \quad (12)$$

şeklindedir. Kinetik enerji

$$T = \frac{1}{2} \int_v \left( (\rho \dot{u}_i \dot{u}_i)_{\text{klasik}} + (3\rho j \dot{\theta} \dot{\theta})_{\text{mikrogenleşme}} \right) dv \quad (13)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\rho$  yoğunluk ve  $j$  mikro atalettir.

Uzunluğu  $a$ , genişliği  $b$  ve kalınlığı  $h$  olan mikro hasarlı plağın maksimum enerji fonksiyoneli

$$\Pi = V_{\text{max}} - T_{\text{max}} \quad (14)$$

olarak verilmiştir.

Serbest harmonik hareket altında, klasik yer değiştirme ve mikrogenleşme bileşenleri genlik fonksiyonlar cinsinden,

$$\{u(x, y, z, t), \theta(x, y, z, t)\} = \{U(x, y, z), \Theta(x, y, z)\} e^{i\omega t}, \quad (15)$$

tanımlanmıştır. Burada,  $\omega$  doğal frekanstır. Boyutsuz değişkenler,

$$\xi = \frac{2x}{a}, \quad \eta = \frac{2y}{b}, \quad \zeta = \frac{2z}{h} \quad (16)$$

olarak tanımlandığında, elastik genleme  $V_{\text{max}}$  ve  $T_{\text{max}}$  kinetik enerjileri,

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} &= \frac{bh}{4a} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [\lambda \bar{\Lambda}_1^2 + (2\mu) \bar{\Lambda}_2 + 2\mu \bar{\Lambda}_3 + (\mu) \bar{\Lambda}_4 + a_0 \bar{\Lambda}_5] d\zeta d\eta d\xi \\ &+ \frac{bh}{8} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [2\lambda_0 \Theta \bar{\Lambda}_1] d\zeta d\eta d\xi + \frac{abh}{16} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [\lambda_1 \Theta^2] d\zeta d\eta d\xi, \end{aligned} \quad (17)$$

$$T_{\text{max}} = \frac{\rho}{16} abh \omega^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \{ [U_1^2 + U_2^2 + U_3^2] + 3j \Theta^2 \} d\zeta d\eta d\xi, \quad (18)$$

haline gelir. Burada

$$\begin{aligned} \bar{\Lambda}_1 &= \bar{\varepsilon}_{\xi\xi}^2 + \bar{\varepsilon}_{\eta\eta}^2 + \bar{\varepsilon}_{\zeta\zeta}^2, \quad \bar{\Lambda}_2 = \bar{\varepsilon}_{\xi\xi}^2 + \bar{\varepsilon}_{\eta\eta}^2 + \bar{\varepsilon}_{\zeta\zeta}^2, \\ \bar{\Lambda}_3 &= {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\eta} {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\xi} + {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta} {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\xi} + {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta} {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\eta}, \\ \bar{\Lambda}_3 &= ({}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\eta} - {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\xi}) {}_2\bar{\varepsilon}_{\xi\eta} + ({}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta} - {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\xi}) {}_2\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta} \\ &+ ({}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta} - {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\eta}) {}_2\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta}, \\ \bar{\Lambda}_3 &= {}_2\bar{\varepsilon}_{\xi\eta}^2 + {}_2\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta}^2 + {}_2\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta}^2, \\ \bar{\Lambda}_4 &= {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\eta}^2 + {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\xi}^2 + {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta}^2 + {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\xi}^2 + {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta}^2 + {}_1\bar{\varepsilon}_{\zeta\eta}^2, \\ \bar{\Lambda}_5 &= \bar{\Theta}_{,\xi}^2 + \bar{\Theta}_{,\eta}^2 + \bar{\Theta}_{,\zeta}^2, \end{aligned} \quad (19)$$

ve

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{\xi\xi} &= \frac{\partial^\alpha U_1}{\partial \xi^\alpha}, \quad \bar{\varepsilon}_{\eta\eta} = \alpha_1 \frac{\partial^\alpha U_2}{\partial \eta^\alpha}, \quad \bar{\varepsilon}_{\zeta\zeta} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\partial^\alpha U_3}{\partial \zeta^\alpha}, \\ {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\eta} &= \frac{\partial^\alpha U_2}{\partial \xi^\alpha}, \quad {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\xi} = \alpha_1 \frac{\partial^\alpha U_1}{\partial \eta^\alpha}, \quad {}_1\bar{\varepsilon}_{\xi\zeta} = \frac{\partial^\alpha U_3}{\partial \xi^\alpha}, \\ \bar{\varepsilon}_{\xi\xi} &= \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\partial^\alpha U_1}{\partial \xi^\alpha}, \quad {}_1\bar{\varepsilon}_{\eta\zeta} = \alpha_1 \frac{\partial^\alpha U_3}{\partial \eta^\alpha}, \quad \bar{\varepsilon}_{\zeta\eta} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\partial^\alpha U_2}{\partial \zeta^\alpha}, \\ \bar{\Theta}_{,\xi} &= \frac{\partial^\alpha \Theta}{\partial \xi^\alpha}, \quad \bar{\Theta}_{,\eta} = \alpha_1 \frac{\partial^\alpha \Theta}{\partial \eta^\alpha}, \quad \bar{\Theta}_{,\zeta} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \frac{\partial^\alpha \Theta}{\partial \zeta^\alpha}, \\ \alpha_1 &= \frac{a}{b}, \quad \alpha_2 = \frac{h}{b}. \end{aligned} \quad (20)$$

dir. Bu çalışmada kabul edilebilir fonksiyonlar sınır fonksiyonlarıyla çarpılmış Chebyshev polinomları

serisi olarak seçilmiştir. Bu yüzden her genlik fonksiyonu

$$\begin{aligned}
 U_1(\xi, \eta, \zeta) &= F_{u_1}(\xi, \eta) \sum_{i,j,k=1}^{\infty} A_{ijk} P_i(\xi) P_j(\eta) P_k(\zeta), \\
 U_2(\xi, \eta, \zeta) &= F_{u_2}(\xi, \eta) \sum_{l,m,n=1}^{\infty} B_{lmn} P_l(\xi) P_m(\eta) P_n(\zeta), \\
 U_3(\xi, \eta, \zeta) &= F_{u_3}(\xi, \eta) \sum_{p,q,r=1}^{\infty} C_{pqr} P_p(\xi) P_q(\eta) P_r(\zeta), \\
 \Theta(\xi, \eta, \zeta) &= F_{\theta}(\xi, \eta) \sum_{\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}=1}^{\infty} \hat{A}_{\hat{i}\hat{j}\hat{k}} P_{\hat{i}}(\xi) P_{\hat{j}}(\eta) P_{\hat{k}}(\zeta).
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

şekindedir ve sınır koşulları için kabul edilebilir fonksiyonlar,

$$F_{\delta}(\xi, \eta) = f_{\delta}^1(\xi) f_{\delta}^2(\eta), \quad (\delta = u_1, \theta, \quad i = 1, \dots, 3).
 \tag{22}$$

olarak seçilebilir. Chebyshev polinomlarının katsayılarına göre enerji fonksiyonunun minimize edilmesi,

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A_{ijk}} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial B_{lmn}} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial C_{pqr}} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \hat{A}_{\hat{i}\hat{j}\hat{k}}} = 0
 \tag{23}$$

frekanslar için özdeğer-özvektör problemini

$$(\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{Z} = \mathbf{0}
 \tag{24}$$

verir. Burada,

$$\Omega = \omega a \sqrt{\rho/E}.
 \tag{25}$$

şekindedir.  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{M}$  matrisleri ve  $\mathbf{Z}$  sütun vektörleri

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} [K_{u_1 u_1}] & [K_{u_1 u_2}] & [K_{u_1 u_3}] & [K_{u_1 \theta}] \\ [K_{u_1 u_2}]^T & [K_{u_2 u_2}] & [K_{u_2 u_3}] & [K_{u_2 \theta}] \\ [K_{u_1 u_3}]^T & [K_{u_2 u_3}]^T & [K_{u_3 u_3}] & [K_{u_3 \theta}] \\ [K_{u_1 \theta}]^T & [K_{u_2 \theta}]^T & [K_{u_3 \theta}]^T & [K_{\theta \theta}] \end{pmatrix},
 \tag{26}$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} [M_{u_1 u_1}] & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [M_{u_2 u_2}] & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & [M_{u_3 u_3}] & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & [M_{\theta \theta}] \end{pmatrix},
 \tag{27}$$

$$\mathbf{Z} = \{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \hat{\mathbf{A}}\},
 \tag{28}$$

şekindedir. (28) da bulunan her bir alt sütun vektörleri örneğin  $\mathbf{A}$ ,

$$\mathbf{A} = \{A_{111}, \dots, A_{11N}, \dots, A_{1k1}, \dots, A_{1kN}, \dots, A_{111}, \dots, A_{1JK}\}
 \tag{29}$$

gibidir.  $\mathbf{K}$  ve  $\mathbf{M}$  matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Her iki matrisin köşegenlerindeki  $3 \times 3$  lük sol üst bloklar klasik durumdan gelmektedir.

$$\begin{aligned}
 [K_{u_1 u_1}] &= (\lambda + 2\mu) D_{u_1 i u_1 \underline{i}}^{1,1} G_{u_1 j u_1 \underline{j}}^{0,0} H_{kk}^{0,0} \\
 &+ (\mu) \alpha_1^2 \left( D_{u_1 i u_1 \underline{i}}^{0,0} G_{u_1 j u_1 \underline{j}}^{1,1} H_{kk}^{0,0} + \frac{1}{\alpha_2^2} D_{u_1 i u_1 \underline{i}}^{0,0} G_{u_1 j u_1 \underline{j}}^{0,0} H_{kk}^{1,1} \right), \\
 [K_{u_2 u_2}] &= \alpha_1^2 \left( (\lambda + 2\mu) D_{u_2 l u_2 \underline{l}}^{0,0} G_{u_2 m u_2 \underline{m}}^{1,1} H_{nn}^{0,0} \right. \\
 &+ (\mu) \frac{1}{\alpha_2^2} D_{u_2 l u_2 \underline{l}}^{0,0} G_{u_2 m u_2 \underline{m}}^{0,0} H_{nn}^{1,1} \left. \right) + (\mu) D_{u_2 l u_2 \underline{l}}^{1,1} G_{u_2 m u_2 \underline{m}}^{0,0} H_{nn}^{0,0}, \\
 [K_{u_1 u_2}] &= \alpha_1 \left( \lambda D_{u_1 i u_2 \underline{i}}^{1,0} G_{u_1 j u_2 \underline{j}}^{0,1} H_{kn}^{0,0} + \mu D_{u_1 i u_2 \underline{i}}^{0,1} G_{u_1 j u_2 \underline{j}}^{1,0} H_{kn}^{0,0} \right), \\
 [K_{u_3 u_3}] &= \alpha_1^2 \left( \frac{1}{\alpha_2^2} (\lambda + 2\mu) D_{u_3 p u_3 \underline{p}}^{0,0} G_{u_3 q u_3 \underline{q}}^{0,0} H_{rr}^{1,1} \right. \\
 &+ (\mu) D_{u_3 p u_3 \underline{p}}^{0,0} G_{u_3 q u_3 \underline{q}}^{1,1} H_{rr}^{0,0} \left. \right) + (\mu) D_{u_3 p u_3 \underline{p}}^{1,1} G_{u_3 q u_3 \underline{q}}^{0,0} H_{rr}^{0,0}, \\
 [K_{u_1 u_3}] &= \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left( \lambda D_{u_1 i u_3 \underline{i}}^{1,0} G_{u_1 j u_3 \underline{j}}^{0,0} H_{kr}^{0,1} + \mu D_{u_1 i u_3 \underline{i}}^{0,1} G_{u_1 j u_3 \underline{j}}^{0,0} H_{kr}^{1,0} \right), \\
 [K_{u_2 u_3}] &= \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2} \left( \lambda D_{u_2 l u_3 \underline{l}}^{0,0} G_{u_2 m u_3 \underline{m}}^{1,0} H_{nr}^{0,1} + \mu D_{u_2 l u_3 \underline{l}}^{0,0} G_{u_2 m u_3 \underline{m}}^{0,1} H_{nr}^{1,0} \right), \\
 [M_{u_1 u_1}] &= \frac{1}{4} D_{u_1 i u_1 \underline{i}}^{0,0} G_{u_1 j u_1 \underline{j}}^{0,0} H_{kk}^{0,0}, \\
 [M_{u_2 u_2}] &= \frac{1}{4} D_{u_2 l u_2 \underline{l}}^{0,0} G_{u_2 m u_2 \underline{m}}^{0,0} H_{nn}^{0,0}, \\
 [M_{u_3 u_3}] &= \frac{1}{4} D_{u_3 p u_3 \underline{p}}^{0,0} G_{u_3 q u_3 \underline{q}}^{0,0} H_{rr}^{0,0}
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Her iki matrisin köşegenlerindeki  $1 \times 1$  lik sağ alt bloklar, mikrogenleşmeden gelir.

$$[K_{\theta\theta}] = a_0 \left( D_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{i}}^{1,1} G_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0} + \alpha_1^2 D_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{j}}^{1,1} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0} + \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} D_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{1,1} \right) + \frac{a^2}{4} \lambda_1 D_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0}, \quad (35)$$

$$[M_{\theta\theta}] = \frac{3}{4} j D_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{\hat{\theta}\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0} \quad (31)$$

Son olarak, köşegen olmayan bloklar, aralarındaki bağlantıdan gelir.

$$\begin{aligned} [K_{u_1,\theta}] &= \frac{a}{2} \lambda_0 D_{u_1\hat{\theta}\hat{i}}^{1,0} G_{u_1\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0}, \\ [K_{u_2,\theta}] &= \frac{a}{2} \lambda_0 \alpha_1 D_{u_2\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{u_2\hat{\theta}\hat{j}}^{1,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{0,0}, \\ [K_{u_3,\theta}] &= \frac{a}{2} \lambda_0 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} D_{u_3\hat{\theta}\hat{i}}^{0,0} G_{u_3\hat{\theta}\hat{j}}^{0,0} H_{\hat{k}\hat{k}}^{1,0} \end{aligned} \quad (32)$$

Burada,

$$\begin{aligned} D_{\beta_1\tau_1\beta_2\tau_2}^{s,\bar{s}} &= \int_{-1}^1 \left\{ \frac{d^s (f_{\beta_1}^1(\xi) P_{\tau_1}(\xi))}{d\xi^s} \frac{d^{\bar{s}} (f_{\beta_2}^1(\xi) P_{\tau_2}(\xi))}{d\xi^{\bar{s}}} \right\} d\xi, \\ H_{\tau_1\tau_2}^{s,\bar{s}} &= \int_{-1}^1 \left\{ \frac{d^s P_{\tau_1}(\xi)}{d\xi^s} \frac{d^{\bar{s}} P_{\tau_2}(\xi)}{d\xi^{\bar{s}}} \right\} d\xi, \\ G_{\beta_1\tau_1\beta_2\tau_2}^{s,\bar{s}} &= \int_{-1}^1 \left\{ \frac{d^s (f_{\beta_1}^2(\eta) P_{\tau_1}(\eta))}{d\eta^s} \frac{d^{\bar{s}} (f_{\beta_2}^2(\eta) P_{\tau_2}(\eta))}{d\eta^{\bar{s}}} \right\} d\eta, \end{aligned} \quad (33)$$

$(0 \leq s, \bar{s} \leq 1 \quad \beta_1, \beta_2 = u_1, u_2, u_3, \theta,$   
 $\tau_1, \tau_2 = i, j, k, l, m, n, p, q, r, \underline{i}, \underline{j}, \underline{k}, \underline{l}, \underline{m}, \underline{n},$   
 $\underline{p}, \underline{q}, \underline{r}, \hat{i}, \hat{j}, \hat{k}, \hat{l}, \hat{m}, \hat{n}, \hat{p}, \hat{q}, \hat{r}).$

(33) denklemindeki boyutsuz birim uyum katsayıları

$$l_\beta = \begin{cases} 1 + \beta, & \beta \in [-1, -1 + l] \\ l, & \beta \in [-1 + l, 1 - l] \\ 1 - \beta, & \beta \in [1 - l, 1] \end{cases}, \quad \beta = \xi, \eta, \zeta \quad (34)$$

şeklinde verilir. (16) ve (20) yardımıyla  $(x, y, z)$  yönlerindeki birim uyum katsayıları otomatik tanımlanır:

$$l_x = \frac{a}{2} l_\xi, \quad l_y = \frac{b}{2} l_\eta, \quad l_z = \frac{h}{2} l_\zeta.$$

(24) nin çözümü frekans,  $\Omega$ , ve elde edilen frekansa karşılık gelen mod şekillerini verir. Deney sonuçlarıyla karşılaştırebilmek için, doğal frekans  $f = \Omega / 2\pi$  ile ifade edilir.

### 3. Bulgular

Kesirli türev tarafından modellenen CCCC sınır koşuluna sahip mikrohasarlı plağın sayısal frekansları ve karşılık gelen mod şekilleri verilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Low vd. 1998). Mevcut yöntem, çok inceden çok kalın durumlara kadar değişen tüm durumlar için sayısal hesaplamada oldukça iyi kararlılığa sahiptir. Terim sayısı sadece çok ince plakalar için rol oynayabilir. Burada serinin terim sayısı  $8 \times 8 \times 4$  olarak alınmıştır ve malzeme özellikleri Çizelge 1 de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Plağın material özellikleri (Low et al. 1998).

Young Modülü ( $E$ )	72 GPa	Poisson oranı ( $\nu$ )	0.3
Yoğunluk ( $\rho$ )	2644.76 kg / m <sup>3</sup>	Mikro atalet ( $j$ )	$1.96 \times 10^{-7} m^2$
Boyutlar ( $a \times b \times h$ )	$0.6 \times 0.3 \times 0.002 m^3$		
Sınır koşulları	CCCC (C: Ankastre)		
Mikro Sabitler ( $\alpha_0, \lambda_0, \lambda_1$ )	$(8 \times 10^{-8}, 8 \times 10^{-8}, 1.5 \times 10^{-6})$ (GN)		

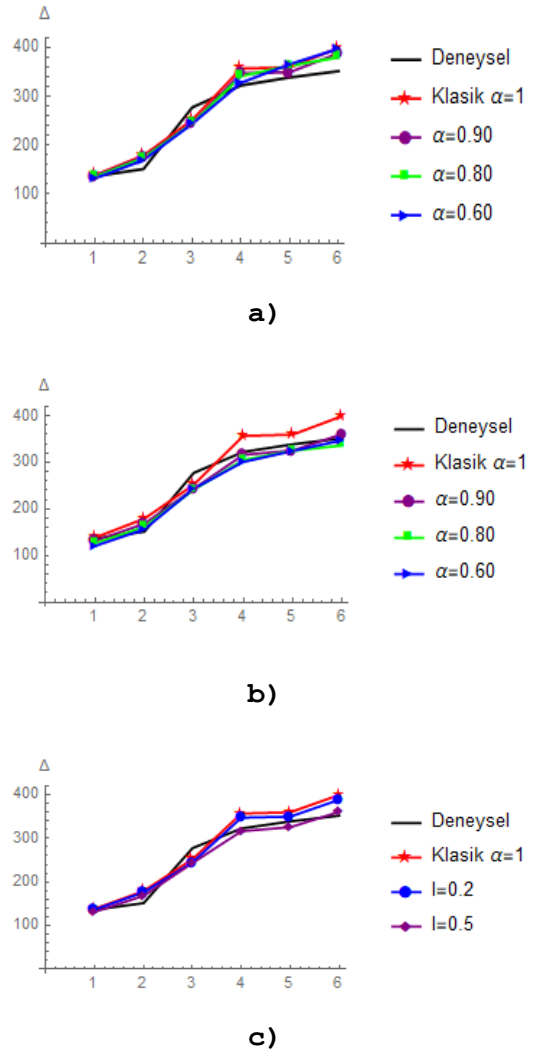
### 3.1. Frekans Analizi Ve Deney Sonuçları İle Karşılaştırma

Bu çalışmada CCCC sınır koşuluna sahip mikrogenleşen plağın frekans analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada klasik frekanslara ek olarak mikrogenleşme frekansları da elde edilmiştir. Elde edilen frekans spektrumları farklı kesirli türev mertebeleri ( $\alpha$ ) ve birim uyum katsayıları ( $l$ ) ile incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 2 de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı  $l$  ve  $\alpha$  parametreleri için mikro ve makro frekanslar.

$l$	$\alpha$	Klasik ve Deneysel frekanslar normal, Mikro frekanslar ise koyu yazılarak verilmiştir.
0.01	0.6	138.403, <b>156.309</b> , 179.091, <b>245.266</b> , 251.98, 356.566, 359.528, 399.326
	0.8	138.414, <b>156.309</b> , 179.11, <b>245.267</b> , 252.033, 356.708, 359.586, 399.392
	0.9	138.42, <b>156.309</b> , 179.121, <b>245.268</b> , 252.063, 356.789, 359.619, 399.429
	0.99	138.425, <b>156.309</b> , 179.131, <b>245.269</b> , 252.093, 356.869, 359.651, 399.466
0.2	0.6	132.04, <b>156.309</b> , 169.52, <b>232.526</b> , 244.04, 328.011, 366.013, 397.568
	0.8	134.899, <b>156.309</b> , 173.896, <b>238.368</b> , 244.609, 341.441, 362.86, 379.892
	0.9	136.586, <b>156.309</b> , 176.143, <b>243.94</b> , 244.926, 347.197, 349.601, 388.437
	0.99	138.234, <b>156.309</b> , 178.777, <b>245.233</b> , 251.127, 354.583, 358.551, 398.233
0.5	0.6	120.453, <b>155.093</b> , 156.309, <b>237.662</b> , 243.235, 300.943, 324.484, 347.262
	0.8	126.015, <b>156.309</b> , 161.44, <b>227.444</b> , 241.339, 305.119, 325.028, 336.168
	0.9	131.368, <b>156.309</b> , 168.20, <b>228.886</b> , 243.272, 316.232, 325.33, 360.727
	0.99	137.65, <b>156.309</b> , 177.772, <b>245.067</b> , 248.71, 349.676, 355.473, 394.848
0	1	138.426, <b>156.309</b> , 179.133, <b>245.269</b> , 252.097, 356.878, 359.655, 399.471
(Klasik)		
Deneysel		136.30, 151.30, 277.50, 322.50, 338.80, 351.80, 411.30, 473.80

Çizelge 2 den rahatlıkla görülebileceği üzere kesirli türev mertebesi ve birim uyum katsayısının belirli değerleri için elde edilen frekanslar klasik duruma göre deney sonuçlarına daha yakındır. Bu durum, kesirli mekanik ile nonlokal modellemenin gerçeğe daha uygun olduğunu göstermektedir. Farklı ( $\alpha$ ) ve ( $l$ ) parametreleri için elde edilen makro frekanslar ile klasik teoriden elde edilen frekanslar ve deney sonuçları Şekil 1 de verilmiştir.



**Şekil 1.** Plâğın makro frekansları:  $l = 0.2$  (a) ,  $l = 0.5$  (b) ve  $\alpha = 0.9$  (c) .

Çizelge 2 ve Şekil 1 den  $\alpha = 0.9$  ve  $l = 0.2$  alınarak elde edilen frekansların, klasik frekanslara göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.2. Mod Şekilleri Analizi

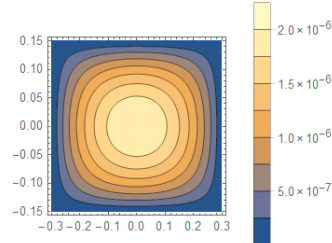
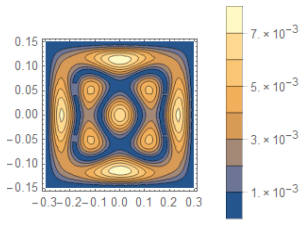
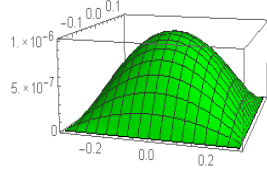
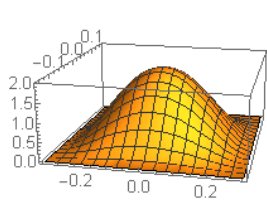
Özdeğerlerin yanı sıra mod şekillerinin analizi de çok önemlidir. Çizelge 3' te sırasıyla  $\alpha = 0.9$  ve  $l = 0.2$  için CCCC plâğının ilk iki makro ve mikro mod şekilleri sunulmaktadır. Ayrıca, klasik ve kesirli modlar arasındaki mutlak farklar kontur grafikleri kullanılarak verilmiştir.



**Çizelge 3.**  $\alpha = 0.9$  ve  $l = 0.2$  için ilk iki makro ve mikro frekansa karşı gelen mod şekilleri ve kesirli ve klasik  $z$ -yer değiştirmeleri arasındaki mutlak farklar.

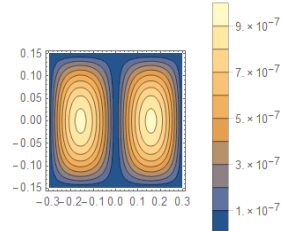
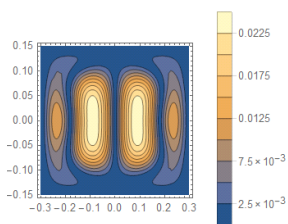
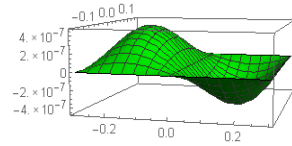
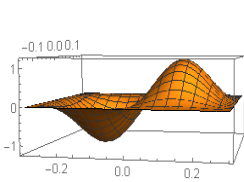
**1. Makro Frekans** (138.426)

**1. Mikro Frekans** (156.308)



**2. Makro Frekans** (176.142)

**2. Mikro Frekans** (243.939)



#### 4. Tartışma ve Sonuç

Mikrogenleşme teorisi ile modellenen mikro hasarlı dört ucu ankastre bağlı dikdörtgen plakların nonlokal titreşim analizi kesirli mekanik kullanılarak hesaplanmıştır. Frekans spektrumu ve mod şekilleri üzerine nonlokalitenin etkisi kesirli türev mertebesinde ( $\alpha$ ) ve birim uyum katsayısının ( $l$ ) farklı değerleri için incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Klasik teoriden elde edilen sonuçlara göre, kesirli mekanik yardımıyla uygulanan nonlokal teori ile elde edilen sonuçlar kesirli malzeme sabitlerinin belirli değerleri için deneysel sonuçlara çok daha yakındır. Bu durum, nonlokal titreşim analizi için kesirli mekanik yaklaşımının yeni ve iyi bir model oluşturabileceğini göstermektedir.
- Kesirli türevin tanımı gereği, nonlokal etkiler nonlokal çekirdekler kullanılmadan hesaplara kolayca yansıtılabilmektedir.
- Beklenileceği üzere, kesirli türevin mertebesinde klasik türeve ve birim uyum katsayısının sıfıra yaklaştığı limit durumunda elde edilen sonuçların klasik teoriden elde edilen sonuçlarla örtüştüğü gözlenmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- Aydınlik, S., and Kırış, A., 2020. Fractional Calculus Approach to Nonlocal Three-Dimensional Vibration Analysis of Plates. *AIAA Journal*, **58**, 355–361.
- Aydınlik, S., Kırış, A. and Sumelka, W., 2021a. Nonlocal vibration analysis of microstretch plates in the framework of space-fractional mechanics—theory and validation. *The European Physical Journal Plus*, **136**, 169.
- Aydınlik, S., Kırış, A. and Sumelka, W., 2021b. Three-dimensional analysis of nonlocal plate vibration in the framework of space-fractional mechanics — Theory and validation. *Thin-Walled Structures*, **163**, 107645.
- Cosserat, E. and Cosserat F., 1896. Sur la théorie de l'élasticité, *Ann. Toulouse*, **10**, 1-116.
- Cottone, G., Di Paola, M. and Zingales, M., 2009. Elastic waves propagation in 1D fractional non-local continuum. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, **42(2)**, 95-103.
- Eringen, A.C., 1968. Theory of micropolar elasticity, New York, Fracture, an advanced treatise (Ed. Leibowitz H.): Academic Press.
- Eringen, A.C., 1983. On differential equations of nonlocal elasticity and solutions of screw dislocation and

- surface waves. *Journal of Applied Physics*, **54(9)**, 4703-4710.
- Eringen, A.C., 1984. Plane waves in nonlocal micropolar elasticity. *International Journal of Engineering Science*, **22**, 1113-1121.
- Eringen, A.C., 1990. Theory of thermo-microstretch elastic solids. *International Journal of Engineering Science*, **28**, 1291-1301.
- Eringen, A.C. and Edelen, D.G.B., 1972. Nonlocal elasticity. *International Journal of Engineering Science*, **10(3)**, 233–248.
- Khurana, A. and Tomar S.K., 2017. Rayleigh-type waves in nonlocal micropolar solid half-space. *Ultrasonics*, **73**, 162-168.
- Low, K.H., Chai, G.B., Lim, T.M. and Sue, S.C., 1998. Comparisons of experimental and theoretical frequencies for rectangular plates with various boundary conditions and added masses. *International Journal of Mechanical Sciences*, **40**, 1119-1131.
- Mindlin, R.D., 1964. Micro-structure in linear elasticity. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, **16**, 51–78.
- Mindlin, R.D., 1965. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. *International Journal of Solids and Structures*, **1(4)**, 417-438.
- Mindlin, R.D. and Eshel, N.N., 1968. On first strain-gradient theories in linear elasticity. *International Journal of Engineering Science*, **4(1)**, 109–124.
- Odibat, Z., 2006. Approximations of fractional integrals and Caputo fractional derivatives, *Applied Mathematics and Computation*, **178**, 6527–6533.
- Sumelka, W., 2015. Non-local Kirchhoff–Love plates in terms of fractional calculus. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **15**, 231-242.
- Zhou, D., Cheung, Y.K., Aub, F.T.K. and Lo, S.H. 2002. Three-dimensional vibration analysis of thick rectangular plates using Chebyshev polynomial and Ritz method. *International Journal of Solids and Structures*, **39**, 6339–6353.

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 051302 (998-1004)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 051302 (998-1004)

DOI: 10.35414/akufemubid.1124445

Araştırma Makalesi / Research Article

## Kesirli Mertebeden Pseudo Hiperbolik Diferansiyel Denklemlerin Sonlu Fark Metodu ile Nümerik Çözümleri

Fatih ÖZBAĞ<sup>1</sup>, Mahmut MODANLI<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Şanlıurfa.Sorumlu yazar e-posta: fozbag@harran.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5456-4261>e-posta: mmodanli@harran.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7743-3512>

Geliş Tarihi: 01.06.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Kesirli Mertebeden  
Pseudo Hiperbolik  
Denklemler; Sonlu Fark  
Metodu; Nümerik  
Çözüm; Kararlılık.

Kesirli mertebeden diferansiyel denklemler mühendislik, fizik ve biyoloji gibi alanlarda matematiksel problemlerin modellenmesinde önemli yer almaktadır. Bu makalede kesirli mertebeden pseudo hiperbolik diferansiyel denklemler için bir başlangıç sınır değer probleminin sonlu fark metodu ile yaklaşık çözümleri araştırılmıştır. İlk olarak başlangıç sınır değer problemi için birinci mertebeden sonlu fark şeması oluşturulmuştur. Daha sonra bu sonlu fark şeması için kararlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen teorik sonuçları desteklemek için örnek bir problemin farklı kesirli mertebeden türevlerinde gerçek ve yaklaşık çözümler için hata değerleri hesaplanmıştır. Uygulanan çözüm metodunun etkinliğini göstermek için bazı nümerik simülasyonlar verilmiştir.

## Numerical Solutions of Fractional Order Pseudo Hyperbolic Differential Equations by Finite Difference Method

#### Keywords

Fractional Order  
Pseudo Hyperbolic  
Equation; Finite  
Difference Method;  
Numerical Solutions;  
Stability.

### Abstract

Fractional differential equations are useful for modelling mathematical issues in fields including engineering, physics, and biology. In this article, approximate solutions of an initial boundary value problem for fractional pseudo hyperbolic differential equations are investigated using the finite difference method. First, a first-order finite difference scheme is created for the initial boundary value problem. Then, stability analysis was performed for this finite difference scheme. In order to support the theoretical results obtained, error values were calculated for precise and approximate solutions in different fractional order derivatives of a sample problem. Some numerical simulations are also given to show the effectiveness of the applied solution method.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

### 1. Giriş

Kesirli mertebeden kısmi diferansiyel denklemler klasik kısmi diferansiyel denklemlerin genellemeleridir. Tamsayı olmayan integral ve diferansiyel operatörlerin bilimi ve uygulamaları kesirli hesap olarak bilinir. Kesirli mertebeden diferansiyel denklemler mühendislik, fizik ve biyoloji gibi alanlarda matematiksel problemlerin modellenmesinde önemli yer almaktadır (Hilfer 2000, Ghanbari 2021, Kilbas *et al.* 2006, Poldlubny 1998, Ozbag and Modanli 2021). Literatürde kesirli mertebeli türevler için birçok tanım vardır. En yaygın olarak kullanılan kesirli türevler, Riemann-Liouville,

Caputo, Atangana–Baleanu ve Grünwald-Letnikov'dur.

Pseudo hiperbolik denklemler, zaman ve uzay değişkenlerine göre karışık kısmi türev içeren hiperbolik kısmi diferansiyel denklemlerdir. Bu tür denklemlerin tam ve yaklaşık sayısal çözümlerini elde etmek için çeşitli yöntemler vardır. Zhang *et al.* (2012) ve Liu *et al.* (2011) çalışmalarında H1-Galerkin karışık sonlu eleman yöntemine dayalı sayısal şemalar pseudo hiperbolik denklemler için oluşturulmuştur. Yeni bir yaklaşım çeşidi olarak rezidü güç serisi metodu (RPSM) pseudo hiperbolik

kısmi diferansiyel denklemlere uygulanmıştır (Modanlı *et al.* 2021). Potapova (2012)'de regülasyon metodu ve parametrelerin sürekliliği metodu kullanılarak pseudo hiperbolik denklemler için sınır değer probleminin düzenli çözülebilirliği ispatlanmıştır. Literatürde bu denklemleri hem analitik hem de sayısal olarak çözmek için çalışılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Fedotov *et al.* 2016, Chen and Yang 1993, Zhao and Li 2019, Krutitskii 1997).

Modanlı *et al.* (2022) çalışmasında zamana göre birinci mertebeden türevde Caputo kesirli türevi alınarak ( $0 < \alpha \leq 1$ ) pseudo parabolik diferansiyel denklemlerin çözümleri için modifiye çift Laplace ve açık sonlu fark metotları uygulanmıştır. Abdulazeez ve Modanlı (2022) çalışmasında yine birinci mertebeden türevde Caputo kesirli türevi alınarak ( $0 < \alpha \leq 1$ ) pseudo hiperbolik telegraf kısmi diferansiyel denklemi için sonlu fark metodu uygulanmıştır. Çiçek ve Modanlı (2022) çalışmasında pseudo hiperbolik diferansiyel denkleminin homotopi pertürbasyon yöntemi ile yaklaşık çözümleri bulunmuştur. Bu makalede ise zamana göre ikinci mertebeden türevde Caputo kesirli türevi alınarak ( $1 < \alpha \leq 2$ ) pseudo hiperbolik diferansiyel denklemler için çözüm araştırılmıştır.

Bu çalışmada  $1 < \alpha \leq 2$  için aşağıda verilen

$$\begin{cases} \frac{\partial^\alpha v(t,x)}{\partial t^\alpha} = \frac{\partial^3 v(t,x)}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} + \Psi(t,x), \\ 0 < x < L, 0 < t < T, 1 < \alpha \leq 2, \\ v(0,x) = u_0(x), \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} = u_1(x), \\ v(t,0) = v(t,L) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

kesirli mertebeden hiperbolik kısmi diferansiyel denklem için bir başlangıç sınır değer probleminin yaklaşık çözümleri araştırılmıştır. Burada  $u_0(x), u_1(x), \Psi(t,x)$  bilinen fonksiyonlar ve  $v(t,x)$  bilinmeyen fonksiyondur. Ayrıca ele alınan kesirli türev Caputo kesirli türevidir ve tanımı aşağıdaki gibidir:  $n - 1 < \alpha \leq n$  için  $\alpha$  ncı dereceden zamana göre Caputo kesirli türevi

$$D_t^\alpha v(t,x) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{\partial^n}{\partial t^n} \int_0^t \frac{1}{(t-s)^{\alpha-n+1}} v(s,x) ds, \quad (2)$$

olarak tanımlanır.

Diğer taraftan, Caputo kesirli türevin en önemli avantajlarından biri, problemin formülasyonunda geleneksel başlangıç ve sınır koşullarının dahil edilmesine izin vermesidir. Dolayısıyla gerçek dünya problemlerini modellerken, Caputo türevi kullanılacak en iyi kesirli operatörlerden biridir (Qureshi and Yusuf 2019, Almeida *et al.* 2019, Baleanu *et al.* 2020).

Bu tür denklemlerin analitik çözümünü bulmak genellikle zordur, bu nedenle nümerik hesaplamalara dayalı yaklaşık çözüm gereklidir. Literatürde bu denklemin sayısal çözümü için sonlu farklar tekniği uygulanmamıştır. Bu makalede sonlu fark metodu ile yaklaşık çözümler araştırılmıştır. Bu yöntem, kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasında kullanılan en doğrudan yaklaşımdır. Sonlu fark yöntemi tipik olarak normal bir ızgara aralıkları üzerinde tanımlanır ve bu da hata payı çok daha küçük ve etkili çözüm yöntemleri için kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntem, boyut başına boyut olarak tanımlanır; Bu, daha yüksek mertebeden doğruluk elde etmek için element mertebesini arttırmayı kolaylaştırır.

İlk olarak başlangıç sınır değer problemi için birinci mertebeden sonlu fark şeması oluşturulmuştur. Daha sonra bu sonlu fark şeması için kararlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen teorik sonuçları desteklemek için örnek bir problemin farklı kesirli mertebeden türevlerinde gerçek ve yaklaşık çözümler için hata değerleri hesaplanmıştır. Uygulanan çözüm metodunun etkinliğini göstermek için bazı nümerik simülasyonlar verilmiştir. Hata analizi sonucunda grid noktaları arttıkça maksimum norm hatalarının azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Buradan kurulan şemanın doğru ve etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Sonlu Fark Metodunun Kararlılığı

İlk olarak  $x$  ve  $t$  eksenleri için düzgün aralıklar sırasıyla  $h = \frac{L}{M}$  ve  $\tau = \frac{T}{N}$  olacak şekilde tanımlansın. Bu durumda  $x_n = nh$ ,  $n = 0,1,2, \dots, M$  ve  $t_k = k\tau$ ,  $k = 0,1,2, \dots, N$  elde edilir.  $1 < \alpha \leq 2$  için (2) denkleminin sonlu fark şeması

$$D_{\tau}^{\alpha} v_k \cong \frac{\tau^{-\alpha}}{\Gamma(3-\alpha)} \sum_{j=0}^{k-1} ((j+1)^{2-\alpha} - j^{2-\alpha})(v_n^{k-j+1} - 2v_n^{k-j} + v_n^{k-j-1}) \quad (3)$$

şeklindedir. Denklemleri daha sade yazabilmek için  $p_{\alpha,\tau} = \frac{\tau^{-\alpha}}{\Gamma(3-\alpha)}$  ve  $b_j^{\alpha} = ((j+1)^{2-\alpha} - j^{2-\alpha})$  şeklinde alınacaktır. (1) problemi için birinci mertebeden fark şeması (3) denklemi ve sonlu fark metodu kullanılarak

$$\begin{cases} p_{\alpha,\tau} \sum_{j=0}^{k-1} b_j^{\alpha} (v_n^{k-j+1} - 2v_n^{k-j} + v_n^{k-j-1}) - \frac{1}{\tau} \left( \frac{v_{n-1}^k - 2v_n^{k+1} + v_{n+1}^k}{h^2} - \frac{v_{n-1}^{k-1} - 2v_n^k + v_{n+1}^{k-1}}{h^2} \right) - \frac{v_{n+1}^k - 2v_n^k + v_{n-1}^k}{h^2} = \Psi_n^k, \\ v_n^0 = u_0(x_n), \frac{v_n^1 - v_n^0}{\tau} = u_1(x_n), 0 \leq n \leq M, \\ v_0^k = v_M^k = 0, 0 \leq k \leq N \end{cases} \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. Daha sonra (4) denklemi düzenlenerek

$$\begin{cases} p_{\alpha,\tau} \sum_{j=1}^{k-1} b_j^{\alpha} (v_n^{k-j+1} - 2v_n^{k-j} + v_n^{k-j-1}) + \frac{1}{\tau h^2} v_{n+1}^{k-1} + \left( -\frac{1}{\tau h^2} - \frac{1}{h^2} \right) v_{n+1}^k + \frac{1}{\tau h^2} v_{n-1}^{k-1} + \left( -\frac{1}{\tau h^2} - \frac{1}{h^2} \right) v_{n-1}^k + \left( \frac{2}{\tau h^2} + p_{\alpha,\tau} \right) v_n^{k+1} + p_{\alpha,\tau} v_n^{k-1} + \left( -\frac{2}{\tau h^2} + \frac{2}{h^2} - 2p_{\alpha,\tau} \right) v_n^k = \Psi_n^k, \\ v_n^0 = u_0(x_n), \frac{v_n^1 - v_n^0}{\tau} = u_1(x_n), 0 \leq n \leq M, \\ v_0^k = v_M^k = 0, 0 \leq k \leq N \end{cases} \quad (5)$$

biçiminde yazılabilir.

Başlangıç koşullarını kullanarak (5) fark şeması matris formunda yazılırsa

$$\begin{cases} v^1 = v^0 + k\tau, \\ Av^{k+1} = Bv^k + Cv^{k-1} - p_{\alpha,\tau} \sum_{j=1}^{k-1} b_j^{\alpha} (v_n^{k-j+1} - 2v_n^{k-j} + v_n^{k-j-1}) + \Psi_n^k, \\ v_n^0 = u_0(x_n), \frac{v_n^1 - v_n^0}{\tau} = u_1(x_n), 0 \leq n \leq M, \\ v_0^k = v_M^k = 0, 0 \leq k \leq N \end{cases} \quad (6)$$

elde edilir. Burada  $\Psi_n^k = (\Psi_0^k, \Psi_1^k, \dots, \Psi_M^k)^T$ ,  $\Psi_n^0 = u_0(x_n)$ ,  $\Psi_n^k = \Psi(t_k, x_n)$ ,  $1 \leq n \leq M$ ,  $1 \leq k \leq N$  ve  $v^k = (v_0^k, v_1^k, \dots, v_M^k)^T$  dir. Ayrıca,  $A$  bir köşegensel matris,  $B$  ve  $C$  simetrik matrislerdir. Başlangıç ve sınır koşulları dahil edilmediğinden dolayı  $A, B, C$  matrislerinin boyutu  $(N-1) \times (N-1)$  dir ve aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & a & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & a \end{bmatrix}, a = \frac{2}{\tau h^2} + p_{\alpha,\tau}$$

$$B = \begin{bmatrix} b & d & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d & b & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & b & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & b & d & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & d & b & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d & b \end{bmatrix},$$

$$b = -\frac{2}{\tau h^2} + \frac{2}{h^2} - 2p_{\alpha,\tau}, d = -\frac{1}{\tau h^2} - \frac{1}{h^2}.$$

$$C = \begin{bmatrix} c & e & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ e & c & e & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e & c & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & c & e & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & e & c & e \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & e & c \end{bmatrix}, c = p_{\alpha,\tau}, e = \frac{1}{\tau h^2}.$$

$A$  matrisinin normu  $\|A\| = \|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq k \leq N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |a_{ki}|$  ve  $A = [a_{ki}]_{(N-1) \times (N-1)}$  şeklindedir. (6) fark şeması formülü için aşağıdaki kararlılık teoremini verelim.

**Teorem 1.** Fark şeması formülü (6) denklemi kararlıdır.

**İspat.** (4) denkleminde  $v_n^k = r^k e^{in\theta}$  Von-Neumann analiz metodu kullanılırsa

$$p_{\alpha,\tau} \sum_{j=0}^{k-1} b_j^{\alpha} (r^{k-j+1} - 2r^{k-j} + r^{k-j-1}) e^{in\theta} = \frac{1}{\tau h^2} (r^k e^{i(n-1)\theta} - 2r^{k+1} e^{in\theta} + r^k e^{i(n+1)\theta} - r^{k-1} e^{i(n-1)\theta} + 2r^k e^{in\theta} - r^{k-1} e^{i(n+1)\theta}) + \frac{r^k}{h^2} (e^{i(n+1)\theta} - 2e^{in\theta} + e^{i(n-1)\theta}) + \Psi_n^k$$

elde edilir.  $n = 0, k = 1$  alınır

$$\frac{1}{\tau h^2} (r e^{-i\theta} - 2r^2 + r e^{i\theta} - e^{-i\theta} + 2r - e^{i\theta}) + \frac{r}{h^2} (e^{i\theta} - 2 + e^{-i\theta}) = 0$$

olur. Burada  $\frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2} = \cos\theta$  olmak üzere

$$-\frac{2}{\tau h^2} r^2 + \left( \frac{2\cos\theta}{\tau h^2} + \frac{2}{\tau h^2} - \frac{2}{h^2} + \frac{2\cos\theta}{h^2} \right) r - \frac{2\cos\theta}{\tau h^2} = 0$$

kuadratik denklemi elde edilir. Gerekli düzenleme yapıldıktan sonra

$$\frac{-2}{\tau h^2} r^2 + \left( \frac{4\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\tau h^2} - \frac{4\sin^2 \frac{\theta}{2}}{h^2} \right) r - \frac{2\cos\theta}{\tau h^2} = 0$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemin kökleri arasında

$$\begin{aligned} r_1 + r_2 &= \frac{\frac{4\cos^2 \frac{\theta}{2}}{\tau h^2} - \frac{4\sin^2 \frac{\theta}{2}}{h^2}}{\frac{2}{\tau h^2}} \\ &= 2\cos^2 \frac{\theta}{2} - 2\tau \sin^2 \frac{\theta}{2} \leq 2\tau \cos^2 \frac{\theta}{2} - 2\tau \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ &= 2\tau \cos\theta \leq 2\tau = \frac{2}{N} \leq 1 \end{aligned}$$

ve

$$r_1 r_2 = \frac{-\frac{2\cos\theta}{\tau h^2}}{-\frac{2}{\tau h^2}} = \cos\theta \leq 1$$

olduğundan  $r_1 < 1$  ve  $r_2 < 1$  elde edilir. Dolayısıyla (6) fark şeması kararlıdır.

### 3. Bulgular

Bu bölümde Teorem 1.'in uygulamaları için sayısal sonuçlar sunulmuştur ve oluşturulan fark şemalarının çözümü sayısal bir örnekle desteklenmiştir. Bu nedenle, kesirli mertebeden pseudo hiperbolik denkleminin aşağıdaki başlangıç-sınır değer problemini sayısal bir örnek olarak ele alıyoruz:

$$\begin{cases} \frac{\partial^\alpha v(t,x)}{\partial t^\alpha} = \frac{\partial^3 v(t,x)}{\partial t \partial x^2} + \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} + \Psi(t,x), \\ \Psi(t,x) = \left( t^2 + 2t + 1 + \frac{2t^{2-\alpha}}{\Gamma(3-\alpha)} \right) \text{Sin}x, \\ 0 < x < 1, 0 < t < 1, 1 < \alpha \leq 2 \\ v(0,x) = \text{Sin}x, \quad \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} = 0, 0 \leq x \leq 1 \\ v(t,0) = v(t,1) = 0, 0 \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

(7) denkleminin tam çözümü  $v(t,x) = (t^2 + 1)\text{Sin}x$  olarak veriliyor.

(7) probleminin yaklaşık çözümünü hesaplamak için

(5) formülü kullanılarak fark şeması oluşturulur.

$$\begin{cases} p_{\alpha,\tau} \sum_{j=1}^{k-1} b_j^\alpha (v_n^{k-j+1} - 2v_n^{k-j} + v_n^{k-j-1}) + \\ \frac{1}{\tau h^2} v_{n+1}^{k-1} + \left( -\frac{1}{\tau h^2} - \frac{1}{h^2} \right) v_{n+1}^k + \frac{1}{\tau h^2} v_{n-1}^{k-1} + \\ \left( -\frac{1}{\tau h^2} - \frac{1}{h^2} \right) v_{n-1}^k + \left( \frac{2}{\tau h^2} + p_{\alpha,\tau} \right) v_n^{k+1} + \\ p_{\alpha,\tau} v_n^{k-1} + \left( -\frac{2}{\tau h^2} + \frac{2}{h^2} - 2p_{\alpha,\tau} \right) v_n^k = \Psi_n^k, \\ x_n = nh, t_k = k\tau, 1 \leq k \leq N-1, 1 \leq n \leq M-1 \\ v_n^0 = \text{Sin}x, \quad \frac{v_n^1 - v_n^0}{\tau} = 0, 0 \leq n \leq M, \\ v_0^k = v_M^k = 0, 0 \leq k \leq N \end{cases} \quad (8)$$

Daha sonra bu sistem matris formunda yazılırsa

$$Wv_{n+1} + Yv_n + Zv_{n-1} = I\Psi_n \quad (9)$$

elde edilir. Başlangıç ve sınır koşulları da eklendiğinde  $W, Y$  ve  $Z$   $(N+1) \times (N+1)$  boyutunda kare matrislerdir ve  $I$  ise birim matristir. (9) denklem sistemini çözmek için modifiye Gauss eliminasyon metodu kullanıldı.  $v(t,x)$  tam ve  $v(t_k, x_n)$  yaklaşık çözümler olmak üzere maksimum norm hata analizi

$$\varepsilon = \max_{1 \leq k \leq N-1, 1 \leq n \leq M-1} |v(t_k, x_n) - v(t, x)| \quad (10)$$

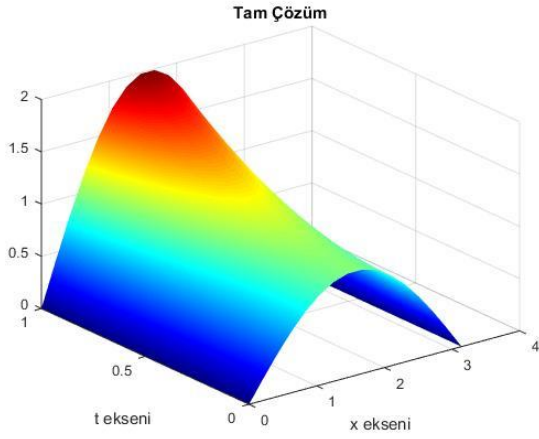
formülü ile hesaplanmıştır. Fark şeması (8) de  $\alpha$  nın farklı değerleri 1.1, 1.5, 1.9 için hata analiz tablosu Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Problem (7) için hata analizi.

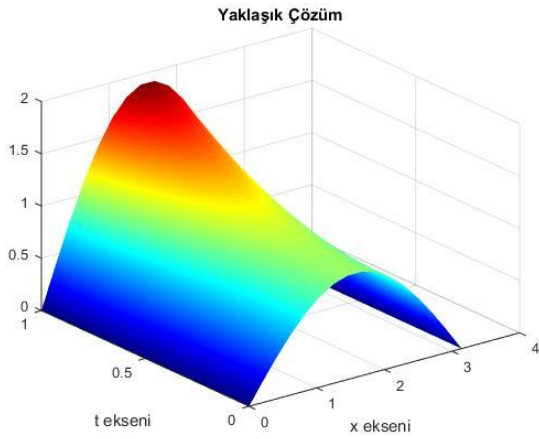
Fark şeması (8)					
N, M	N=25, M=5	N=150, M=10	N=400, M=15	N=1000, M=20	N=2500, M=25
$\alpha = 1.1$	0.1484	0.1004	0.0850	0.0611	0.0382
$\alpha = 1.5$	0.1415	0.0959	0.0810	0.0585	0.0368
$\alpha = 1.9$	0.1188	0.0859	0.0735	0.0535	0.0339

Hata analizi tablosundan oluşturulan fark şeması için yapılan sayısal hesaplamalarda hata payının 1'den küçük olduğu görülmektedir. Çizelge 1 oluşturulan fark şemasının doğruluğunu onaylamaktadır. Ayrıca her farklı  $\alpha$  değeri için tam ve yaklaşık çözümlerin birbirlerine ne kadar benzer olduklarını göstermek için nümerik simülasyonları verildi.

Örnek problem (7)'nin tam ve yaklaşık çözümleri  $\alpha = 1.1$  için Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.

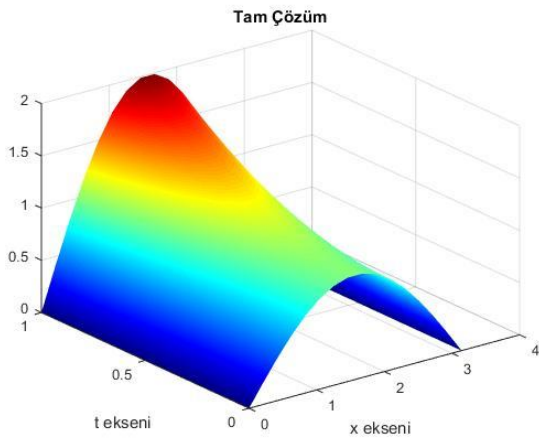


Şekil 1.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.1$  için problem (7)'nin tam çözümü.

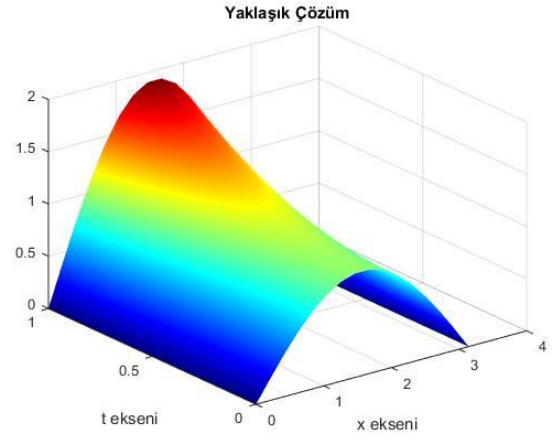


Şekil 2.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.1$  için problem (7)'nin yaklaşık çözümü.

$\alpha = 1.5$  ve aynı  $N$ ,  $M$  değerleri için problem (7)'nin tam ve yaklaşık çözümleri Şekil 3 ve 4'de verilmiştir.

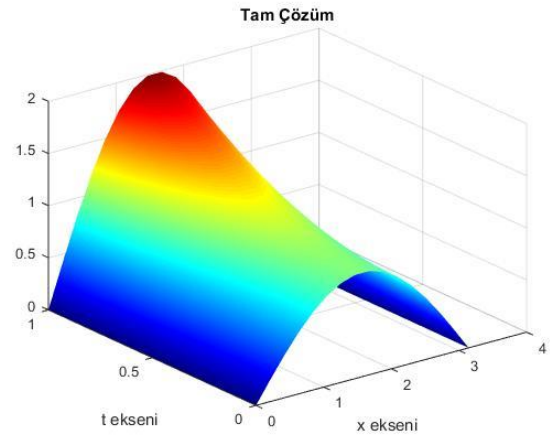


Şekil 3.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.5$  için problem (7)'nin tam çözümü.

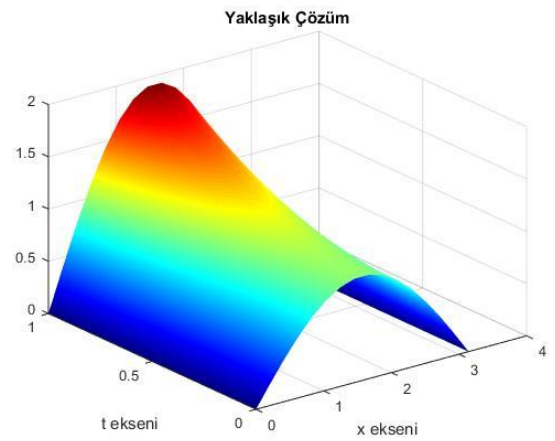


Şekil 4.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.5$  için problem (7)'nin yaklaşık çözümü.

Son olarak  $\alpha = 1.9$  için problem (7)'nin tam ve yaklaşık çözümleri Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



Şekil 5.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.9$  için problem (7)'nin tam çözümü.



Şekil 6.  $M=15$ ,  $N=400$  ve  $\alpha = 1.9$  için problem (7)'nin yaklaşık çözümü.

Şekil 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'dan görüldüğü üzere nümerik sonuçlar ile teorik sonuçların tutarlı olduğu ve

oluşturulan fark şemasının ele alınan problem için doğru ve etkili olduğu sonucuna varıyoruz.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmanın amacı, kesirli mertebeden pseudo hiperbolik diferansiyel denklemi için bir başlangıç-sınır değer probleminin tam çözümünün analitik olarak bulunamadığı durumlarda, bu problemi yüksek doğruluk oranında sayısal olarak çözebilecek bir metot ortaya koymaktır. Sonlu fark metodu ile oluşturulan fark şemasının kararlılık kestirimleri verildi. Bu kestirimlerle tutarlı farklı kesir değerleri için sayısal çözümler hesaplandı ve hata analiz tablosu ile bunlara karşılık gelen grafikler verildi. Matlab programı ile hesaplanan çıktılar, grid noktaları artarken maksimum norm hatasının azaldığını göstermektedir. Hata tablosu ve verilen şekillerden, çalışılan bu yöntemin ele alınan kesirli mertebeden pseudo hiperbolik diferansiyel denklem için iyi ve etkili bir yöntem olduğu açıkça görülmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- Abdulazeez, S. T. and Modanlı, M., 2022. Solutions of fractional order pseudo-hyperbolic telegraph partial differential equations using finite difference method. *Alexandria Engineering Journal*, **61(12)**, 12443-12451.
- Almeida, R., Brito da Cruz, A., Martins, N. and Monteiro, M. T. T., 2019. An epidemiological MSEIR model described by the Caputo fractional derivative. *International journal of dynamics and control*, **7(2)**, 776-784.
- Baleanu, D., Jajarmi, A., Mohammadi, H. and Rezapour, S., 2020. A new study on the mathematical modelling of human liver with Caputo–Fabrizio fractional derivative. *Chaos, Solitons & Fractals*, **134**, 109705.
- Chen, G. and Yang, Z., 1993. Initial value problem for a class of nonlinear pseudo-hyperbolic equations. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, **9(2)**, 166-173.
- Çiçek, H. ve Modanlı, M., 2022. Kesirli mertebeden pseudo hiperbolik kısmi diferansiyel denkleminin homotopi pertürbasyon yöntemiyle yaklaşık çözümü. *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, (Basım aşamasında).
- Fedotov, I., Shatalov, M. and Marais, J., 2016. Hyperbolic and pseudo-hyperbolic equations in the theory of vibration. *Acta Mechanica*, **227(11)**, 3315-3324.

- Ghanbari, B. 2021. A new model for investigating the transmission of infectious diseases in a prey-predator system using a nonsingular fractional derivative. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 1-20.
- Hilfer, R., 2000. Applications of Fractional Calculus in Physics, Rudolf Hilfer, World Scientific Publishing, 1-85.
- Kilbas, A. A., Srivastava, H. M. and Trujillo J. J., 2006. Theory and applications of fractional differential equation, 204, Jan van Mill, Elsevier, 1-463.
- Krutitskii, P. A., 1997. An initial-boundary value problem for the pseudo-hyperbolic equation of gravity-gyroscopic waves. *Journal of Mathematics of Kyoto University*, **37(2)**, 343-365.
- Liu, Y., Wang, J., Li, H., Gao, W. and He, S., 2011. A new splitting H1-Galerkin mixed method for pseudo-hyperbolic equations. *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, **5(3)**, 413-418.
- Modanlı, M., Abdulazeez, S. T. and Husien, A. M., 2021. A residual power series method for solving pseudo hyperbolic partial differential equations with nonlocal conditions. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, **37(3)**, 2235-2243.
- Modanlı, M., Göktepe, E., Akgül, A., Alsallami, S. A., and Khalil, E. M., 2022. Two approximation methods for fractional order Pseudo-Parabolic differential equations. *Alexandria Engineering Journal*, **61(12)**, 10333-10339.
- Ozbag, F. and Modanlı, M., 2021. On the stability estimates and numerical solution of fractional order telegraph integro-differential equation. *Physica Scripta*, **96(9)**, 094008.
- Podlubny, I., 1998. Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications, 198, Elsevier, 1-340.
- Potapova, S. V., 2012. Boundary value problems for pseudohyperbolic equations with a variable time direction. *Journal of Pure Applied Mathematics*, **3(1)**, 73-91.



Qureshi, S. and Yusuf, A., 2019. Modeling chickenpox disease with fractional derivatives: From caputo to atangana-baleanu. *Chaos, Solitons & Fractals*, **122**, 111-118.

Zhang, Y., Niu, Y. and Shi, D., 2012. Nonconforming H1 - Galerkin mixed finite element method for pseudo-hyperbolic equations. *American Journal of Computational Mathematics*, **2**, 269-273.

Zhao, Z., and Li, H., 2019. A continuous Galerkin method for pseudo-hyperbolic equations with variable coefficients. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, **473(2)**, 1053-1072.

## Yeniden Örnekleme Metotlarının Kredi Kartı Sahtecilik Tespiti için Topluluk Öğrenmesine Kapsamlı Analizi

Ali Kemal AY<sup>1\*</sup>, Esra Nergis YOLAÇAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

Sorumlu yazar e-posta: aykemal.1993@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4061-4395>

e-posta: yolacan@ogu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0008-1037>

Geliş Tarihi: 01.02.2022

Kabul Tarihi: 22.09.2022

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Dengesiz Veri Kümesi;  
Yeniden Örnekleme  
Metotları; Topluluk  
Öğrenmesi; Kredi Kartı  
Sahtecilik Tespiti;  
Makine Öğrenmesi

Kredi kartı aracılığıyla hızlı ve kolay satın alma işlemleri sahtecilik işlemlerinin artmasına neden olmuştur. Son yıllarda makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımı sahtecilik tespiti işlemlerinde önemli bir pay oluşturmuştur. Sahtecilik tespiti işlemlerinde karşılaşılan yaygın problemlerden birisi veri kümelerinin dengesiz olmasıdır. Dengesizlik problemi için kullanılan yeniden örnekleme metotları kullanıldıkları aşamalar bakımından çalışmadan çalışmaya farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışma başlıca topluluk öğrenmesi yöntemleri olmak üzere çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerini kullanarak yeniden örnekleme metotlarının kullanıldıkları aşamalara göre yarattığı etkileri karşılaştırmaktadır. Karşılaştırma sonucunda, çapraz doğrulama metodu aracılığıyla yeniden örnekleme metotlarının eğitim ve test veri kümelerine ayrı ayrı yapılmasının en doğru sonucu verdiği gösterilmiştir. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan XGB, LGBM, RF, FNN ve diğer metotların metrik değerlerine dayanan bir başka kıyaslamada ise XGB ve FNN metotları %99 duyarlılık, kesinlik ve doğruluk ile en yüksek değerlere ulaşmışlardır.

## Comprehensive Analysis of Resampling Methods on Ensemble Learning for Credit Card Fraud Detection

### Abstract

#### Keywords

Imbalanced Dataset;  
Resampling Methods;  
Ensemble Learning;  
Credit Card Fraud  
Detection; Machine  
Learning

Rapid and easy purchases via credit cards have led to a rise in fraudulent transactions. In recent years, machine learning methods have been an important part of fraud detection processes. One of the common problems encountered in processes of fraud detection is the imbalance in datasets. Resampling methods used for the problem of imbalance may differ from study to study in terms of the stages these methods are applied. This study compares the effects of resampling methods according to these stages, using various ensemble learning methods, including a few machine learning and deep learning methods. The comparison utilizing cross-validation technique shows that applying the resampling methods separately to the training and test datasets method gives the most accurate result. However, in another comparison by metric scores of XGB, LGBM, RF, FNN, and other methods used in this study, XGB and FNN techniques give the highest values with 99% recall, precision, and accuracy.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

İnternet teknolojilerinin gelişmesiyle son yıllarda kredi kartı kullanımı önemli oranda artmıştır. Kullanım oranlarının artması ayrıca kötü niyetli kişiler tarafından yapılan dolandırıcılık saldırılarını da artırmıştır. Bu tür saldırılar dramatik ölçüde kayıplara neden olmaktadır. The Nilson verilerine

göre, 2019 yılında, dünya çapındaki dolandırıcılık kayıpları 28,65 milyar dolara ulaşmış ve bu rakamın 2027 yılına kadar 38,50 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Int. Kyn. 1). Federal Trade Commission'a, 2019 yılında bildirilen başlıca sahtecilik türleri ve bunlara karşılık gelen kayıpları içeren grafikte, yaklaşık 1,7 milyon sahtecilik ve

bunun yaklaşık 250 bin (%15) kadarının ödeme yöntemleri ile ilgili olduğu belirtilmektedir (Int. Kyn. 2). En çok bildirilen 2. sahtecilik türü olarak kredi kartı sahteciliği, 135 milyon dolar kayba sahip yaklaşık 53 bin bildiri ile bu listede yer almaktadır.

Son yıllarda sahtecilik tespiti için makine öğrenmesi yöntemleri kullanımında artış görülmektedir. Makine öğrenmesi yöntemleri uygulanırken karşılaşılan problemlerden birisi üzerinde çalışılan veri kümesinin, European Cardholders (EC), dengesiz olmasıdır. Dengesiz veri kümesinde, bir sınıfa ait veriler diğer sınıfa ait verilerden önemli derecede, sayıca fazladır. Dengesizlik problemi veri sayısı az olan sınıfın makine öğrenmesi metotları tarafından yeterince öğrenilmemesine neden olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için yeniden örneklemeye (YÖ) metotları kullanılmaktadır.

EC veri kümesi ile yapılan çalışmalar incelenildiğinde, Sohony *et al.* (2018), sahtecilik tespiti için topluluk öğrenmesi (Ensemble Learning) yöntemini önermektedir. İlgili çalışmada YÖ'nin sağladığı faydalardan bahsedilmesine karşı kullanılmadığı görülmektedir. Bununla birlikte topluluk öğrenmesi için gerekli yapıyı, katman ve nöron sayıları bakımından farklılık gösteren 3 tane ileri beslemeli sinir ağları (FNN) ile ağaç sayılarında değişiklik gösteren 2 tane de rastgele orman (RF) metotlarından oluşturmaktadır. Sohony *et al.* (2018) önerdikleri topluluk öğrenmesi metodu ile %86,73 duyarlılık (recall), %85,85 kesinlik (precision) ve %99,95 doğruluk (accuracy) değerlerine ulaşmaktadır.

Taneja *et al.* (2019), alt örneklemeye (down-sampling), yukarı örneklemeye (up-sampling), sentetik azınlık örneklemeye tekniği (SMOTE) ailesi ve uyarlanabilir-sentetik (ADA-SYN) gibi çeşitli yeniden örneklemeye metotlarını dengeli bir veri kümesine ulaşabilmek için önermektedir. İlgili çalışma, RF metodu kullanarak, SVM-SMOTE (Destek Vektör Makinesi) ile %80 duyarlılık, %91 kesinlik ve %85 F Skor (F-Score) değerlerine ulaşmıştır ancak SVM-SMOTE metodunun işlemsel olarak maliyetli bir metot olduğunu paylaşmaktadır.

Husejinović (2020), yeniden örneklemeye metotları kullanmadan, Naïve Bayes (NB), C4.5 Karar Ağacı (DT) ve bir de temel öğretici metot olarak C4.5 DT metodunu kullanan torbalama (Bagging) metotlarını karşılaştırmaktadır. Husejinović (2020) tüm metotlarda normal veriler için Kesinlik-Duyarlılık (Precision-Recall) eğrisi altında alan değeri oranını %99 ve üzeri, sahtecilik verileri için sırasıyla %8, %74,5 ve %82,5 değerlerini paylaşmaktadır.

Isabella *et al.* (2021), dengeli veri kümesine ulaşabilmek için rastgele aşırı örneklemeye (ROS) metodunu, sahtecilik tespiti için Binary Cross Entropy – Gradient Boost Hybrid Ensemble Classifier (BCE-GBHEC), AdaBoost, k en yakın komşu (KNN), AdaBoost+SVM metotlarını kullanmaktadır. Isabella *et al.* (2021) önerdiği BCE-GBHEC metodu ile aralarındaki en yüksek doğruluk değerine %97,23 ile ulaşmaktadır. Diğer metotlar ise KNN %96,89, AdaBoost %96,87 ve AdaBoost+SVM %96,01 doğruluk değerlerine sahiptir.

Kredi kartı sahtecilik tespiti (KKST) literatürü incelendiğinde, EC veri kümesi ile yapılmış, topluluk öğrenmesinin geçtiği çalışmalar olarak yukarıda incelenen 4 çalışma bulunmuştur. İncelenen çalışmalardan sadece ikisinde, Taneja *et al.* (2019) ve Isabella *et al.* (2021), YÖ metotları kullanılarak başarı seviyesinde artış sağlandığı paylaşılmıştır ancak ilgili çalışmalar dahil olmak üzere, KKST literatüründe EC veri kümesi ile yapılmış YÖ metotları kullanılan, 2020 ve 2021 yıllarında yapılmış çalışmalar Çizelge 1'de incelenmektedir. Toplam 20 çalışmanın 4 tanesinde aşırı örneklemeye metotları, eğitim, test veri kümesi ayırımından önce uygulanmasıyla beraber diğer 6 çalışmada ne zaman, nasıl uygulandığı bilinmemektedir. Kalan 10 tane çalışma da ise aşırı örneklemeye metotları, eğitim, test ayırımından sonra kullanılmaktadır. Bilinmeyen çalışmalar, bilinenlerin yüzdeleri dikkate alınarak dağıtıldığında çalışmaların yaklaşık %30'unda aşırı örneklemeye, eğitim test ayırımından önce yapılmıştır denebilir. Aşırı örneklemeye metotlarının tüm veri kümesi üzerine uygulanması veya eğitim, test veri kümeleri ayırımı yapıldıktan sonra ayrı ayrı uygulanması durumlarında farklı sonuçlar doğmaktadır. Örneğin, aşırı örneklemeye tüm veri kümesine uygulandıktan sonra, eğitim, test

kümesi ayrımı yapıldığı durumda, başarı değerlendirme aşamasında, örneklemenin uygulanmadığı haline kıyasla bir artış görülmektedir ancak bu artış, tıpkı dengesiz veri kümelerinde doğruluk metriği kullanımının meydana getirdiği gibi olumlu fakat yanıltıcı etki yaratmaktadır. Diğer çalışmaların aksine, bu çalışmada, KKST literatüründeki en yaygın XGB (Extreme Gradient Boosting), LGBM (Light Gradient Boosting Machine) gibi topluluk öğrenmesi metotları başlıca olmak üzere diğer öğrenme yöntemleri de kullanılarak YÖ metotlarının uygulandıkları aşamalara göre, başarı seviyesine etkileri detaylıca incelenmektedir. Bu incelemeyle birlikte, YÖ ve özneliliklerle ilgili önerilen çeşitli yöntemlerin kombinasyonu bu çalışmaya özgünlük katmaktadır. Ayrıca bu kombinasyondan yararlanılarak hızlı ve başarılı tespit yapabilen çeşitli metotlar karşılaştırılmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında materyal ve metot, üçüncü kısmında bulgular ve tartışma ve son kısmında ise çalışmanın sonuçlarına değinilmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu kısımda çalışmada kullanılacak YÖ metotları, makine öğrenmesi metotları, veri kümeleri ve değerlendirme metrikleri genel olarak açıklanmıştır (2.1-2.4). Son olarak, önerilen metot başlığında kısaca teknikleri açıklanan bu metotların bu çalışmaya özgü nasıl kullanıldığının detayları anlatılmaktadır.

### 2.1 Yeniden Örneklemeye

YÖ, Efron (1982), veri kümesindeki anlamı bozmadan veri miktarını azaltabilmek, anlamı daha net elde edebilmek için veri miktarını çoğaltabilmek gibi çeşitli amaçlarda kullanılır. Bu çalışmada örneklemeye metotlarından SMOTE ve rastgele örnek azaltma (RUS) metotları kullanılmaktadır.

SMOTE, Chawla *et al.* (2002) tarafından geliştirilen, azınlık sınıfı için sentetik veri üretme tekniğidir. Aşırı örneklemeye metodunda, örneklerin birbirinin direkt kopyalanmasından kaynaklanan aşırı öğrenme problemine karşı önerilmektedir.

RUS verileri azaltmaya yönelik bir yöntemdir. Çoğunluk sınıfı verileri rasgele seçilir, istenilen

denge oranı elde edilene kadar seçilen bu örnekler veri kümesinden atılır.

**Çizelge 1.** 2020 ve 2021 yıllarında EC veri kümesi ile yapılmış YÖ metotları kullanan çalışmalar.

Yazarlar ve Yılları	Kullanılan YÖ Metotları	Aşırı Örneklemeye Eğitim-Test Ayrımından Önce mi?
bin Alias <i>et al.</i> (2021)	SMOTE, TOMEK	Evet
Tran and Dang (2021)	SMOTE, ADASYN	Belirtilmemiş
Isabella <i>et al.</i> (2021)	ROS	Evet
Wibowo and Fatchah (2021)	ROS, ADASYN, SMOTE, Borderline-SMOTE	Hayır
Bej <i>et al.</i> (2020)	LoRAS, SMOTE, Borderline-1 SMOTE, ADASYN	Hayır
Shamsudin <i>et al.</i> (2020)	ROS(ADASYN, Borderline, SVM-SMOTE) + RUS	Belirtilmemiş
Riffi <i>et al.</i> (2020)	SMOTE	Evet
Rtayli and Enneya (2020)	SMOTE	Belirtilmemiş
Alam <i>et al.</i> (2020)	SMOTE, ADASYN, RUS	Hayır
Nguyen <i>et al.</i> (2020)	RUS, SMOTE, NearMiss	Belirtilmemiş
Janbandhu <i>et al.</i> (2020)	SMOTE, ADASYN	Hayır
Wang <i>et al.</i> (2020)	Oversampling, Mini-Batch Under-Sampling	Hayır
Aung <i>et al.</i> (2020)	SMOTE	Hayır
Mrozek <i>et al.</i> (2020)	RUS, SMOTE	Belirtilmemiş
Shivanna <i>et al.</i> (2020)	SMOTE	Evet
Shah <i>et al.</i> (2020)	ROS, RUS, SMOTE	Belirtilmemiş
Tingfei <i>et al.</i> (2020)	SMOTE, GAN	Hayır
Mînăstireanu and Meşniță (2020)	ROS, RUS	Hayır
Gulati (2020)	SMOTE, Neighborhood Cleaning Rule	Hayır
Zhang <i>et al.</i> (2020)	RUS, NearMiss, KNN	Hayır

### 2.2 Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi yöntemleri çeşitli alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Alam *et al.*, 2020; Çınarer vd., 2021; Garg *et al.*, 2019; Mochida *et al.*, 2019). KKST literatüründe en yaygın makine öğrenmesi metotları RF, KNN, SVM, Lojistik Regresyon (LR) ve bunlara ek olarak Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), FNN, XGB, LGBM gibi farklı topluluk

metotları çalışmada kullanılarak sonuçları karşılaştırılmaktadır.

RF, Breiman (2001), birden çok DT ile oluşturulan bir orman gibi düşünülebilir. Her bir DT için n boyutlu eğitim veri kümesinden, n tane eleman yinelemeli seçilir dolayısıyla orijinal eğitim veri kümesinden farklı bir küme ortaya çıkarak, her bir DT bir tahminde bulunur. Bu tahminler oylama yöntemiyle çoğunluğa sahip olan sınıf son tahmin olarak karar verilir.

SVM, Vapnik (2000), farklı sınıflar altında bulunan örnekleri ayıran bir ayırma çizgisini (hiperdüzlem) tanımlaya çalışan bir metottur. Dolayısıyla yeni örnekler geldikçe, örnekler çizginin hangi tarafına düştüğüne göre, SVM sınıflandırma yapmaktadır.

LR, Wright (1995), bir ya da daha özneliği dikkate alarak ikili olasılık değeri hesaplamak için bir fonksiyonel teknik kullanmaktadır. Genel olarak, iki durumun olduğu senaryolarda kullanıldığı görülür.

MLP, McCulloch ve Pitts (1943), ileri beslemeli yapay sinir ağına dayanmaktadır, en az 3 temel katmandan (girdi, gizli ve çıktı) oluşur. Girdi katmanı, işlenecek girdi değerlerini alır. Çıktı katmanı, tahmin yada sınıflandırma için gerekli işlemleri uygulamaktadır. Rastsal sayıdaki gizli katman ise girdi ve ağırlık değerlerine göre bir hesaplama yapmaktadır. Girdi ve çıktı katmanı arasındaki gizli katman sayısı artırılabilir ki bu doğruluğu yükseltebilirken eğitim ve tahmin süresini de uzatabilmektedir.

KNN, Cover ve Hart (1967) tespit edilecek örneğin, k tane en yakın komşusunu bulmaktadır ve bu komşular arasında hangi sınıf ağırlıkta ise tespit sonucunu o sınıfa vermektedir.

LGBM, Ke vd. (2017), diğer gradyan artırma (gradient boosting) yapılarına kıyasla doğruluk değerini düşürmeden daha hızlı tahmin yapabilmeyi sağlayan bir DT metoduna dayanan bir yapıdır.

XGB, Chen ve Guestrin (2016), DT metoduna dayanan, gradyan artırma yapısını kullanan bir topluluk öğrenmesi metodudur.

### 2.3 Veri Kümesi

European Cardholders, (Int Kyn. 3) Eylül 2013 yılında, iki gün içerisinde Avrupalı kredi kartı sahipleri tarafından gerçekleştirilmiş işlemleri içermektedir. Bunlardan 492 tanesi dolandırıcılıkla ilgili olmakla beraber toplamda 284807 veri vardır. Ayrıca veri kümesi, PCA tekniği dönüşümünün sonucuyla sadece sayısal değerlerden oluşmaktadır. Gizlilik durumları nedeniyle (Time and Amount) öznelikleri hariç, diğer öznelikler V1,V2, ...,V28 şeklinde kodlanarak paylaşılmıştır.

### 2.4 Değerlendirme Metrikleri

Bu çalışmada kullanılan metriklerin formülleri aşağıda paylaşılmıştır (1-4). Metriklerin hesaplanmasında kullanılan karmaşıklık matrisi Çizelge 2’de paylaşılmaktadır.

Çizelge 2. Karmaşıklık Matrisi

		Gerçek	
		1	0
Tahmin	1	TP	FP
	0	FN	TN

$$Doğruluk = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \quad (1)$$

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP+FP} \times 100 \quad (2)$$

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (3)$$

$$F\_Skor = \frac{2 \times Kesinlik \times Duyarlılık}{Duyarlılık + Kesinlik} \times 100 \quad (4)$$

İşlem karakteristik eğrisi altındaki alan (AUROC) için bir değer döndürmektedir. Bu eğri ise sınıflandırma için kullanılacak farklı eşik değerleri ile bulunan doğru ve yanlış pozitif oranlarla oluşmaktadır.

PR eğrisi altındaki alan (AUPR) için bir değer döndürmektedir. ROC eğrisinden farkı ise dengesiz veri kümeleri için genellikle önemsiz olan doğru tespit edilmiş normal işlemler değerini hesaba katmadan başarı değerlendirmesi yapan kesinlik ve duyarlılık metriklerinden oluşturulmasıdır.

### 2.5 Önerilen Metot

Bu çalışmada ilk olarak EC veri kümesine, veri ön işlemleri uygulanarak daha az veri ile daha hızlı ve başarılı bir tespit için makine öğrenmesi yöntemlerine zemin oluşturulmuştur. Veri

önışlemleri için, Şekil 1’de gösterilen sınıfla özneliklerin korelasyon ısı haritasından yararlanılmıştır. Şekil 1’de görüldüğü üzere en yüksek korelasyona sahip 4 öznelik sırasıyla, V17, V14, V12 ve V10’dur. Başarı seviyesini yükseltebilmek için, bu 4 öznelik için eşik değerleri kullanılmıştır. Burada öznelik sayısının 4 olması pozitif ya da negatif yönde 0.2 korelasyon değerinin üstünde kalan öznelik sayısının 4 olmasındandır. Şekil 1’de en yüksek ilişkili özneliğin korelasyon değeri -0.33 olduğu için 0.2 değeri korelasyon için düşük olsa da tercih edilmiştir. Çizelge 3’te paylaşılan deneme, yanılma ile belirlenen eşik değerleri, sahtecilik sınıf verilerinin mümkün olabildiği kadar çoğunu kapsamaktadır. Bu eşik değerlerinin belirlenmesi ile kalan veri sayıları şöyledir: 41491 normal, 492 sahtecilik ve toplam veri sayısı 41983’tür. Ayrıca diğer öznelik değerleriyle uyumlu olabilmesi adına Amount özneliğine normalleştirme işlemleri uygulanmıştır.

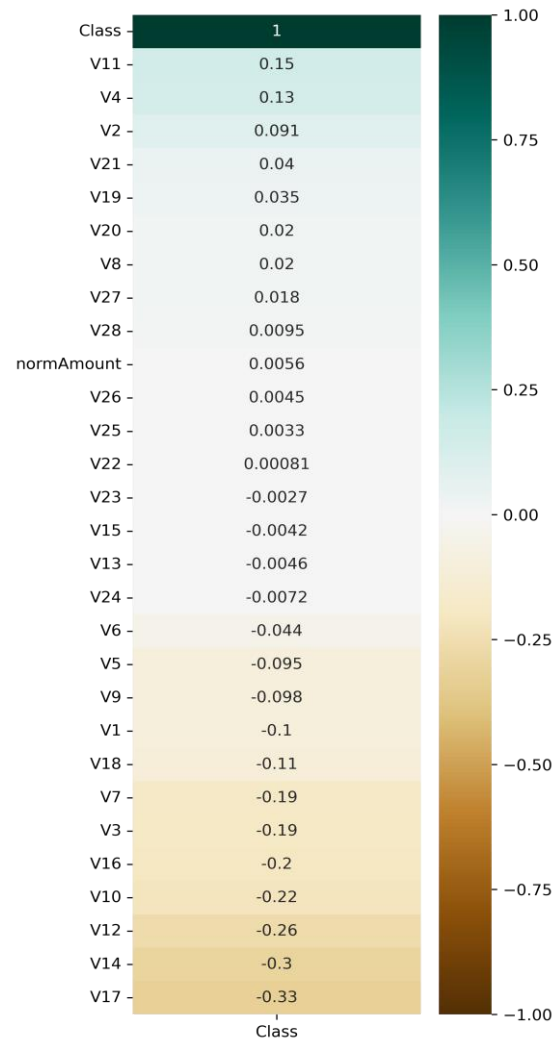
Uygulanan veri önışlemlerinden sonra, KKST için bazı topluluk öğrenmesi yöntemleri de dahil olmakla birlikte çeşitli makine öğrenmesi yöntemleri ve YÖ metotlarının kullanıldığı aşamalar karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan her bir makine öğrenmesi yöntemi 4 farklı deney ortamında eğitilip, test edilmiştir: (i) ilk deney ortamında herhangi bir YÖ metodu kullanılmamaktadır, (ii) ikincide sadece test veri kümesine uygulanarak dengeli hale gelmiştir, (iii) üçüncüde eğitim ve test veri kümelerine ayrı ayrı uygulanarak her ikisi de dengeli olmuştur, (iv) dördüncüde ise tüm veri kümesine YÖ metotları uygulanıp veri kümesi dengeli hale geldikten sonra eğitim, test veri kümesi ayrımı yapılmaktadır.

Her bir makine öğrenmesi yöntemi Python yazılımı ile kullanılırken kendine özgü parametrelere sahip olmaktadır. RF metodu için karar ağacı sayısını alan  $n\_estimators$  ya da bir dallanma kalitesini ölçmek için kullanılan yöntemleri girdi olarak alan  $criterion$ , LR metodu için nihai yakınsamayı çözmek için gerekli maksimum iterasyon sayısı bu parametrelere örnek olarak verilebilir. Bu parametrelerin aldıkları değerler problemin türüne göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışma kapsamında ise en iyi parametre değerlerine ulaşabilmek için

GridSearchCV ile farklı parametre değerleri test edilmiştir. Örneğin GridSearchCV ile RF metodu  $n\_estimators$  parametresi için 100, 400, 600 ve 800 değerleri denenmiş parametrenin varsayılan değeri (100) ile denenilen değerler arasında önemli farklar görülmemiştir. Bu durum diğer metotların denenilen parametre değerleri için de geçerli olduğu için bu çalışmada her bir metot parametresi varsayılan değerleri ile kullanılmıştır.

**Çizelge 3.** En yüksek korelasyona sahip 4 öznelik için eşik değerleri.

	V17	V14	V12	V10
Eşik Değeri	< 0.5	< 0.5	< 0.2	< 0.2



**Şekil 1.** Sınıfla özneliklerin korelasyon ısı haritası.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Veri kümesinin sabit bir kısmını eğitim kümesine, kalanını test kümesine ayırmanın (Hold-out) taraflı bir sonuç doğuracağından, 5 katlamalı çapraz

doğrulama (Cross Validation) yöntemi tercih edilmiştir.

Çizelge 4 ve 5'te her metoda ait birinci ve ikinci satırlarının karşılaştırılması test veri kümesinin dengesiz ve dengeli olduğu durumlardaki farklılıklarını yansıtmaktadır. Tüm metotların birinci satırlarındaki doğruluk ve kesinlik ve bazı diğer değerleri ikinci satırlarda olması gereken asıl değerlerine düşerek, dengesiz veri kümesinde hatalı kullanılan bazı metriklerin yanıltıcı algısını ortaya koymaktadır. İkinci ve üçüncü satırlar arasındaki karşılaştırma ise eğitim kümesine YÖ metotları uygulamanın katkılarını göstermektedir. Eğitim kümesinde YÖ metotları kullanılarak, eğitilen tüm metotlar, Kesinlik metriği hariç diğer tüm metriklerde artış sağlamaktadır. Bununla birlikte YÖ metotlarının en çok katkı sağladığı öğrenme metodu LR ve sonrasında SVM metotlarıdır. Bu karşılaştırmaların en önemlisi olan, metotların üçüncü ve dördüncü satırlarının karşılaştırılması ise YÖ metotlarının eğitim, test ayırımından önce veya sonra uygulanmasının doğuracağı bir başka yanıltıcı artışı ifade etmektedir. Aşırı örnekleme metodu ve türevleri, çapraz doğrulama için gerekli eğitim, test ayırımından önce tüm veri kümesine uygulandığında metot gereği yaratılan birbirine benzer veya kopya verilerin ayırımından sonra eğitim ve test veri kümelerine dağıtılma ihtimali vardır. Benzer verilerin iki tarafa dağıtılması, öğrenme yönteminin eğitim kümesinde gördüğü örneklerin aynısı ya da çok benzeriyle tekrar test edilmesi anlamına gelmesidir. Buda bir bakıma modele kopya vererek başarı değerlendirmesini yükseltmektir. Metotların birinci satırlarında doğruluk vb. diğer metrik değerlerinin olması gerektiğinden fazla olması gibi dördüncü satırlarındaki değerlerde yanlış algı yaratmaktadır. Dolayısıyla dört satırdan en doğru, gerçekçi değerlerin üçüncü satırda olduğu çıkarımı yapılmıştır. Tüm bunlarla birlikte test veri kümesine direkt aşırı örnekleme ve türevleri metotların kullanılmasının da yanıltıcı sonuçlar üreteceğinden kullanılmaması tercih edilmiştir.

Çizelge 4'ün üçüncü satırları dikkate alınarak, öğrenme yöntemleri ve Duyarlılık metriği bakımından karşılaştırma yapıldığında Şekil 2'de görüldüğü üzere en yüksek değere FNN %95 ve en

düşük değere ise SVM ve RF metotları %88 ile sahiptir. Bununla birlikte, Stacking(XGB, FNN) yönteminin diğer topluluk öğrenmesi (RF, LGBM, XGB) yöntemlerine kıyasla başarı seviyelerinde önemli bir fark bulunmamaktadır ancak bu yöntemler eğitim, test amacıyla birden çok metot kullandığı için işlem maliyetleri diğer metotlara kıyasla yüksektir.

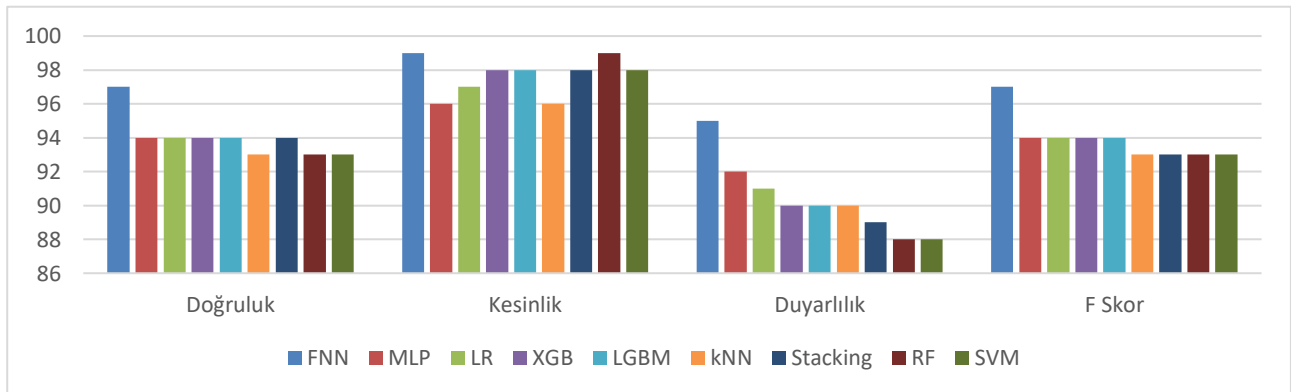
Veri ön işlemlerinin etkisinin görülebilmesi için de uygulanmadığı sonuçlar Çizelge 4'te ve uygulandığı sonuçlar Çizelge 5'te paylaşılmaktadır. Çizelge 5'te paylaşılan her bir metodun üçüncü satırları Şekil 3'te temel metrikler kapsamında karşılaştırılmıştır. Şekil 2 ve 3 incelendiğinde, veri ön işlemleri nedeniyle F-Skor metriğinde en fazla düşüş SVM metodunda %4, en az düşüş ise MLP metodunda %1 ile görülmektedir. Genel olarak %2 değer düşüşüyle birlikte orijinal veri kümesine kıyasla daha az veri ile neredeyse aynı başarılı modeller elde edilmiştir. Bu sonuçların devamında ise metotlar arasında en başarılı sonuçlar veren FNN metodunun veri ön işlemsiz ve ön işlemliler durumlarındaki karmaşıklık matrisleri (Çizelge 6 ve 7) ve sonrasında ROC (Şekil 4 ve 6) ve PR (Şekil 5 ve 7) eğrileri paylaşılmıştır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, 2020 ve 2021 yıllarında EC veri kümesi ile yapılmış YÖ metotları kullanan 20 farklı çalışma incelendiğinde, YÖ metotları kullanıldıkları aşamalar bakımından farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar ortaya koyulduktan sonra en doğru sonuçların eğitim ve test veri kümesine ayrı ayrı YÖ metotlarını uygulayarak bulunacağı gösterilmiştir. Ayrıca test veri kümesine uygulanacak aşırı örnekleme metotlarının da yanıltıcı bir etki yarattığı paylaşılmıştır. Gelecek çalışmada örnekleme metotlarının önemini gösterebilmek için farklı öğrenme yöntemleri kullanılabilir.

**Çizelge 4.** Veri ön işlemsiz yeniden örneklemeye metotlarının kullanıldığı aşamalara göre öğrenme metotlarına etkisi.

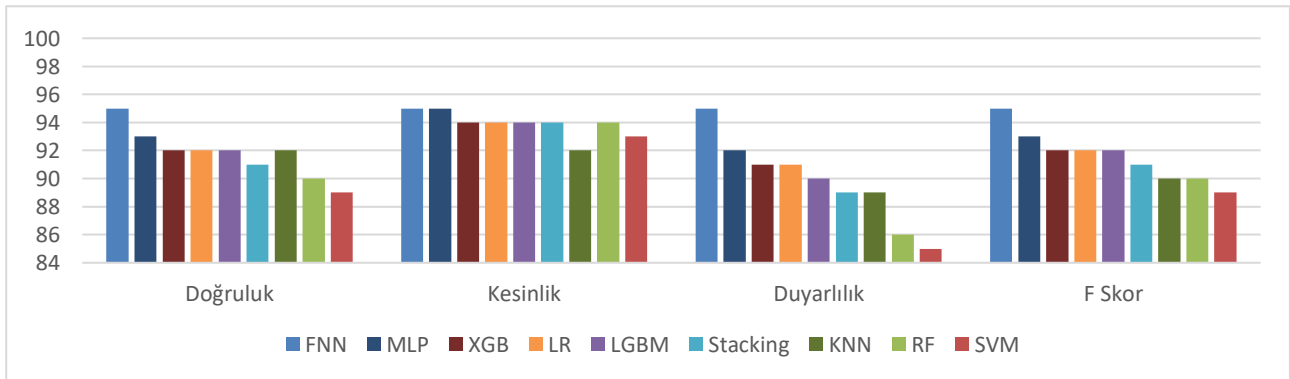
Metot	YÖ Metotları		Değerlendirme Metrikleri (%)					
	Eğitim	Test	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F Skor	AUROC	AUPR
XGB	-	-	100	94	79	86	90	87
	-	RUS (1)	90	100	79	89	90	95
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	94	98	90	94	94	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		97	99	95	97	97	98
LGBM	-	-	100	47	38	42	69	42
	-	RUS (1)	68	100	38	55	69	84
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	94	98	90	94	94	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		97	98	96	97	97	98
Stacking (XGB, FNN)	-	-	100	95	77	85	88	86
	-	RUS (1)	86	100	71	83	86	93
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	94	98	89	93	93	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		97	99	95	97	97	98
RF	-	-	100	95	78	86	89	87
	-	RUS (1)	89	100	79	88	89	95
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	93	99	88	93	93	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		96	99	94	96	96	98
kNN	-	-	100	94	79	86	90	86
	-	RUS (1)	90	100	79	88	90	95
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	93	96	90	93	93	95
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		96	96	96	96	96	97
SVM	-	-	100	95	68	79	84	81
	-	RUS (1)	84	100	68	81	84	92
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	93	98	88	93	93	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		95	98	91	94	95	97
LR	-	-	100	87	62	73	81	75
	-	RUS (1)	81	100	62	77	81	91
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	94	97	91	94	94	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		95	97	92	95	95	97
FNN	-	-	100	88	81	84	90	84
	-	RUS (1)	89	100	79	88	89	95
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	97	99	95	97	97	98
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		98	99	97	98	98	99
MLP	-	-	100	91	76	83	88	84
	-	RUS (1)	88	100	76	86	88	94
	SMOTE(0.0034), RUS(1)	RUS (1)	94	96	92	94	94	96
	SMOTE(0.0034), RUS(1)		97	97	96	97	97	98

**Sekil 2.** Veri ön işlemsiz şekilde temel metrikler ile metotların karşılaştırılması.



**Çizelge 5.** Veri ön işlem ile yeniden örneklemeye metotlarının kullanıldığı aşamalara göre öğrenme metotlarına etkisi.

Metot	YÖ Metotları		Değerlendirme Metrikleri (%)					
	Eğitim	Test	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F Skor	AUROC	AUPR
XGB	-	-	96	90	79	84	90	86
	-	RUS (1)	90	96	78	86	89	93
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	92	94	91	92	92	94
	SMOTE(0.1), RUS(1)		95	96	94	95	95	96
LGBM	-	-	96	44	38	41	69	43
	-	RUS (1)	68	96	38	54	68	85
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	92	94	90	92	92	93
	SMOTE(0.1), RUS(1)		95	96	94	95	95	96
Stacking (XGB, FNN)	-	-	95	92	78	84	88	86
	-	RUS (1)	86	95	73	83	85	92
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	91	94	89	91	91	93
	SMOTE(0.1), RUS(1)		95	96	95	95	95	96
RF	-	-	96	92	79	85	88	87
	-	RUS (1)	89	96	78	86	89	95
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	90	94	86	90	90	91
	SMOTE(0.1), RUS(1)		94	96	93	94	94	95
kNN	-	-	94	92	79	85	90	86
	-	RUS (1)	89	94	79	86	88	94
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	92	92	89	90	92	93
	SMOTE(0.1), RUS(1)		93	94	92	93	93	95
SVM	-	-	94	91	67	77	81	81
	-	RUS (1)	81	94	67	78	82	89
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	89	93	85	89	89	91
	SMOTE(0.1), RUS(1)		95	98	91	94	95	97
LR	-	-	96	86	62	72	80	74
	-	RUS (1)	80	96	66	78	79	90
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	92	94	91	92	92	94
	SMOTE(0.1), RUS(1)		95	96	93	95	95	97
FNN	-	-	97	85	81	83	89	84
	-	RUS (1)	89	97	82	89	89	95
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	95	95	95	95	95	97
	SMOTE(0.1), RUS(1)		97	98	97	97	97	99
MLP	-	-	96	89	76	82	88	84
	-	RUS (1)	88	96	77	85	85	92
	SMOTE(0.1), RUS(1)	RUS (1)	93	95	92	93	93	95
	SMOTE(0.1), RUS(1)		96	97	96	96	96	96

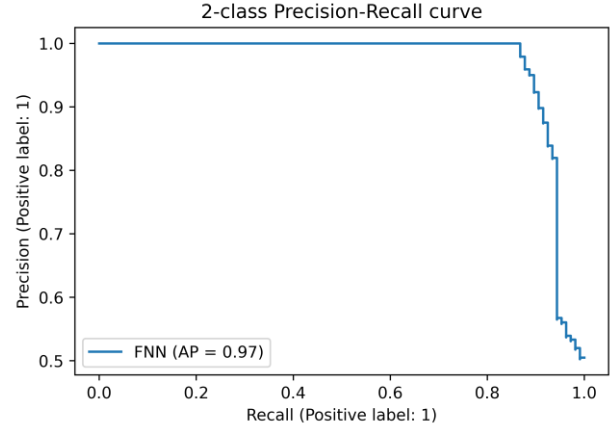
**Şekil 3.** Veri ön işlemleri şeklinde temel metrikler ile metotların karşılaştırılması.

**Çizelge 6.** Karmaşıklık matrisi veri ön işlemsiz FNN

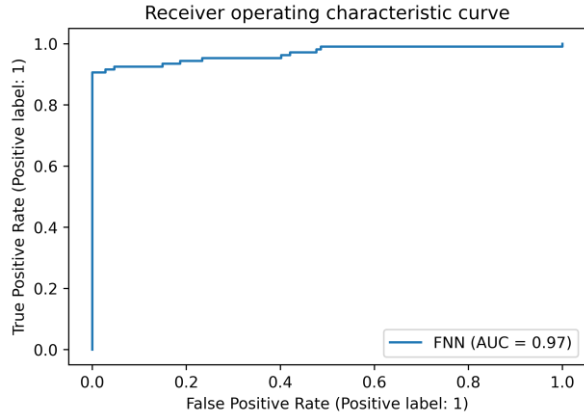
		Gerçek	
		1	0
Tahmin	1	102	1
	0	5	106

**Çizelge 7.** Karmaşıklık matrisi veri ön işlemlili FNN

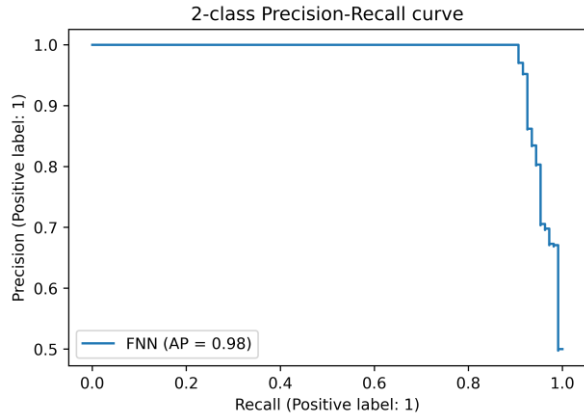
		Gerçek	
		1	0
Tahmin	1	106	1
	0	1	106



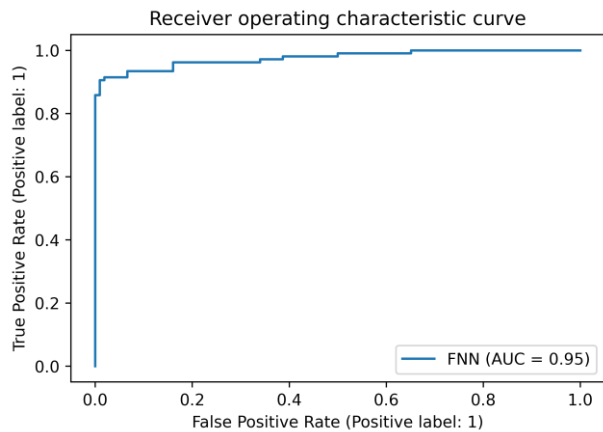
**Şekil 7.** PR eğrisi veri ön işlemlili FNN



**Şekil 4.** ROC eğrisi veri ön işlemsiz FNN



**Şekil 5.** PR eğrisi veri ön işlemsiz FNN



**Şekil 6.** ROC eğrisi veri ön işlemlili FNN

## 5. Kaynaklar

Alam, T.M., Shaukat, K., Hameed, I.A., Luo, S., Sarwar, M.U., Shabbir, S., Li, J. and Khushi, M., 2020. An investigation of credit card default prediction in the imbalanced datasets. *IEEE Access*, **8**, 201173-201198.

Aung, M.H., Seluka, P.T., Fuata, J.T.R., Tikoisuva, M.J., Cabealawa, M.S. and Nand, R., 2020. Random Forest Classifier for Detecting Credit Card Fraud based on Performance Metrics. In *2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)* (1-6).

Bej, S., Davtyan, N., Wolfien, M., Nassar, M. and Wolkenhauer, O., 2021. LoRAS: an oversampling approach for imbalanced datasets. *Machine Learning*, **110(2)**, 279-301.

bin Alias, M.S.A., Ibrahim, N.B. and Zin, Z.B.M., 2021. Improved sampling data Workflow using Smtmk to increase the classification accuracy of imbalanced dataset. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, **8(02)**, 2021.

Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, **45(1)**, 5-32.

Chawla, N.V., Bowyer, K.W., Hall, L.O. and Kegelmeyer, W.P., 2002. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, **16**, 321-357.

Chen, T. and Guestrin, C., 2016. Xgboost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining* (785-794).

Cover, T. and Hart, P., 1967. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE transactions on information theory*, **13(1)**, 21-27.

- Çinarer, G., Emiroğlu, B.G. and Yurttakal, A.H., 2021. Predicting 1p/19q chromosomal deletion of brain tumors using machine learning. *Emerging Materials Research*, **10(2)**, 238-244.
- Efron, B., 1982. *The jackknife, the bootstrap and other resampling plans*. Society for industrial and applied mathematics.
- Garg, R., Oh, E., Naidech, A., Kording, K. and Prabhakaran, S., 2019. Automating ischemic stroke subtype classification using machine learning and natural language processing. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **28(7)**, 2045-2051.
- Gulati, P., 2020. Hybrid resampling technique to tackle the imbalanced classification problem.
- Ito, F. and Singh, S., 2021. Comparison and analysis of logistic regression, Naïve Bayes and KNN machine learning algorithms for credit card fraud detection. *International Journal of Information Technology*, **13(4)**, 1503-1511.
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q. and Liu, T.Y., 2017. Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in neural information processing systems*, **30**.
- McCulloch, W.S. and Pitts, W., 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, **5(4)**, 115-133.
- Mînaştireanu, E.A. and Meşniţă, G., 2020. Methods of handling unbalanced datasets in credit card fraud detection. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, **11(1)**, 131-143.
- Mochida, K., Koda, S., Inoue, K., Hirayama, T., Tanaka, S., Nishii, R. and Melgani, F., 2019. Computer vision-based phenotyping for improvement of plant productivity: a machine learning perspective. *GigaScience*, **8(1)**, giy153.
- Mrozek, P., Panneerselvam, J. and Bagdasar, O., 2020, December. Efficient resampling for fraud detection during anonymised credit card transactions with unbalanced datasets. In *2020 IEEE/ACM 13th International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)* (426-433). IEEE.
- Nguyen, T.T., Tahir, H., Abdelrazek, M. and Babar, A., 2020. Deep learning methods for credit card fraud detection. *arXiv preprint arXiv:2012.03754*.
- Riffi, J., Mahraz, M.A., El Yahyaouy, A. and Tairi, H., 2020. Credit card fraud detection based on multilayer perceptron and extreme learning machine architectures. In *2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)* (1-5). IEEE.
- Rtayli, N. and Enneya, N., 2020. Enhanced credit card fraud detection based on SVM-recursive feature elimination and hyper-parameters optimization. *Journal of Information Security and Applications*, **55**, 102596.
- Shah, H.B., 2020. Comparing Machine Learning Algorithms For Credit Card Fraud Detection.
- Shamsudin, H., Yusof, U.K., Jayalakshmi, A. and Khalid, M.N.A., 2020. Combining oversampling and undersampling techniques for imbalanced classification: A comparative study using credit card fraudulent transaction dataset. In *2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation (ICCA)* (803-808). IEEE.
- Shivanna, A., Ray, S., Alshouli, K. and Agrawal, D.P., 2020. Detection of Fraudulence in Credit Card Transactions using Machine Learning on Azure ML. In *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)* (0268-0273). IEEE.
- Tingfei, H., Guangquan, C. and Kuihua, H., 2020. Using variational auto encoding in credit card fraud detection. *IEEE Access*, **8**, 149841-149853.
- Tran, T.C. and Dang, T.K., 2021. Machine learning for prediction of imbalanced data: Credit fraud detection. In *2021 15th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)* (1-7). IEEE.
- Vapnik, V.N., The nature of static learning theory M. New York: Springer—Verlag, **1**, 995.
- Wang, J., de Moraes, R.M. and Bari, A., 2020. A predictive analytics framework to anomaly detection. In *2020 IEEE Sixth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)* (104-108). IEEE.
- Wibowo, P. and Fatichah, C., 2021. An in-depth performance analysis of the oversampling techniques for high-class imbalanced dataset. *Register: Jurnal Ilmiah Teknologi Sistem Informasi*, **7(1)**, 63-71.
- Wright, R.E., 1995. Logistic regression. In L. G. Grimm & P. R. Yarnold (Eds.), *Reading and understanding multivariate statistics*, 217–244. American Psychological Association.
- Zhang, D., Bhandari, B. and Black, D., 2020. Credit Card Fraud Detection Using Weighted Support Vector Machine. *Applied Mathematics*, **11(12)**, 1275.

**İnternet kaynakları**

- 1- [https://nilsonreport.com/content\\_promo.php?id\\_promo=16](https://nilsonreport.com/content_promo.php?id_promo=16), (28.01.2022)
- 2- [https://www.ftc.gov/system/files/documents/reports/consumer-sentinel-network-data-book-2019/consumer\\_sentinel\\_network\\_data\\_book\\_2019.pdf](https://www.ftc.gov/system/files/documents/reports/consumer-sentinel-network-data-book-2019/consumer_sentinel_network_data_book_2019.pdf), (28.01.2022)
- 3- <https://www.kaggle.com/mlg-ulb/creditcardfraud>, (28.01.2022)

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055102 (1016-1027)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055102 (1016-1027)

DOI: 10.35414/akufemubid.1114906

## Araştırma Makalesi / Research Article

## Bilgisayar Ağlarında Anomali Tespiti Yaklaşımı ile Saldırı Tespiti

Burak EKİCİ<sup>1\*</sup>, Hidayet TAKCI<sup>2</sup><sup>1</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ABD, Sivas<sup>2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Sivas\*Sorumlu Yazar: bekici391@gmail.com  
htakci@cumhuriyet.edu.trORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2455-2454>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4448-4284>

Geliş Tarihi: 12.05.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

## Öz

Bilgisayar ağlarına yapılan saldırılar günden güne artarken ve saldırıların nitelikleri de sürekli olarak değişmektedir. Ağ saldırıları, bilgisayar ağlarına zarar vererek bilgi güvenliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu durum kişiler, şirketler, kurumlar ve hatta devletler için büyük bir risk oluşturmaktadır. Ağ trafiğinin analizi ve böylece saldırıların ortaya çıkarılabilmesi için Saldırı Tespit Sistemlerinden yararlanılmaktadır. Saldırı türlerini tanıyacak şekilde oluşturulan bu sistemlerin gelişimleri de artan saldırı tiplerine göre sürekli devam etmektedir. Bu çalışmada makine öğrenmesi teknikleri yardımıyla anormallik tabanlı bir saldırı tespit sistemi oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışma sürecinde; Yinelemeli Özellik Eleme, İleri Yönelimli Seçim, Rastgele Orman, Karar Ağaçları, Naive Bayes, Lojistik Regresyon ve Ekstrem Gradyan Artırma gibi algoritmalarından yararlanılmış ve Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 gibi metrikler ile değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca model değerlendirme için ROC eğrilerinden yararlanılmıştır. Bahsi geçen bu algoritmalarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak etkili modelin bulunması için CICIDS 2017 veri seti kullanılmıştır. Çalışma kapsamında Yinelemeli Özellik Eleme ve İleri Yönelimli Seçim teknikleriyle özellik seçimi yapılmış ve en iyi sınıflandırma sonuçları Rasgele Orman ve Ekstrem Gradyan Artırma algoritmalarından elde edilmiştir.

## Anahtar kelimeler

Saldırı Tespiti;  
Anomali; Makine  
Öğrenmesi; Bilgi  
Güvenliği

## Intrusion Detection on Computer Networks Using Anomaly Detection Approach

## Abstract

Attacks on computer networks are increasing day by day and characteristics of them are changing continuously. Network attacks destroy information security by damaging computer network systems. This situation poses a great risk for individuals, companies, institutions and even governments. To prevent or minimize the damages of network attacks, Intrusion Detection Systems are used. The development of these systems, which are created according to attack characteristics, continues parallelly to increasing attack types. In this study, it is aimed to create an intrusion detection system based on machine learning principles with anomaly detection. Recursive Feature Elimination, Forward Feature Selection, Random Forest, Decision Tree, Naive Bayes, Logistic Regression and Extreme Gradient Boosting algorithms are used during the study and evaluations are made by Accuracy, Precision, Recall and F1 Score metrics. Also, Cross Validation and ROC Curve methods are used for the evaluation. CICIDS2017 data set is used to find the most effective model by comparing the results obtained from the mentioned algorithms. As the result of this study, it is determined that the Intrusion Detection System models, which are created by classifying the features obtained the methods of Forward Feature Selection and Recursive Feature Elimination with Random Forest and Extreme Gradient Boosting algorithms, are successful.

## Keywords

Intrusion Detection;  
Anomaly; Machine  
Learning; Information  
Security

## 1. Giriş

Günden güne gelişen teknoloji, her geçen gün daha yoğun bir şekilde hayatın merkezindeki yerini almaktadır. İnsanların konforunun artırılması amacıyla gündelik hayatta ihtiyaç duyulan birçok hizmet internet üzerinden sağlanmaya başlamış ve hatta kullanılan araç-gereçler de internet üzerinden kontrol edilmeye başlanmıştır. İnternet üzerinden alışveriş yapmak, sosyal medya araçları ile birçok kişiyle bağlantı kurmak, internet üzerinden gerçek zamanlı görüntülü görüşmeler ve toplantılar yapmak, yemek sipariş etmek ya da yemek yaparken eksik bir ürünü internet üzerinden sipariş vererek kısa süre içerisinde kapıda teslim almak artık çok kolay hale gelmiştir. Gündelik hayatı kolaylaştıran bu imkânlar, doğal olarak internetin daha fazla kullanıcı tarafından daha yoğun şekilde kullanılması durumunu da ortaya çıkarmıştır. İnternetin yaygınlaşmaya başladığı yıllarda her evde yalnızca bir veya iki internet kullanıcısı varken şu anda bireylerin neredeyse tamamı, üstelik yalnızca bilgisayarlarından değil, cep telefonlarından, tabletlerinden, akıllı saatlerinden vb. cihazlardan ayrı ayrı birer internet kullanıcısı olarak bu büyük trafiğe katılmıştır. Bununla birlikte evlerde bulunan akıllı süpürgeler, buzdolapları, kombiler, kameralar vb. cihazlar da otonom olarak bu internet trafiğinin bir parçasını oluşturmaktadırlar. Oluşan bu devasa boyutlardaki internet trafiği aynı ölçekte veriyi ve verilerin oluşturduğu bilgiyi de bünyesinde barındırmaktadır. Örneğin; internet üzerinden alışveriş yapan bir kişi bu işlem sırasında kullandığı kredi kartı bilgisi gibi hassas verileri internet trafiğine sunmaktadır. Bu örnekteki gibi sadece internet üzerinden alışveriş yapan kişi ile ticaret yapan firma ya da banka arasında gizli kalması gereken verilerin, küresel internet trafiği üzerinde korunması önem arz etmektedir. Sadece bireysel olarak değil daha büyük ölçekte şirketlerin, kurumların ve hatta devletlerin de hassas verilerinin yetkisiz kişilerin eline geçmesi ya da bozulmadan muhafaza edilmesi son derece hayati bir konudur. İnternet trafiği üzerinde bulunan hassas veriler, kötü niyetli insanların iştahlarını kabartmakta ve hassas verilerin yetkisiz insanların eline geçmesi riskini artırmaktadır. İşte bu noktada “Bilgi Güvenliği” kavramı öne çıkmaktadır.

Bilgi Güvenliğinin sağlanmasında çeşitli araçlar, yöntemler ve sistemler kullanılmaktadır. Farklı koşullara ve ihtiyaçlara göre seçilen bu sistemler günden güne gelişmektedir. Saldırı Tespit Sistemleri (STS) de Bilgi Güvenliğinin sağlanması amacıyla kullanılan ve günden güne geliştirilmeye de devam edilen önemli araçlardan biridir. STS de temel amaç belirli bir bilgisayar ağına odaklanarak, ağda meydana gelen trafiğin incelenip yorumlanması ve şüpheli hareketlerin tanımlanarak bunun bir ağ saldırısı olup olmadığının tespit edilmesidir. Bilgisayar ağlarındaki bahsedilen bu şüpheli hareketler ve oluşan olağan dışı trafik anomali olarak adlandırılır. Anomali tespit yaklaşımındaki temel amaç da zaten bu olağan dışı trafiğin tanımlanarak saldırının tespit edilmesidir.

Yapılan bu çalışmada ağ saldırılarının tespitinde başarı oranının artırılması ve yeni saldırı tiplerinin tespit edilmesi amacıyla Makine Öğrenmesi temeline dayalı anomali tespiti yaklaşımıyla bir STS oluşturma amaçlanmıştır. Konuyla ilgili olarak hazır bir veri seti üzerinde özellik seçimi ve sınıflandırma deneyleri yapılmış ve sonuçlar raporlanmıştır.

## 2. Literatür Özeti

STS, bilgisayar ağlarına yapılan saldırı türlerine göre farklı niteliklere sahip olabilmeleri açısından sürekli değişim ve gelişim halindedir. Saldırı türleri değiştikçe, oluşturulacak olan STS de yeni saldırı türlerini tespit edebilmesi açısından farklı niteliklere gereksinim duyar. Bu nedenle geçmişten beri bu alanda yapılan birçok çalışma mevcut olmakla birlikte yeni çalışmalara ve farklı tekniklere duyulan ihtiyacın da devam etmesi kaçınılmazdır. Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Jabez ve Muthukumar (2015) saldırı tespiti konusunda yaptıkları çalışmada Aykırılık Tespiti adını verdikleri yeni bir yaklaşım önermektedir. Bu yaklaşıma göre anomali veri seti Komşuluğa Aykırı Faktör (Neighborhood Outlier Factor) ile ölçülmektedir. KDD veri setinin kullanıldığı bu çalışmada önerilen yaklaşımın var olan saldırı tespit sistemlerine göre daha az yürütme zamanında

çalıştığı ve daha çok anomali veriyi tespit edebildiği ortaya konulmuştur.

Aljawarneh vd. (2018)'e göre etkin bir şekilde ağ saldırılarının tespitinin yapılabilmesi için verilerin son derece hassas bir şekilde toplanması gerekmektedir. Yazarlar, bu çalışmada saldırı kapsamının eşik değerini, ağ işlemlerindeki verilerin eğitim için kullanıma sunulan özelliklerinden en uygun olanlarına göre değerlendirmek için yeni bir hibrit model geliştirmişlerdir. Bu hibrit model J48, Rastgele Orman, Naive Bayes, DecisionStump ve AdaBoost sınıflayıcılarını bünyesinde barındırmaktadır. NSL-KDD veri setindeki anlamlı özelliklerin ortaya çıkarılmasında Bilgi Kazanımı ve Oylama şemaları kullanılarak sonuçta ikili sınıflar için %99,81 ve çoklu sınıflar için ise %98,56'lık oranda saldırıları doğru tespit etme başarıları yakalanmıştır.

Yıldırım vd. (2014) ise yaptıkları çalışmada KDD Cup 99 veri seti üzerinde çok katmanlı yapay sinir ağı kullanarak bir STS modeli oluşturmuşlardır. Oluşturulan modelin eğitim setindeki başarıları %99, test setindeki başarıları ise %90,61 olarak ölçülmüştür.

Alamiedy vd. (2019) yaptıkları çalışmada Çok Katmanlı Gri Kurt Optimizasyon Algoritmasını kullanarak NSL-KDD veri setindeki en anlamlı özellikleri seçmiş ve çeşitli sınıflayıcılarla bir STS modeli oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda veri setindeki özellik sayısının azaltılmasının başarı oranını artırdığı gözlenmiştir.

Chen vd. (2017) yeni saldırı tiplerinin tespiti için denetimsiz öğrenme tekniklerine dayalı bir STS yaklaşımını önermişlerdir. Çalışmanın kümeleme aşamasında DBSCAN, One-SVM, Agglomerative Clustering ve Expectation-Maximization modelleri kullanıldıktan sonra oylama modeli ile tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışma sonucunda Hatalı-Pozitif (FP) metriğine göre geleneksel yöntemlere oranla önerilen sistemin daha başarılı olduğu görülmüştür.

Kumar vd. (2020) tarafından CICIDS 2017 veri seti üzerinde yapılan çalışmada Rastgele Orman

algoritmasına dayalı olarak özellik seçimi yapılmış ve ardından Karar Ağacı, Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağı, Naive Bayes ve Topluluk Öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırmışlardır. Çalışma sonucuna göre en yüksek sınıflandırma doğruluğu Karar Ağacı algoritmasıyla elde edilmiştir.

Ran vd. (2019) Aegean Wi-Fi Intrusion Dataset (AWID) veri seti üzerinde hem denetimli öğrenme hem de denetimsiz öğrenme teknikleri kullanarak iki aşamalı bir saldırı tespit sistemi önermişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında daha önce etiketlenmiş veriler denetimli öğrenme teknikleri ile ikinci aşamasında ise etiketsiz veriler denetimsiz öğrenme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda ortaya çıkan %98,54'lük genel başarı oranı bu karma modelin başarısına etki etmiştir.

Satam ve Hariri (2020) yaptıkları çalışmada kablosuz ağlarda saldırı tespiti yaparken anomali davranış analizi yaklaşımıyla yüksek doğruluk oranı elde edebileceklerini göstermişlerdir. İlgili çalışmada Arizona Üniversitesi kablosuz ağlarından alınan yerel veri setleri üzerinde n-gram analizi yöntemi kullanılarak yanlış tespit oranını 0,0174 gibi çok düşük bir orana indirmişlerdir.

Abdel-Aziz vd. (2013) yaptıkları çalışmada iletişim ağlarındaki anomalilerin tespitinde genetik algoritmaları ve Temel Bileşen Analizi (PCA) kullanılarak veri setlerindeki en anlamlı özelliklerin ortaya çıkarılması gerektiğini savunmuşlardır. Ortaya çıkarılan özelliklere dayalı olarak sınıflandırma yapıldıktan sonra NSL-KDD veri seti üzerinde daha önceden bilinen saldırılarda en etkili sınıflayıcının Naive Bayes, tanımlanmamış saldırıların tespitinde en etkili sınıflayıcının ise J48 olduğunu ortaya koymuşlardır.

Jose vd. (2018) yaptıkları çalışmada saldırı tespit sistemlerinde anomali tespit yaklaşımı ve bu yaklaşımın nasıl uygulanabileceği hususunda çeşitli bilgilere yer vermişlerdir. Mevcut tekniklerin incelendiği çalışmada, saldırı tespit sisteminin kullanım yeri ve sistemden beklentilere göre doğru tekniğin seçilmesinin önemi vurgulanmıştır. Saldırı tespit sistemlerinde anomali tespiti yaklaşımının en

büyük avantajının yeni saldırı tiplerinin sisteme tanımlanmasına gerek olmadığı hususu üzerinde durulmuştur.

Karataş ve Şahingöz (2018) ise yapay sinir ağları tabanlı, çok katmanlı bir saldırı tespit sistemi oluşturarak KDD Cup 99 veri seti üzerinde “trainc, trainlm, trainbfg, trainscg, traincgp, trainoss, trainbr, trainr” eğitim fonksiyonlarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Doğru-Pozitif (TP) metriğinin ölçek olarak kabul edildiği çalışmanın sonucuna göre en hızlı uygulama zamanı “trainscg” fonksiyonu ile, en düşük hata oranı ise “trainlm” fonksiyonu ile elde edilmiştir.

Zhou vd. (2020) özellik seçimi ve topluluk öğrenmesine dayalı sınıflayıcıları temel alarak verimli bir saldırı tespit sistemi üzerinde yoğunlaşmışlardır. Çalışmanın özellik seçimi aşamasında Korelasyon Tabanlı Özellik Seçimi (CFS) ve Yarasa Algoritması (BA) beraber kullanılmıştır. CFS, sezgisel değerlendirmelerin sonuçlarına göre özelliklerin seçildiği klasik bir filtre algoritması olup, BA ise küçük yarasaların ekolojik konumlanma davranışlarından esinlenerek oluşturulan bir algoritmadır. Sınıflandırma aşamasında ise C4.5, Rastgele Orman ve Cezalandırılan Özellikler ile Karar Ağacı algoritmaları kullanılmıştır. CICIDS 2017 veri seti üzerinde yapılan çalışmada belirtilen algoritmalar ayrı ayrı ve daha sonrasında ise topluluk halinde kullanılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, yapılan bu çalışmanın en iyi sonucunun topluluk öğrenme algoritmalarıyla sağlandığı ortaya konulmuştur.

Shaukat vd. (2020) yaptıkları çalışmada, ağ güvenliği ve saldırı sınıflandırmasında kilit rol oynayan makine öğrenmesi tekniklerinden Naive Bayes ve J48 Karar Ağaçları algoritmalarını karşılaştırmışlardır. CICIDS 2017 veri seti üzerinde gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında, veri setindeki tüm özellikler herhangi bir eleme işlemine tabi tutulmadan kullanılmış, ikinci aşamada ise Sarmalayıcı Özellik Seçimi tekniğine göre veri setini 8 özellik seçerek indirgemişlerdir.

Fernandez ve Xu (2019) hem denetimli ağ saldırı tespitinde hem de denetimsiz anomali tespitinde derin öğrenmenin kullanılmasıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Yazarlar öncelikli olarak ileri beslemeli tam bağlı bir derin sinir ağı oluşturarak (DNN) denetimli öğrenme yolu ile ağ saldırı sistemini eğitmeyi daha sonra ise etiketlenmemiş zararlı ağ trafiği verilerini ise denetimsiz öğrenme yoluyla bir otomatik kodlayıcı ile sınıflandırmayı amaçlamışlardır. CICIDS 2017 veri setinin kullanıldığı çalışmada Derin Sinir Ağının (DNN) saldırı tespitinde diğer makine öğrenmesi tekniklerinden daha iyi bir performans sağladığı ortaya çıkarılmıştır.

### 3. Materyal ve Metot

Literatürde bahsi geçen çalışmalar, makine öğrenmesi tekniklerinin bilgisayar ağlarına yapılan saldırıların tespit edilmesinde kullanılmasının bu alanda başarıyı artırma hususunda güçlü bir potansiyelinin olduğunu göstermektedir. Saldırı türlerinin günden güne değişmesi ve makine öğrenmesi tekniklerinin de geniş yelpazesi nedeniyle bu alanın sürekli olarak yeniliğe ve gelişime açık olduğu görülmektedir. Etkin ve verimli bir saldırı tespit sistemi oluşturmak için anomali tespiti yaklaşımıyla saldırıların tespitinin sağlanması prensibinin benimsendiği bu çalışma ise içerdiği makine öğrenimi teknikleri ve hibrit öznitelik seçimiyle bu alanda daha sonra yapılacak çalışmalarda araştırmacılara fikir verecektir. Çalışmanın temel aşamaları şu şekilde sıralanabilir:

- Veri setinin ön işlemden geçirilmesi
- Sınıflandırma için en uygun özniteliklerin seçimi
- Verilerin sınıflandırılması
- Sonuçların değerlendirilmesi

Çalışma sürecinde yapılan tüm deneyler “Python” dilinde “Spyder” tümleşik geliştirme ortamında gerçekleştirilmiştir.



### 3.1 Veri Seti

Çalışmada, Kanada Siber Güvenlik Enstitüsü tarafından oluşturulan ve güncel saldırı senaryolarını bünyesinde barındıran Canadian Institute of Cybersecurity Intrusion Detection System 2017 (CICIDS2017) isimli veri seti kullanılmıştır. CICIDS2017 boyutu ve içeriği ile ağ saldırılarının önlenmesi hususunda oluşturulacak olan yeni modellerin ve algoritmaların analizi açısından yeterli bir veri setidir. Veri seti, toplamda 8 ayrı dosyadan oluşmakta ve Kanada Siber Güvenlik Enstitüsünün 5 günlük normal ve saldırı durumundaki ağ trafiğinin kayıtlarını içermektedir. Çizelge 1’de veri setini oluşturan dosyalar hakkında kısa bilgiler görülmektedir.

**Çizelge 1.** Veri setinde bulunan dosyalar.

Dosya Adı	Günlük Aktivite	Oluşan Aktivite
Monday-WorkingHours.pcap_ISCX.csv	Pazartesi	Normal ağ trafiği
Tuesday-WorkingHours.pcap_ISCX.csv	Salı	Normal ağ trafiği ve FTP-Patator, SSH-Patator saldırıları
Wednesday-workingHours.pcap_ISCX.csv	Çarşamba	Normal ağ trafiği ve DoS GoldenEye, DoS Hulk, DoS Slowhttptest, DoS slowloris, Heartbleed saldırıları
Thursday-WorkingHours-Morning-WebAttacks.pcap_ISCX.csv	Perşembe	Normal ağ trafiği ve Web Attack – Brute Force, Web Attack – Sql Injection, Web Attack – XSS saldırıları
Thursday-WorkingHours-Afternoon-Infiltration.pcap_ISCX.csv	Perşembe	Normal ağ trafiği ve Infiltration saldırısı
Friday-WorkingHours-Morning.pcap_ISCX.csv	Cuma	Normal ağ trafiği ve Bot saldırısı
Friday-WorkingHours-Afternoon-PortScan.pcap_ISCX.csv	Cuma	Normal ağ trafiği ve PortScan saldırısı
Friday-WorkingHours-Afternoon-DDos.pcap_ISCX.csv	Cuma	Normal ağ trafiği ve DDoS saldırısı

Çizelge 1’de gösterilen bu dosyalar birleştirildiğinde 3119345 örnek, 1’i normal ağ trafiğini gösterir şekilde toplam 15 adet sınıf etiketi ve 83 farklı özneliği bünyesinde barındıran geniş bir veri seti ortaya çıkmaktadır (Panigrahi ve Borah 2018). Etiketlenmiş 15 adet sınıfa ait veri setinde örneği

bulunan kayıtların dağılımı da Çizelge 2’de görülmektedir.

**Çizelge 2.** Veri setinde örnek dağılımları

Sınıf Etiketi	Örnek Sayısı
BENIGN (Normal)	2359087
DoS Hulk	231072
PortScan	158930
DDoS	41835
DoS GoldenEye	10293
FTP-Patator	7938
SSH-Patator	5897
DoS slowloris	5796
DoS Slowhttptest	5499
Bot	1966
Web Attack – Brute Force	1507
Web Attack – XSS	652
Infiltration	36
Web Attack – Sql Injection	21
Heartbleed	11

### 3.2 Veri Ön İşleme

Ön işleme aşamasında, veri setinde bulunan kayıtlardan sonsuz ya da anlamsız değerlere sahip olanlar tespit edilerek silinmiştir. Daha sonra herhangi bir değere sahip olmayan kayıtlar da çalışmada tutarlılığın sağlanması açısından silinmiştir. Son işlem olarak saldırının olup olmadığını belirlenebilmesi amacıyla kayıtların ikili sınıflandırmaya tabi tutulabilmesi için “Benign” etiketine sahip veriler “0”, diğer tüm saldırı tipleri ise “1” olarak güncellenmiştir.

### 3.3. Öznelik Seçimi

Özneliklerin seçimi, üzerinde çalışılan örneği belirli kriterlere göre en iyi temsil edebilecek özneliklerin mevcut öznelik kümesi içerisinde seçilmesi işlemi iken, öznelik çıkarılması ise yeni bir öznelik uzayı oluşturmak amacıyla mevcut bilgilere dönüştürme işlemi uygulanmasıdır (Küçükşille ve Ateş 2016).

Çalışmada kullanılan veri setinde 83 farklı öznelik bulunmaktadır. Oluşturulacak olan saldırı tespit sisteminde ağ trafiğinin izlenerek saldırı tespitinin başarı oranının artırılması ve çalışma zamanının da buna bağlı olarak mümkün olduğunca kısa tutulması amacıyla mevcut 83 farklı özneliğin sayısının indirgenmesi gerekmektedir. Bu indirgeme işlemi sırasında sınıflandırma işleminde en başarılı sonuçları sağlayacak, sınıflandırma için en anlamlı özneliklerin korunarak, sınıflandırma sürecinde

pek de etkisi olmayan özneliklerin veri seti dışarısında bırakılmasına dikkat edilmiştir.

Saldırı tespitinde en anlamlı özneliklerin seçilmesi adına çalışma boyunca farklı teknikler uygulanıp sonuçları değerlendirilmiştir. Öncelikle öznelik seçim tekniklerinden biri olan Özyinelemeli Özellik Seçimi (RFE)(Recursive Feature Elimination) tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte veri seti alt kümeler halinde istenilen bir denetimli öğrenme tekniği ile değerlendirilerek her alt kümenin en az değerli özelliği bulunarak küme dışına itilir ve bu işlem özyinelemeli olarak istenilen sayıda özellik kalana kadar devam eder (Int Kyn. 1). Çalışmada, Rastgele Orman (RF) denetimli öğrenme tekniği kullanılarak oluşturulan RFE modeli ile öznelik sayısının 20'ye indirgenmesi sağlanmıştır.

Elde edilen 20 öznelik ise İleri Yönelimli Seçim (Forward Selection)(FS) tekniği kullanılarak tekrar öznelik seçim işlemine tabi tutulmuştur. Bu teknikte belirlenen bir p eşik değeri baz alınarak en başta boş küme olarak belirlenen özellikler kümesine adım adım özellik seçilir (Int Kyn. 2). Özelliklerin değerlerinin hesaplanmasında ise Sıradan En Küçük Kareler (Ordinary Least-Squares Model)(OLS) modeli kullanılır. Bu hesaplama tekniği ise bir veya daha fazla açıklayıcı değişken ile karesel hataların toplamını (buradaki hata kavramı sonuç değişkeninin tahmin edilen değeri ile gerçek değeri arasındaki farktır) en aza indiren sürekli veya en azından aralıklı sonuç değişkeni arasındaki ilişkiyi modeller (Zdaniuk 2014). Bu şekilde eşik değer altında kalan özellik kalmayana kadar adım adım devam eden işlemler sonucunda elde edilen özellikler veri setindeki en anlamlı öznelikler olarak öne çıkar. Çalışmada bu yöntemle 20 öznelik 16'ya düşürülmüştür.

Bunun dışında deney sayısını artırarak farklı öznelik gruplarının seçilmesinin ortaya çıkacak sınıflandırma başarısına etkisini gözlemleyebilmek için makine öğrenmesi teknikleri haricinde manuel seçim yöntemiyle de belirli öznelik grupları seçilerek sınıflandırma testlerine tabi tutulmuştur. Manuel öznelik seçimlerinde literatürde bulunan çalışmalarda kullanılan öznelikler, network

bilgisine dayalı olarak daha fazla öne çıktığı düşünülen öznelikler, ön çalışma sürecinde deneme-yanılma yoluyla elde edilen verilerde nispeten daha başarılı bulunan öznelikler ve CICIDS 2017 veri seti üzerinde öznelik önem dereceleri üzerinde yapılan çalışmalarda öne çıkan özneliklerin kombinasyonu ile oluşan gruplar dikkate alınmıştır.

### 3.4. Sınıflandırma

Öznelik çıkarma işleminden sonra veri setinden elde edilen özneliklere göre veri setinde ön işlemde geçirilen kayıtlar sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işleminden önce veri setindeki kayıtların %80'i oluşturulacak olan modelin eğitimi için, %20'si ise modelin test edilmesi için ayrılmıştır.

Çalışmada sınıflayıcı olarak Naive Bayes (NB), Logistic Regression (LR), Decision Tree (DT), Random Forest (RF) ve Extreme Gradient Boosting (XGB) algoritmaları kullanılmıştır.

## 4. Bulgular

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Karmaşıklık Matrisi (Confusion Matrix) ile Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F1 metriklerinden yararlanılmıştır. Karmaşıklık matrisinde TP(True Positive) doğru tahmin edilen pozitif verileri, TN(True Negative) doğru tahmin edilen negatif verileri, FP(False Pozitive) yanlış tahmin edilen pozitif değerleri ve FN(False Negative) ise yanlış tahmin edilen negatif değerleri temsil eder.

Doğruluk metriği (A), test aşamasında yapılan doğru tahminlerin sayısının toplam tahmin sayısına oranını ifade eder.

$$A = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

Kesinlik metriği (P), doğru tahmin edilen pozitif gözlem sayısının, pozitif olarak nitelendirilen tüm gözlem sayısına oranını gösterir.

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

Duyarlılık metriği (R), doğru tahmin edilen pozitif veri sayısının gerçekte ne kadar pozitif veri olarak tahmin edilmesi gereken veri sayısına oranıdır.

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

F1 metriği (F1 Score) ise Kesinlik ve Duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasını gösterir.

$$F1 = \frac{2 \times P \times R}{P+R} \quad (4)$$

Çalışmada öncelikli olarak iki aşamalı seçimle elde edilen 16 adet özneteliğe (Paketlere ait ortalama varış zamanı, Paketin ortalama uzunluğu, ilk pencere içinde ileri yönde gönderilen byte sayısı, ileri yönde gönderilen paketlerin toplam uzunluğu, Geri yönde gözlenen ortalama segment boyutu, Paket uzunluk varyansı, ilk pencere içinde geri yönde gönderilen byte sayısı, Paketin standart sapması, Paketin maksimum uzunluğu, Ortalama paket boyutu, Geri yönde paketlerin maksimum uzunluğu, Hedef port, Geri yönde paketlerin standart sapması, Geri yönde alt akıştaki byte sayısı, Geri yöndeki paketlerin toplam uzunluğu, Geri yönde paketlerin ortalama uzunluğu) dayalı sınıflandırma işlemleri uygulanmıştır. Sınıflayıcılara göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3 ve Çizelge 4'de gösterilmektedir.

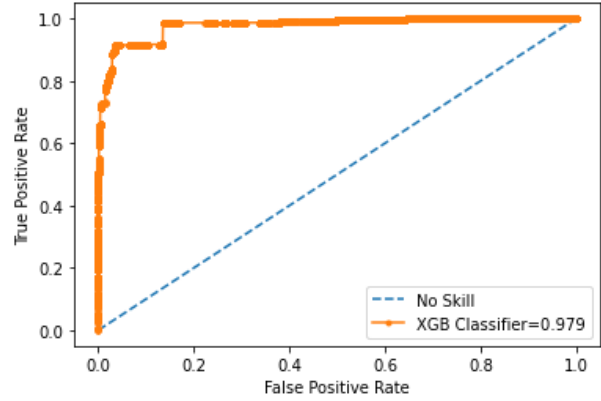
**Çizelge 3.** Birinci Sınıflandırmaya Ait Test Sonuçları

Sınıflayıcı	Doğruluk (Accuracy Score)	Kesinlik (Precision Score)	Duyarlılık (Recall Score)	F1 Score
XGB	0,93	0,93	0,93	0,92
NB	0,78	0,78	0,78	0,78
LR	0,89	0,89	0,89	0,88
DT	0,8	0,84	0,84	0,81
RF	0,94	0,93	0,93	0,93

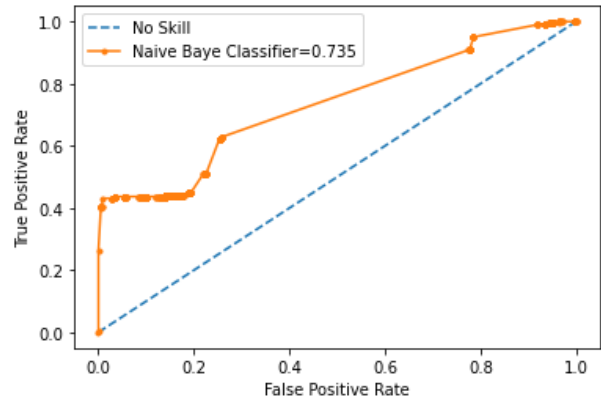
**Çizelge 4.** Birinci Sınıflandırmaya Doğrulama Sonuçları

Sınıflayıcı	Karmaşıklık Matrisi		Çapraz Doğrulama
	TP FP	FN TN	
XGB	453015	1113	0,99
	40879	70569	
NB	390178	63950	0,78
	62695	48753	
LR	447612	6516	0,89
	53854	57594	
DT	446331	7797	0,99
	81089	30359	
RF	447079	7049	0,98
	31206	80242	

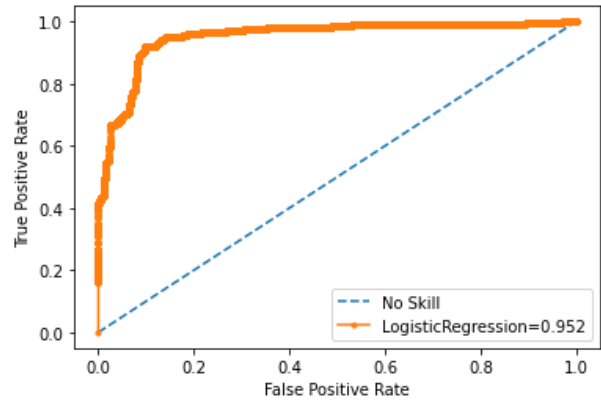
Birinci sınıflandırmada elde edilen verilere ait ROC eğrileri ise Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te görülmektedir.



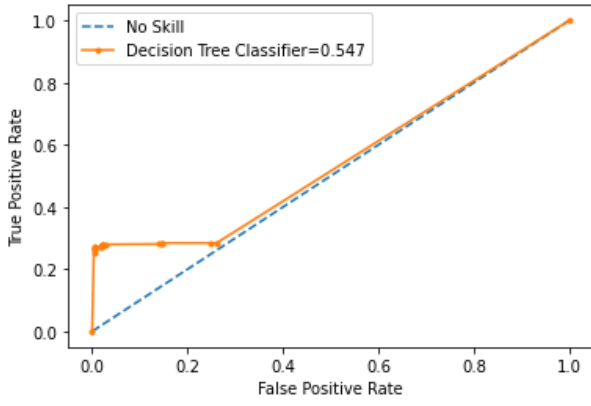
**Şekil 1.** Birinci Deneyde XGB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



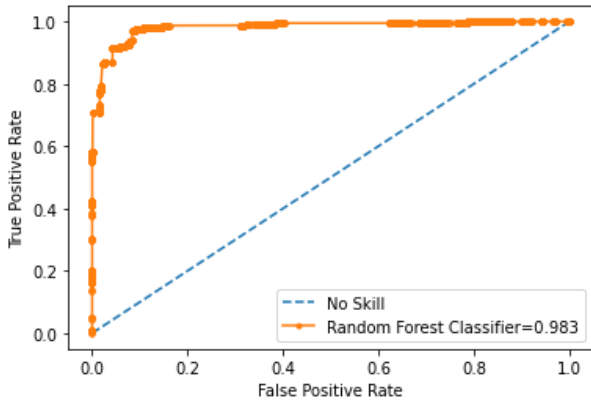
**Şekil 2.** Birinci Deneyde NB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



**Şekil 3.** Birinci Deneyde LR Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 4. Birinci Deneyde DT Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 5. Birinci Deneyde RF Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi

Bir diğer deneyde ise manuel olarak seçilen 14 adet özneliğe (İleri yönde maksimum paket uzunluğu, İleri yönde paketlerin uzunluklarının standart sapması, Paketlerin en uzun varış zamanı, Paketlerin en kısa varış zamanı, Paketlerin ortalama varış zamanı, İleri yönde gönderilen iki paket arasındaki maksimum zaman, İleri yönde gönderilen iki paket arasındaki minimum zaman, İleri yönde gönderilen iki paket arasındaki ortalama zaman, Maksimum paket uzunluğu, Paket ortalama uzunluğu, Bir paketin uzunluk varyansı, İndirme/yükleme oranı, Ortalama paket boyutu, Paketin aktif hale gelmeden önce boşta kaldığı zaman) göre sınıflandırma işlemleri yapılmıştır. Sınıflandırma işlemlerine ait sonuçlar Çizelge 5 ve Çizelge 6'da gösterilmektedir.

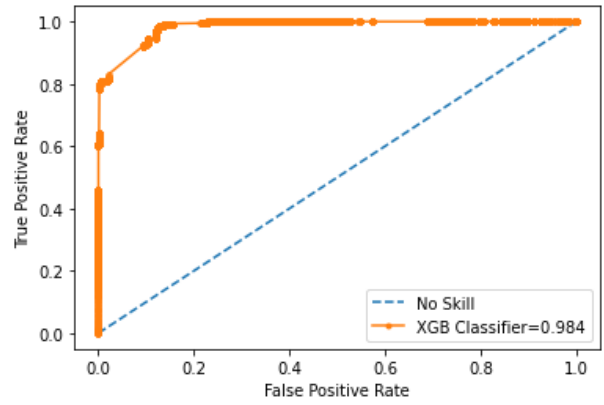
Çizelge 5. İkinci Sınıflandırmaya Ait Test Sonuçları

Sınıflayıcı	Doğruluk (Accuracy Score)	Kesinlik (Precision Score)	Duyarlılık (Recall Score)	F1 Score
XGB	0,92	0,93	0,92	0,91
NB	0,73	0,76	0,73	0,74
LR	0,88	0,89	0,89	0,87
DT	0,89	0,9	0,89	0,88
RF	0,92	0,93	0,92	0,92

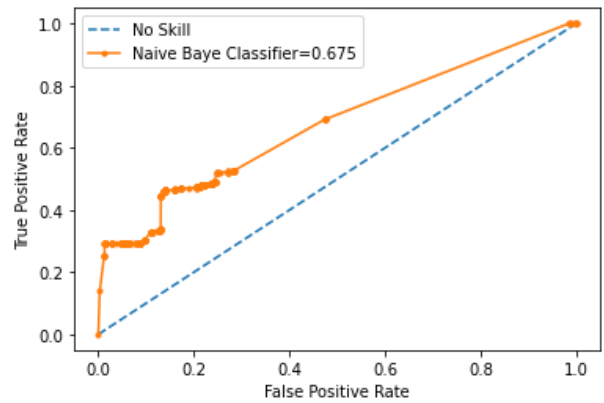
Çizelge 6. İkinci Sınıflandırmaya Ait Doğrulama Sonuçları

Sınıflayıcı	Karmaşıklık Matrisi		Çapraz Doğrulama
	TP	FP	
XGB	453986	142	0,98
	43976	67472	
NB	360981	93147	0,73
	58405	53043	
LR	451711	2417	0,88
	61972	49476	
DT	452974	1154	0,98
	59895	51553	
RF	453513	615	0,96
	42855	68593	

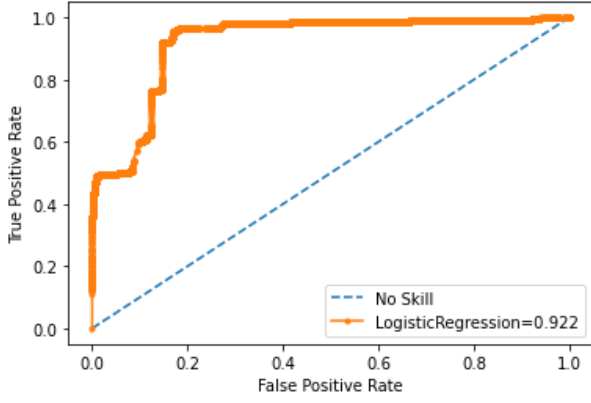
İkinci sınıflandırmada elde edilen verilere ait ROC eğrileri ise Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da görülmektedir.



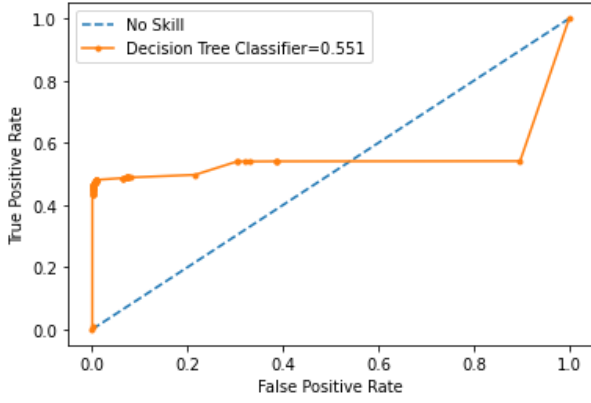
Şekil 6. İkinci Deneyde XGB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



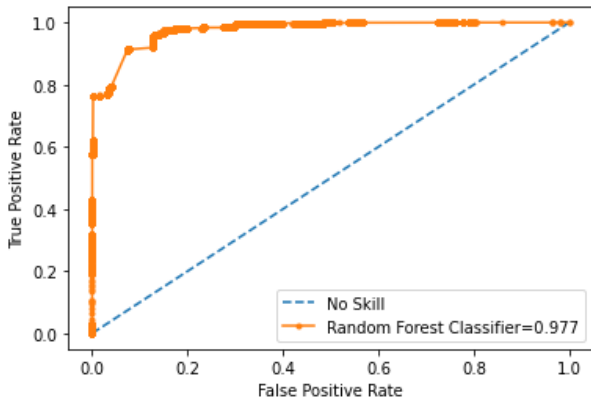
Şekil 7. İkinci Deneyde NB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 8. İkinci Deneyde LR Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 9. İkinci Deneyde DT Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 10. İkinci Deneyde RF Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi

Son deneyde ise yine manuel olarak daha az sayıda öznelik seçilmiştir. Seçilen 8 adet özneliğe (Akış süresi mikrosaniye, Geri yöndeki paketlerin maksimum uzunluğu, Geri yöndeki paketlerin minimum uzunluğu, Geri yöndeki paketlerin ortalama uzunluğu, Minimum paket uzunluğu, PUSH bulunan paket sayısı, URG içeren paket sayısı, Geri yönde gözlenen ortalama segment boyutu) göre yapılan sınıflandırma işleminin sonuçları Çizelge 7 ve Çizelge 8’de verilmiştir.

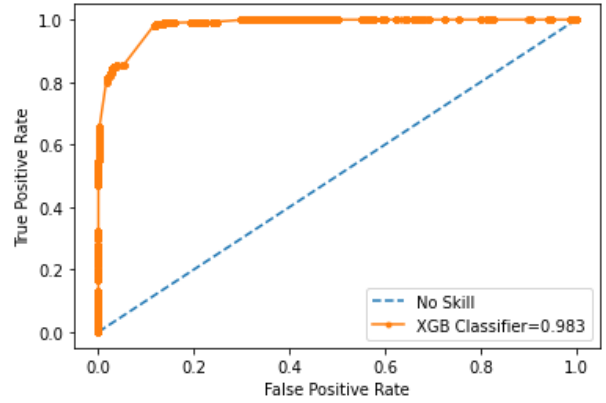
Çizelge 7. Üçüncü Sınıflandırmaya Ait Test Sonuçları

Sınıflayıcı	Doğruluk (Accuracy Score)	Kesinlik (Precision Score)	Duyarlılık (Recall Score)	F1 Score
XGB	0,93	0,93	0,93	0,92
NB	0,75	0,77	0,75	0,76
LR	0,88	0,88	0,88	0,86
DT	0,94	0,94	0,94	0,94
RF	0,93	0,93	0,93	0,93

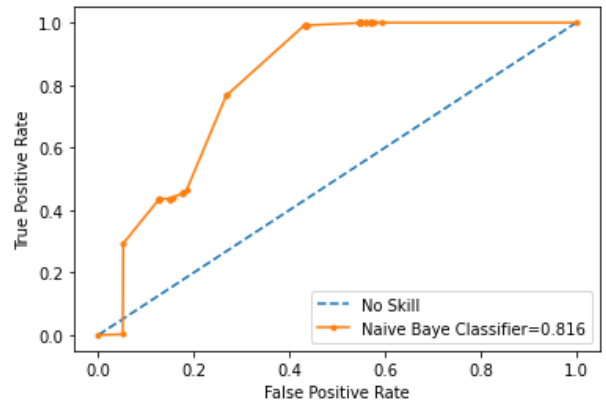
Çizelge 8. Üçüncü Sınıflandırmaya Ait Doğrulama Sonuçları

Sınıflayıcı	Karmaşıklık Matrisi		Çapraz Doğrulama
	TP	FP	
XGB	453514	614	0,96
	40174	71274	
NB	374540	79588	0,75
	60954	50494	
LR	447310	6818	0,87
	62974	48474	
DT	445940	8188	0,95
	24747	86701	
RF	446712	7416	0,93
	31826	79622	

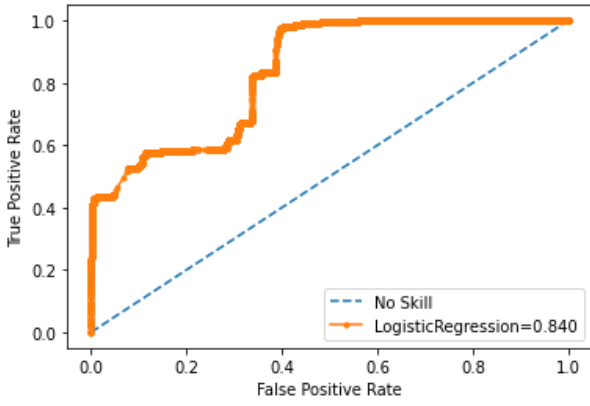
Üçüncü sınıflandırma deneyinde elde edilen verilere ait ROC eğrileri ise Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15’te görülmektedir.



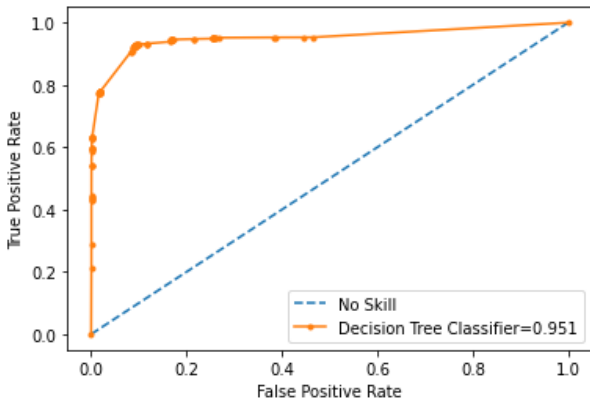
Şekil 11. Üçüncü Deneyde XGB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



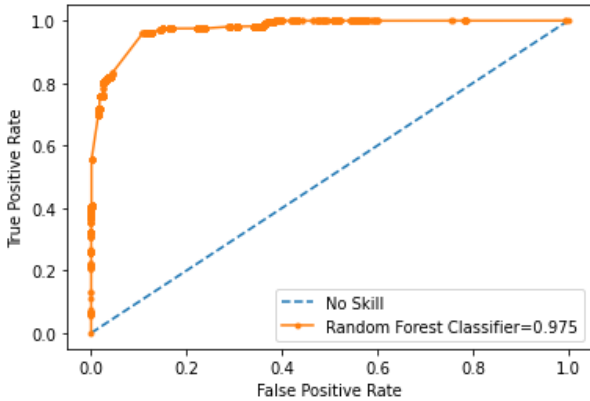
Şekil 12. Üçüncü Deneyde NB Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 13. Üçüncü Deneyde LR Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 14. Üçüncü Deneyde DT Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi



Şekil 15. Üçüncü Deneyde RF Sınıflayıcısına Ait ROC Eğrisi

#### 4.1. Farklı Öznitelik Gruplarıyla Yapılan Deney Sonuçlarının Tartışılması

Çalışma sürecinde elde edilen bulgular incelendiğinde hibrit yaklaşımla yapılan öznitelik seçimi sonrasında gerçekleştirilen sınıflandırma işlemlerinde Doğruluk metriğine göre en başarılı sonuç (0,94) RF sınıflayıcısı ile, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 metriklerine göre en başarılı sonuçlar ise (0,93) hem RF hem de XGB sınıflayıcıları ile elde edilmiştir.

Çalışmada manuel olarak seçilen ilk öznitelik grubu ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarına göre ise Doğruluk, Kesinlik ve Duyarlılık metriklerinde en başarılı sınıflayıcılar (0,93) XGB ve RF olurken, F1 metriğine göre ise en başarılı sonuçlar (0,92) RF sınıflayıcısı ile elde edilmiştir.

Çalışmanın manuel olarak seçilen son öznitelik grubu ile yapılan testlerde ise Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 metriklerinin tamamında en başarılı sonuçlara (0,94) DT sınıflayıcısı ile ulaşılmıştır.

Oluşturulan modellerin ne kadar iyi çalıştığını görmek için ise Çapraz Doğrulama (Cross Validation) işlemi uygulanmış ve ROC eğrileri oluşturulmuştur. Deneylerde öne çıkan XGB, RF ve DT sınıflayıcıları ile oluşturulan modellerin Çapraz Doğrulama sonuçları incelendiğinde, bu sonuçların son derece başarılı olduğu gözlemlenmektedir.

ROC eğrisinde ise değişik eşik değerlerine göre yatay ekseninde yanlış pozitiflik (özgüllük) oranı bulunurken, dikey ekseninde ise doğru pozitiflik (duyarlılık) oranı yer alır. ROC eğrisi üzerindeki her nokta, farklı eşik değerlerine karşılık gelen duyarlılık ve özgüllük değerlerini ortaya koyar. Genelde düşük yanlış pozitiflik oranlarını veren eşik değerleri, düşük doğru pozitiflik oranına da sahiptir. Doğru pozitiflik oranı arttıkça, yanlış pozitiflik oranı da artar (Tomak ve Bek 2011). Deney sürecinde yapılan sınıflandırmalara ait ROC Eğrileri incelendiğinde ise XGB, LR ve RF sınıflayıcıları ile yapılan çalışmaların daha doğru sonuçlar verdiği görülmektedir.

Deneylere ait Çapraz Doğrulama ve ROC Eğrileri birlikte incelendiğinde ise XGB ve RF sınıflayıcılarının bahsedilen her iki analize göre de çok başarılı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Bu da modellerin gösterdiği sınıflandırma sonuçlarının rastlantısal olarak değil gerçekten stabil bir modele göre tutarlı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermektedir.

## 5. Sonuç

Bilgisayar ağlarına yönelik saldırıların önlenmesi, ilgili ağlarda ortaya çıkabilecek güvenlik zafiyetlerine

tedbir alınması ve daha çok kullanıcıların oluşturduğu güvenlik açıklarının kapatılmasıyla mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte teknolojinin gelişimine paralel olarak artan kullanıcı sayıları ve uygulama çeşitliliği bu durumu zorlaştırmakta ve yapılan saldırı türlerini artırmaktadır. Sürekli gelişim ve değişim içinde olan bu konsept nedeniyle saldırı tespit ve önleme sistemleri de günden güne değişmekte ve gelişmektedir.

Yapılan bu çalışmayla ağlara yapılan saldırıların tespiti ve saldırı nedeniyle oluşabilecek her türlü zararın minimize edilebilmesi için ağ yönetimiyle ilgili ve yetkili kişilerin uyarılmasını sağlayacak olan bir karar destek modelinin oluşturulması üzerine bir araştırma yapılmıştır. Saldırı tespit sürecinde insan müdahalesinin olabildiğince az, makine öğrenmesi esaslarına dayanan ve ağ trafiğindeki olağan dışı hareketleri önceden tanımlanması gerek kalmadan yorumlayabilen bir sistem hedeflenmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında saldırı tespitinde kullanılacak olan özneliklerin en iyi şekilde seçilmesi gerektiği görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde öznelik seçimi ve sınıflandırma aşamalarında benzer teknikler kullanıldığı görüldüğü de bu çalışmada önerilen iki aşamalı hibrit öznelik seçim yönteminin RF ve özellikle son yıllarda popüler olan XGB algoritmalarıyla birlikte saldırı tespitinde başarı oranını artırdığı anlaşılmaktadır. Daha çok deney tecrübesi ile manuel olarak seçilen daha az üyeye sahip öznelik gruplarında ise DT algoritmasının bir miktar öne çıktığı görüldüğü de hedeflenen modelde insan müdahalesinin minimize edilebilmesi için önerilen hibrit öznelik seçim tekniği ve XGB, RF algoritmalarıyla yapılan saldırı tespitinin daha uygun olduğu tavsiye edilmektedir.

STS'lerde daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan tekniklere nazaran hibrit öznelik seçimi ve XGB algoritmasıyla yapılan sınıflandırma işleminin fark yarattığı düşünülmektedir. Çalışma sürecinde üzerinde çalışılan CICIDS2017 veri seti her ne kadar geniş ve kapsamlı olsa da gelecekte daha nitelikli dengeli şekilde oluşturulacak olan veri setleri

üzerinde seçilen öznelikler ve eğitilen modeller ile daha etkili sonuçlar alınacağı öngörülmektedir.

## 6. Kaynaklar

- Abdel-Aziz, A.S., Hassanien, A.E., Azar, A.T. and Hanafi, S.E., 2013. Machine Learning Techniques for Anomalies Detection and Classification, *International Conference on Security of Information and Communication Networks*, 25-27 September, 2013, 219-229, Sydney-Australia.
- Alamiedy, T.A., Anbar, M., Alqattan, Z.N.M. and Alzubi, Q.M., 2019. Anomaly-Based Intrusion Detection System Using Multi-Objective Grey Wolf Optimization Algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **11**, 3735–3756.
- Aljawarneh, S., Adlwairi, M. and Yassein, M.B., 2018. Anomaly-based intrusion detection system through feature selection analysis and building hybrid efficient model. *Journal of Computational Science*, **25**, 152–160.
- Chen, W., Mei, F., Kong, F., Yuan, G. and Li, B., 2017. A Novel Unsupervised Anomaly Detection Approach for Intrusion Detection System. *2017 IEEE 3rd International Conference on Big Data Security on Cloud (Bigdata Security), High Performance and Smart Computing (HPSC) and Intelligent Data and Security (IDS)*, 26-28 May, 2017, 69-73, Beijing-China.
- Fernandez, G.C. and Xu, S., 2019. A Case Study on Using Deep Learning for Network Intrusion Detection. *2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 12-14 November 2019, 1-6, Norfolk-VA-USA.
- Jabez, J. and Muthukumar, B., 2015. Intrusion Detection System (IDS): Anomaly Detection using Outlier Detection Approach. *Procedia Computer Science*, **48**, 338-346.
- Jose, S., Malathi, D., Reddy, B. and Jayasseeli, D., 2018. A Survey on Anomaly Based Host Intrusion Detection System, *National Conference on Mathematical Techniques and its Applications (NCMTA 18)*, 5-6 January 2018, 12-49, Kattankulathur-India.
- Karataş, G. and Şahingöz, Ö.K., 2018. Neural Network Based Intrusion Detection Systems with Different Training Functions, *2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)*, 22-25 March 2018, 1-6, Antalya-Türkiye.
- Kumar, V., Choudhary, V., Sahrawat, V. and Kumar, V., 2020. Detecting Intrusions and Attacks in the Network Traffic using Anomaly based Techniques, *Proceedings*

of the Fifth International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2020), 10-12 June 2020, 554-560, Coimbatore-India.

Küçüksille, E.U. ve Ateş, N., Destek Vektör Makineleri ile Yaramaz Elektronik Postaların Filtrelenmesi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, **6 (1)**, 2016.

Panigrahi, R. and Borah, S., 2018. A detailed analysis of CICIDS2017 dataset for designing Intrusion Detection Systems, *International Journal of Engineering & Technology*, **7**, 479-482.

Ran, J., Ji, Y. and Tang, B., 2019. A Semi-Supervised Learning Approach to IEEE 802.11 Network Anomaly Detection, *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, 28 April – 1 May, 2019, 1-5, Kuala Lumpur-Malaysia.

Satam, P. and Hariri, S., 2020. WIDS: An Anomaly Based Intrusion Detection System for Wi-Fi (IEEE 802.11) Protocol, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, **18(1)**, 1077-1091.

Shaukat, S., Ali, A., Batool, A., Alqahtani, F., Khan, J.S. and Ahmad, J., Intrusion Detection and Attack Classification Leveraging Machine Learning Technique, 14th International Conference on Innovations in Information Technology (IIT), Al Ain-United Arab Emirates, 198-202, 17-18 November, 2020.

Tomak, L. ve Bek, Y., 2021. İşlem Karakteristik Eğrisi Analizi ve Eğri Altında Kalan Alanların Karşılaştırılması. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Deneysel ve Klinik Tıp Dergisi*, **27 (2)**.

Yıldırım, M.Z., Çavuşoğlu, A., Şen, B. ve Budak, İ., 2014. Yapay Sinir Ağları ile Ağ Üzerinde Saldırı Tespiti ve Paralel Optimizasyonu. *XVI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, 5-7 Şubat, 2014, 671-677, Mersin-Türkiye.

Zdaniuk, B., 2014. Ordinary Least-Squares (OLS) Model, *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*, Editor: Michalos, A.C., Springer Netherlands, Dordrecht-Netherlands, 4515–4517.

Zhou, Y., Cheng, G., Jiang, S. and Dai, M., 2020. Building An Efficient Intrusion Detection System Based on Feature Selection and Ensemble Classifier, *Computer Networks*, **174**, 107247.

### **İnternet Kaynakları**

1-[https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature\\_selection.RFE.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.feature_selection.RFE.html), (18.02.2022)

2-<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2020/10/a-comprehensive-guide-to-feature-selection-using-wrapper-methods-in-python/>, (19.02.2022)



AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055103 (1028-1040)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055103 (1028-1040)

DOI: 10.35414/akufemubid.1117779

Araştırma Makalesi / Research Article

## Rüzgar Gücü Tahmininde Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi

Ece YAĞMUR<sup>1</sup>, Sercan YAĞMUR<sup>2</sup><sup>1</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Konya.<sup>2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya.e-posta: \*Corresponding author: [ecyagmur@ktun.edu.tr](mailto:ecyagmur@ktun.edu.tr). ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5865-3483>[syagmur@ktun.edu.tr](mailto:syagmur@ktun.edu.tr). ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5478-5451>

Geliş Tarihi: 17.05.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

### Öz

Sürdürülebilir gelişim için yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu kaynaklardan birisi de rüzgar enerjisidir. Rüzgarın stokastik yapısı nedeniyle rüzgar hızı ve rüzgar gücünün tahmini son yıllarda araştırmacılar tarafından oldukça ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. Yapılan çalışmada Türkiye’de yer alan bir rüzgar türbini için 2018 yılı boyunca SCADA sistemi ile elde edilen veri seti ile aynı konum için NASA tarafından paylaşılan meteorolojik veri seti kullanılarak rüzgar gücü tahmini gerçekleştirilmiştir. Girdi değişkenleri olarak SCADA sisteminden çekilen rüzgar hızı, rüzgar yönü ve teorik güç eğrisi; NASA sisteminden çekilen meteorolojik parametreler ve rüzgar gücüne ait geçmiş veriler kullanılmıştır. Modelde yer alan ve hesaplama karmaşıklığına neden olan gereksiz öznitelikler model performansını artırmak amacıyla sarmal seçim yöntemi ile modelden çıkarılmıştır. Sarmal seçim yöntemi olarak Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hem farklı makine öğrenme algoritmalarının tahmin gücü, farklı performans ölçütlerine göre karşılaştırılmış hem de öznitelik seçiminin modele etkisi değerlendirilmiştir. GA ile önerilen nihai modelde değişken sayısı 47’den 9’a indirgenerek gereksiz değişkenler modelden uzaklaştırılmış ve en az sayıda değişken ile R<sup>2</sup> değeri 0,98 olan güçlü bir tahmin modeli elde edilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Makine öğrenmesi;  
Rüzgar gücü;  
Yenilenebilir enerji;  
Öznitelik seçimi;  
Genetik algoritma

## Feature Selection by Genetic Algorithm for Wind Power Prediction

### Abstract

The need for renewable energy sources for sustainable development has been increasing every day. One of these sources is wind energy. Due to the stochastic nature of the wind, the estimation of wind speed and wind power has been a subject of great interest to researchers in recent years. In this study, wind power estimation was carried out for a wind turbine in Turkey, using the data set obtained by the SCADA system during 2018 and the meteorological data set shared by NASA for the same location. Wind speed, wind direction, and theoretical power curve were taken from the SCADA system as input variables; Meteorological parameters were taken from the NASA system and historical data of wind power were used. Unnecessary features in the model that cause computational complexity are removed from the model with the wrapper selection method to increase model performance. Genetic Algorithm (GA) was used as the wrapper selection method. In the study, the predictive power of different machine learning algorithms was compared according to different performance criteria and the effect of feature selection on the model was evaluated. In the final model proposed by GA, the number of variables was reduced from 47 to 9, unnecessary variables were removed from the model, and a strong prediction model with R<sup>2</sup> value of 0.98 was obtained with the least number of variables.

### Keywords

Machine learning;  
Wind power;  
Renewable energy;  
Feature selection;  
Genetic algorithm

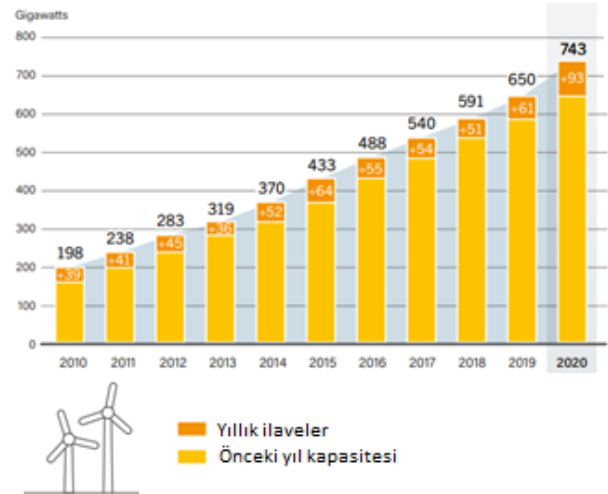
## 1. Giriş

Sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden bugünün ihtiyaçlarını karşılayarak kalkınma süreci olarak tanımlanmaktadır (WCED 1987). Özellikle doğal kaynakların azaldığı, çevresel problemlerin küresel boyuta ulaştığı günümüzde, sürdürülebilir gelişim, sadece bireysel sorumluluklarla değil, kolektif farkındalıklarla ulaşılabilen ve devamlılığı hem bizler hem de gelecek nesiller için oldukça önemli olan bir süreç haline gelmiştir. Ülkelerin sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda tüm dünyaya karşı üstlenmiş oldukları sorumlulukları düzenlemek ve takip etmek adına Montreal Protokolü (1987), Kyoto Protokolü (1997), Paris İklim Anlaşması (2015) gibi pek çok yasal düzenleme ve kurallar ortaya koyulmuştur. Bunun yanı sıra Birleşmiş Milletler (BM) tarafından, “Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları” adı altında 2030 yılına kadar ulaşılması planlanan on yedi küresel amacın ortaya konulduğu bir eylem planı gerçekleştirilmiştir (Int Kyn. 1). Sürdürülebilirliğin üç temel boyutu olan ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirliğin ele alındığı bu plan dahilinde her yıl ülke bazında sürdürülebilir kalkınma raporları paylaşmakta ve ulaşılan hedefler değerlendirilmektedir. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları’nda tanımlanan “Erişilebilir ve Temiz Enerji” (Amaç 7) için Şekil 1’de görüldüğü gibi farklı hedefler geliştirilmiştir. Buna göre yenilenebilir enerjinin küresel payının artırılması hedefi (Hedef 7.2) doğrultusunda güneş, rüzgar, jeotermal gibi doğal kaynaklardan elde edilen yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırım faaliyetlerinin artırılması planlanmaktadır.

Sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi için yapılan çalışmalar incelendiğinde 2010 - 2020 yılları arasında küresel rüzgar gücü kapasitesindeki artış Şekil 2’deki gibi raporlanmıştır. Aynı raporda 2020 yılı için Danimarka ‘da rüzgar enerjisinin elektrik üretimindeki payının %58’in üzerinde olduğu ve kurulu güç ilavesi bakımından da Türkiye’nin dünya sıralamasında ilk onda yer aldığı belirtilmiştir.



Şekil 1. Erişilebilir ve Temiz Enerji Hedefleri (BM) (Int Kyn. 2)



Şekil 2. Rüzgar enerjisi için küresel kapasite (2010-2020) (Int Kyn. 3)

Rüzgar enerjisine olan talebin artmasıyla birlikte literatürde farklı çalışma alanları ortaya çıkmıştır. Etkin enerji üretimi açısından, rüzgarın stokastik yapısı göz önünde bulundurulduğunda rüzgar gücü ve rüzgar hızının doğru tahmini önem arz etmektedir. Makine öğrenmesi ile önerilen tahmin modelleri, kendi kendine organizasyon mekanizması ve uyarlanabilir öğrenmenin avantajları nedeniyle

genellikle geleneksel istatistiksel yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir (Liu and Chen 2019).

Literatürde rüzgar hızı ve gücü tahmininde makine öğrenme yöntemlerinin kullanıldığı pek çok çalışma bulunmaktadır. Heinermann ve Kramer (2016), rüzgar gücü tahmini için karar ağaçları ve destek vektör regresyonunu kullanarak entegre bir model önermişlerdir. Demolli *et al.* (2019), Türkiye’de dört farklı bölgede yer alan rüzgar türbinleri için geçmiş dönemli rüzgar hızı verileri ile uzun dönemli rüzgar gücü tahmininde beş farklı makine öğrenme algoritmasının performansını karşılaştırmışlardır. Deng *et al.* (2021)’nin yapmış olduğu kaynak araştırmasında, 2012-2019 yılları arasında rüzgar gücü ile ilişkili olan ve Web of Science (WoS) Core Collection’da yer alan çalışmalar makine öğrenme teknikleriyle incelenerek oldukça fazla sayıdaki makale analiz edilmiş, araştırmacıların eğilimleri ve bölgesel dağılımları gösterilmiştir. Foley *et al.* (2012), rüzgar gücü için literatürde yer alan mevcut tahmin yöntemlerini araştırarak bazı rüzgar enerjisi yazılım modellerini listelemişler ve bu sektördeki yenilikleri analiz etmişlerdir.

Liu ve Chen (2019), yapmış oldukları çalışmada, rüzgar gücü tahmini ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun sadece geçmiş rüzgar hızı veya güç serilerini kullanmakta olduğunu ve meteorolojik koşullar gibi dış değişkenlerin tahmin modellerine eklenmesiyle modelin daha da güçlenebileceğini belirtmişlerdir. Ancak bireysel olarak iyi performans gösteren özelliklerin kombinasyonlarının modele nasıl etki edeceği belirsizdir. Bu nedenle bu dezavantajı gidermek ve gereksiz bilginin neden olduğu tahmin hatası ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak amacıyla boyut indirgeme yöntemleri kullanılmaktadır. Makine öğrenmesinde boyut indirgeme amacıyla kullanılan iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar öznitelik seçimi ve öznitelik çıkarımıdır. Öznitelik seçiminde belirli kriterlere göre mevcut özelliklerin bir alt kümesi seçilirken, öznitelik çıkarımında mevcut özelliklerden yeni öznitelikler üretilebilir. Literatürde rüzgar hızı ve gücü tahmini için öznitelik çıkarımına başvurulmuş pek çok çalışma bulunmaktadır (Higashiyama *et al.* 2018, Shi *et al.* 2019, Lu *et al.* 2021). Bu çalışmada ise boyut indirgeme yöntemi olarak öznitelik seçimine

başvurulmuştur. Literatürde öznitelik seçimi için farklı metasezgisel algoritmaların kullanıldığı görülmüştür. Salcedo-Sanz *et al.* (2014), kısa dönemli rüzgar hızı tahmini için öznitelik seçiminde Mercan Resifleri Optimizasyon (Coral Reef Optimization) algoritmasını kullanmışlar ve başlangıçta yer alan 6534 özelliği sadece 9 değişkene indirgeyerek hesaplama karmaşasını oldukça azaltmış ve tahmin gücü yüksek bir model geliştirmişlerdir. Azimi *et al.* (2016) modelin doğruluğunu artırmak amacıyla düzensiz kalıptaki yapıları gidermek için K-Ortalama Kümeleme (K-Means Clustering) yöntemini kullanmışlardır. Wang *et al.* (2017), kısa dönemli rüzgar hızı tahmininde optimal girdi değişkenlerini belirlemek amacıyla Rassal Orman (Random Forests) algoritmasını kullanmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre algoritma ilişkisiz değişkenleri kaldırarak aday girdi değişkenlerden en güçlü şekilde ilişkili olan değişkenleri belirlemiştir. Sun *et al.* (2017), rüzgar hızı tahmininde girdi değişkenlerin tahmin modelinde dinamik olarak seçildiği ve parametre optimizasyonunun yapıldığı iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Wang *et al.* (2018), K-Ortalama Kümeleme yaklaşımı ile girdi verilerinin belirsizliğini hesaba katarak, tahmin doğruluğu üzerinde en büyük etkiye sahip olan ve önerilen modelin verimliliğini artıran en büyük geçmiş örnekleri tespit etmişlerdir. Liu *et al.* (2020), ilişkisiz ve gereksiz faktörleri modele dahil etmenin, önemli faktörlerin rolünü maskeleyebileceğini ifade ederek model oluşturulmadan önce karşılıklı bilgi (mutual information) yaklaşımı ile öznitelik seçimini gerçekleştirmiştir. Görüldüğü gibi öznitelik seçim süreci modelin performansını artıran bir süreç olup literatürdeki pek çok çalışmada konu edinmiştir. Yapılan çalışmada Türkiye’de yer alan bir rüzgar türbini için 2018 yılı boyunca SCADA sistemi ile elde edilen veri seti ile aynı konum için NASA tarafından paylaşılan meteorolojik veri seti kullanılarak rüzgar gücü tahmini gerçekleştirilmiştir. Modelde yer alan ancak model doğruluğunun azalmasına ve hesaplama karmaşıklığına neden olan özellikleri elimine etmek amacıyla öznitelik seçim sürecine başvurulmuştur. Öznitelik seçim sürecinde Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır.

Rüzgar gücü tahmininde Çoklu Doğrusal Regresyon, Ridge Regresyon, Lasso Regresyon, Elastik Net, Karar Ağaçları ve Rassel Orman Algoritması kullanılmıştır. Modeller geliştirilirken verilerin %75'i modeli eğitmek, %25'i ise geliştirilen modeli test etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu oran literatürde de sıklıkla kullanılmaktadır (Olson and Moore 2016, Theofilatos *et al.* 2019, Le *et al.* 2020). Geliştirilen modeller determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) ve kök ortalama hata karesi (Root Mean Squared Error, RMSE) performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. Ayrıca öznitelik seçim sürecinin modelin performansına etkisi de araştırılmıştır.

Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu şekildedir: Materyal ve Metot bölümünde Makine Öğrenme Algoritmalarının genel işleyişi sırasıyla verilerin toplanması, veri ön işleme, modelin seçilmesi ve öznitelik seçimi alt başlıklarıyla incelenmiştir. Bulgular bölümünde kullanılan performans ölçütleri açıklanarak geliştirilen modellere ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir. Tartışma ve Sonuç bölümünde ise çalışmayla ilgili genel bir değerlendirme yapılarak gelecekte yapılması planlanan çalışmalara değinilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu bölümde rüzgar gücü tahmini için kullanılan makine öğrenme algoritmalarının uygulama adımları olan verilerin toplanması, veri ön işleme, model seçimi ve öznitelik seçimi başlıkları sırasıyla açıklanmıştır.

### 2.1 Verilerin toplanması

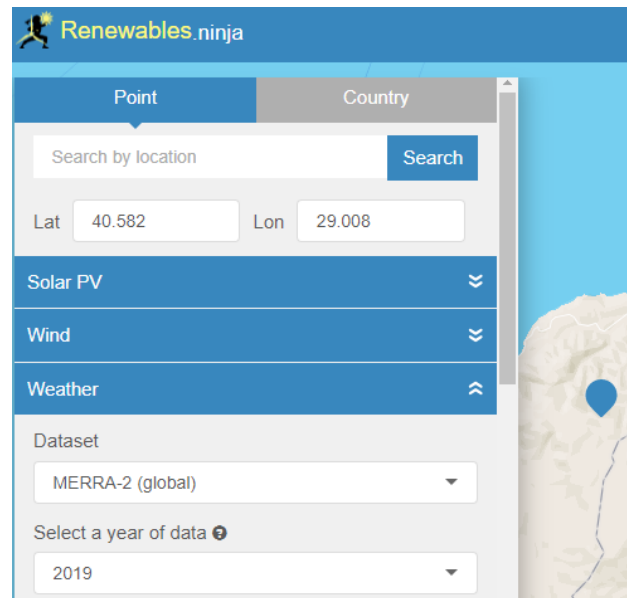
Yapılan çalışmada Türkiye’de elektrik üreten bir rüzgar türbininin SCADA sistemi aracılığıyla elde edilen CSV formatındaki rüzgar verileri kullanılmıştır (Int Kyn. 4). SCADA sistemi ile rüzgar hızı (m/sn), rüzgar yönü ( $^{\circ}$ ), aktif güç (kW) ve teorik güç (kW-s) bilgileri bir yıllık dönem boyunca (01.01.2018-31.12.2018) on dakikalık periyotlarla sistemden çekilmiş ve raporlanmıştır. Rüzgar türbinine ait koordinat bilgileri “X:668478 Y:4494833 UTM ED 50” olarak verilmiş ve dönüşüm yapılarak türbinin enlem ve boylam bilgileri sırasıyla 40,58 ve 28,99 olarak elde edilmiştir. Şekil 3’te lokasyon bilgileri verilen NORDEX N117 model türbin, TUREB (Türkiye

Rüzgar Enerjisi Birliği) tarafından paylaşılan RES veri tabanına göre Yalova Esenköy’ de bulunmakta olup türbin gücü 3,6 MW olarak raporlanmıştır.



Şekil 3. Rüzgar türbini konum bilgileri (Int Kyn. 5)

Rüzgar gücüne meteorolojik verilerin etkisini değerlendirmek amacıyla NASA tarafından paylaşılan MERRA-2 Global (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications) veri seti kullanılmıştır. Şekil 4’te görüldüğü gibi sisteme rüzgar türbininin bulunduğu lokasyonun enlem ve boylam değerleri girilerek uydu gözlemleri ile mevsimsel parametrelere ilişkin veriler çekilmiştir. Kullanılan veri setinde, bir yıllık dönem boyunca (01.01.2018-31.12.2018) saatlik periyotlarla hava sıcaklığı ( $^{\circ}$ C), yağış (mm/s), kar yağışı (mm/s), kar kütlesi ( $kg/m^2$ ), hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ ), bulutluluk oranı ve radyasyon oranlarına ( $W/m^2$ ) ait veriler paylaşılmaktadır.



Şekil 4. Meteorolojik verilerin elde edilmesi (Int Kyn. 6)

**Çizelge 1.** SCADA değişkenlerine ait tanıttıcı istatistikler

	Aktif Güç	Rüzgar Hızı	Teorik Güç Eğrisi	Rüzgar Yönü
Maksimum	3604,41	23,75	3600,00	357,27
Minimum	-0,18	0	0	0
Ortalama	1305,54	7,55	1490,50	123,67
Standart Sapma	1291,27	4,17	1345,04	88,21
Gelen Veri	8440	8440	8440	8440
Veri Boyutu	8760	8760	8760	8760
Veri Yüzdesi	%96,35	%96,35	%96,35	%96,35

Meteorolojik veriler bir saatlik periyotlar halinde orijinaline sadık kalınarak alınırken, rüzgar türbinine ait veriler on dakikalık altı adet verinin ortalamaları alınarak saatlik periyota dönüştürülmüştür. Her iki veri setine ilişkin tanıttıcı istatistiklere ait özet bilgiler Çizelge 1 ve Çizelge 2’de verilmiştir. Her iki veri setinin saatlik bazda birleştirilmesiyle nihai veri seti oluşturulmuştur.

**Çizelge 2.** NASA değişkenlerine ait tanıttıcı istatistikler

	Sıcaklık	Yağış	Kar	Kar Kitlesi	Hava Yoğ.	Radyasyon Yüzey	Radyasyon Atmosfer	Bulutluluk Oranı
Maksimum	31,95	5,93	0,17	1,25	1,29	1005,19	1251,01	0,99
Minimum	-2,05	0	0	0	1,12	0	0	0
Ortalama	15,74	0,09	0,00	0,04	1,19	189,42	326,02	0,43
Standart Sapma	7,44	0,29	0,01	0,15	0,04	271,94	407,54	0,36
Gelen Veri	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Veri Boyutu	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
Veri Yüzdesi	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100	%100

## 2.2. Veri önışleme

Çizelge 1’de görüldüğü gibi mevsimsel değişkenlerde veri kaybı olmazken, rüzgar türbininden elde edilen veri setinde %3,65 oranında eksik veri bulunmaktadır. Eksik verilerin doldurulması için uygulama kolaylığı açısından K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors, kNN) Algoritması kullanılmıştır. Algoritma seçilen  $K$  adet en yakın komşuya ait uzaklıkları kullanarak kayıp gözlem değerlerinin tahmin edilmesi prensibine dayanmaktadır (Zhang 2012). İncelenen problem için eksik verilerin doldurulmasında “sklearn” kütüphanesinde yer alan “KNNImputer” sınıfından yararlanılmıştır. Eksik verilerin doldurulması aşamasından sonra, değişkenler arasındaki ilişkiyi

gösteren korelasyon matrisi “seaborn” kütüphanesi ile oluşturulmuştur. Korelasyon matrisinde ilişkiye ait renk koyulaştıkça ilişkinin gücünün arttığı söylenebilir. Buna göre Şekil 5’te verilen korelasyon matrisi incelendiğinde aktif güç üzerinde en fazla etki teorik güç eğrisi ve rüzgar hızına aittir. Aktif güç üzerinde negatif etkiye sahip olan değişkenler ise rüzgar yönü, sıcaklık, kar ve kar kitlesi ile radyasyon oranlarıdır. Sıcaklık artışı hava yoğunluğunda düşüşe sebep olduğundan rüzgar gücü üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Kar ve kar kitlesi, kanatların havayı verimli bir şekilde yakalama yeteneğini azaltarak yine rüzgar gücünde düşüşe sebep olmaktadır. Solar radyasyon artışı ise sıcaklığı artırdığından, dolaylı olarak rüzgar gücünde azalmaya sebep olmaktadır.

**Şekil 5.** Korelasyon matrisi



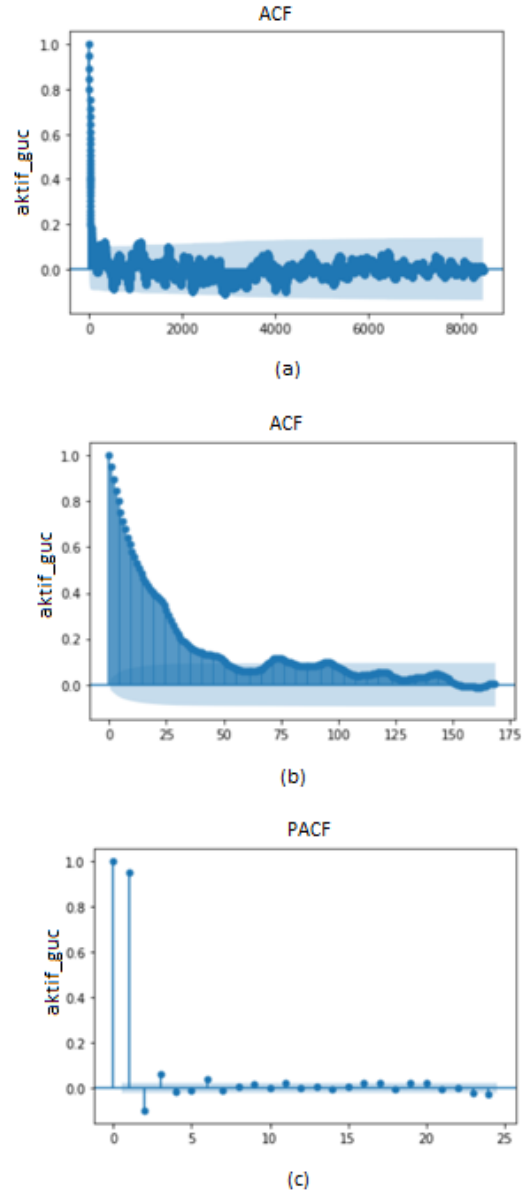
Makine öğrenmesinde kullanılan algoritmalar değişkenlerin ölçeklerine duyarlı olabilir. Bu nedenle veriler “sklearn” kütüphanesinde yer alan “MinMax Scaler” ile normalize edilmiştir. Veriler normalize edildikten sonra, eğitim ve test olmak üzere iki gruba bölünür. Eğitim setinde bulunan veriler modelin eğitilmesinde kullanılırken, test setinde yer alan veriler geliştirilen modelin performansını değerlendirmek için kullanılır. Yapılan çalışmada verilerin %75’i modelin eğitilmesi, %25’i ise modeli test etmek için kullanılmıştır.

### 2.3. Modelin seçilmesi

Bir rüzgar enerjisi tahmin sürecinde hedef değişken olan rüzgar gücü; sıcaklık, rüzgar hızı, rüzgar yönü, gibi meteorolojik değişkenlerin bir fonksiyonudur. Ancak herhangi bir  $t$  anında üretilen güç, sadece  $t$  anındaki meteorolojik değişkenlere değil, aynı zamanda bu değişkenlerin ve hatta hedef değişken olan rüzgar gücünün geçmiş değerlerine de bağlıdır (Renani *et al.* 2016).  $t$  anından önceki verileri tutan bu değişkenler “gecikme değişkeni (lag variable)” olarak adlandırılmaktadır. Bu ifadeye bağlı olarak gecikme değişkenleri açıklayıcı değişken olarak regresyon modeline dahil edilebilir. Bu amaçla öncelikle veri setinde  $t-1$  anındaki gözlemlerin  $t$  anındaki gözlemleri ne kadar etkilediğini araştırmak amacıyla oto korelasyon fonksiyonu (ACF) kullanılmıştır. Kısmi oto korelasyon fonksiyonu (PACF) ise diğer gecikmeli serilerin etkileri ihmal edildiğinde  $t$  ile  $t-k$  serileri arasındaki ilişki miktarını göstermektedir.

Şekil 6.c’de görüldüğü gibi 4 gecikmeden sonraki kısmi oto korelasyon katsayıları güven aralığı içerisinde kalmaktadır. Buna göre tahmin modeli;  $Y_t$ , hedef değişken olan aktif rüzgar gücünü,  $X_i$ ,  $i$ . bağımsız değişkeni ve  $n$  ise girdi değişkeni sayısını ifade etmek suretiyle, rüzgar gücüne ait gecikme değişkeni  $k = 4$  olacak şekilde Eşitlik (1)’deki gibi oluşturulmuştur.

$$Y(t) = f \left( \begin{array}{c} Y_{(t-1)}, \dots, Y_{(t-k)}, X_{1(t)}, X_{1(t-1)}, \dots, X_{1(t-k)}, \\ X_{2(t)}, X_{2(t-1)}, \dots, X_{2(t-k)}, \dots \\ X_{n(t)}, X_{n(t-1)}, \dots, X_{n(t-k)} \end{array} \right) \quad (1)$$



Şekil 6. a) ACF-1 yıl. b) ACF-1 hafta. c) PACF-1 gün.

Makine öğrenmesinde kullanılan algoritmaların performansı her problem için aynı olmayıp verinin boyutu, özellikleri ve problemin yapısına göre farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmada performanslarını karşılaştırmak amacıyla Çoklu Doğrusal Regresyon, Lasso Regresyon, Ridge Regresyon, Elastik Net, Karar Ağaçları ve Rassal Orman Algoritması kullanılmıştır.

**Çoklu Doğrusal Regresyon:** Yapılan çalışmada Çoklu Doğrusal Regresyon için “En Küçük Kareler” yöntemi kullanılmıştır. Yöntem Eşitlik (2)’de görüldüğü gibi Artık Kareler Toplamı (Residual Sum of Squares)’ni en küçükleyecek şekilde çalışmaktadır.

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j X_{ij} \right)^2 \quad (2)$$

**Ridge Regresyon:** Hoerl ve Kennard (1970) tarafından En Küçük Kareler yöntemine alternatif olarak önerilmiştir. Çoklu Doğrusal Regresyon'da iki ya da daha fazla bağımsız değişken arasında doğrusal veya doğrusala çok yakın bir ilişki olması durumunda ortaya çıkan yanlılığı gidererek daha küçük varyanslı tahminler üretir. Eşitlik (3)'te görüldüğü gibi katsayılara ceza katsayısı uygulayarak; ceza ve katsayı karelerinin toplamının çarpımı da minimize edilmeye çalışılır. Eğer  $\lambda$  değeri 0 ise Ridge Regresyon; Çoklu Doğrusal Regresyon haline gelir,  $\lambda$ 'nın çok büyük olduğu durumda ise tüm katsayılar sıfıra yaklaşır ve model düz bir çizgi haline dönüşür (Melkumova and Shatskikh 2017). Sonuç olarak  $\lambda$  arttıkça varyans yani model tahmininin değişkenliği azalacak ancak yanlılık artacaktır. Yüksek yanlılığa sahip olan bir modelin eksik öğrenme (underfitting) olasılığı oldukça fazla iken yüksek varyansa sahip olan bir model ise aşırı öğrenme (overfitting) riski ile karşı karşıyadır (Belkin *et al.* 2019). Bu nedenle yanlılık ve varyans arasında bir ödünleşim sağlanarak  $\lambda$  değeri test koşullarında sonucunda varyans, yanlılığın karesi ve MSE (Mean Squared Error) performans kriterleri dikkate alınarak 1 olarak belirlenmiştir.

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j X_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \quad (3)$$

**Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) Regresyon:** Tibshirani (1996) tarafından geliştirilen yöntem Ridge Regresyon'da olduğu gibi çoklu doğrusal bağlantı problemini çözmek için önerilmiştir. Ridge Regresyon'dan farkı Eşitlik (4)'te görüldüğü katsayıların karelerini almak yerine mutlak değerini almasıdır. Mutlak değer alındığı için bazı öznitelikler tamamıyla ihmal edilir. Böylece Lasso Regresyon sadece aşırı öğrenmeyi azaltmak için değil aynı zamanda öznitelik seçiminde de önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmada  $\lambda$  değeri 1 olarak alınmıştır.

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j X_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m |\beta_j| \quad (4)$$

**Elastik Net:** Ridge Regresyon gibi cezalandırma, Lasso Regresyon gibi değişken seçimi yapma üzere Zou ve Hastie (2005) tarafından önerilmiştir. Eşitlik (5)'te görüldüğü gibi  $\lambda$  "0" olduğunda denklem Ridge; "1" olduğunda Lasso Regresyona dönüşür. Yapılan çalışmada  $\lambda$  değeri 0,5 olarak alınmıştır.

$$\sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j X_{ij} \right)^2 + (1 - \lambda) \sum_{j=1}^m \beta_j^2 + \lambda \sum_{j=1}^m |\beta_j| \quad (5)$$

**Karar Ağaçları:** Hem regresyon hem de sınıflama modelleri için uygulanabilir. Kök düğüm bağımlı değişkeni temsil ederken kökten yaprak düğümlere doğru gidildikçe veri seti küçük alt parçalara ayrılarak dallanır. Dallarda seçilen karara göre sonraki düğümlere geçiş yapılır. Model, tekrarlayan dallanma süreci boyunca tahmin için kullanılabilir bir dizi kural üretir (Tso and Yau 2007) ve nihai düğüme ulaşana kadar süreç tekrarlanır.

**Rassal Orman Algoritması:** Breiman (2001) tarafından karar ağaçlarının en büyük problemlerinden biri olan aşırı öğrenme problemini gidermek amacıyla önerilmiştir. Rassal olarak seçilen alt kümeler üzerinde birbiri arasında korelasyon olmayan karar ağaçları birlikte çalışmakta ve her bir ağaç bireysel tahminlerde bulunmaktadır. Regresyon modellerinde nihai sonucun elde edilmesinde bireysel tahminlerin ortalaması alınmaktadır. Rassal Orman algoritmasında kullanılan iki temel parametre bulunmaktadır. Bunlar karar ağacı sayısı ve her bir düğümde kullanılacak olan değişken sayılarıdır.

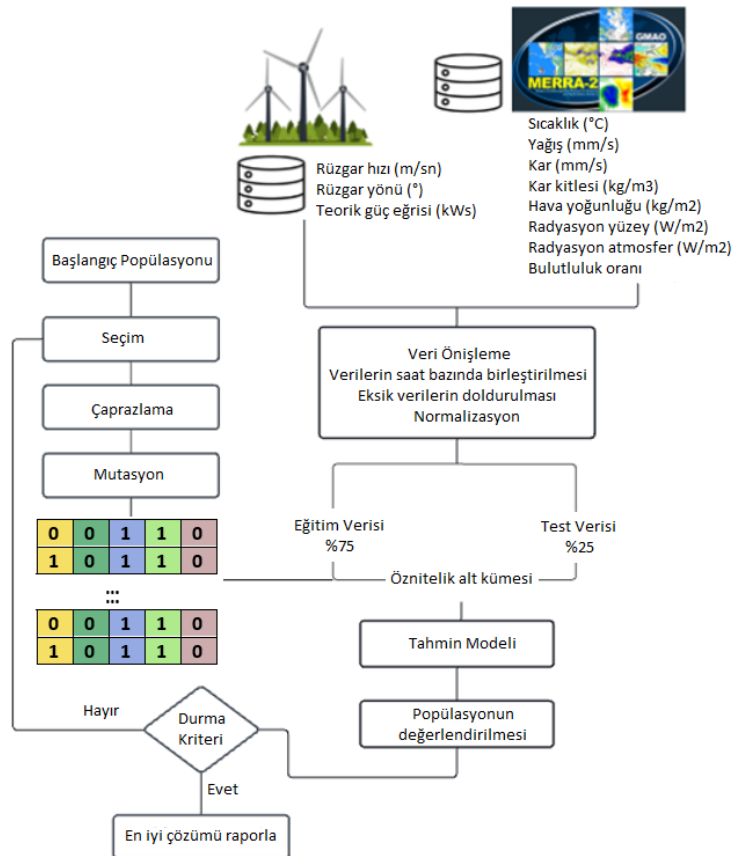
## 2.4. Öznitelik seçimi

Önceki bölümde bahsedildiği gibi 11 adet bağımsız değişken bulunan modelde gecikme değişkenleri de hesaba katılarak toplam 47 adet girdi değişkeni bulunmaktadır. Ancak bu şekilde büyük miktarda öznitelik kullanımı ile bilgi vermeyen değişkenlerin varlığı, tahminlerde belirsizlik oluşturabilir (Kuhn and Johnson 2013). Bazı özellikler bağımlı değişken için alakasız veya daha az önemli olabileceğinden, modele gereksiz şekilde dahil edilmeleri, model karmaşıklığını artırarak modelin yorumlanmasını

zorlaştırabilir. Gereksiz öznitelik kullanımının bir diğer dezavantajı ise modelin eğitilmesi için gereken süreyi artırarak modelin etkinliğini sınırlandırmasıdır. Bu nedenle yapılan çalışmada makine öğrenme algoritmalarından etkin düzeyde yararlanılması amacıyla öznitelik seçim prosedürü uygulanmıştır. Öznitelik seçimi için temelde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar filtreleme yöntemleri ve sarmal (wrapper) yöntemlerdir. Filtreleme yöntemlerinde istatistiksel analizlere başvurulur ve anlamlılık düzeylerine göre öznitelikler belirlenir. Ancak etkisi anlamsız olan bir girdi değişkeninin modelden çıkarılması modelin performansını her zaman artırmaz. Modelden çıkarılan bu değişkenin başka bir girdi değişkeni ile ilişkisi olabilir. Bu dezavantajı gidermek için sarmal yöntemler önerilmiştir. Sarmal yöntemlerde, iteratif bir arama süreci gerçekleştirilerek farklı alt kümeler ile denemeler yapılır ve en uygun öznitelik kümesi oluşturulur. İncelenen modelde  $n$  adet öznitelik bulunması durumunda  $2^n$  farklı olası alt küme oluşacaktır. En iyi kombinasyonun belirlenmesi problemi, NP-Zor yapıda olup çözümünde kısa sürede etkin çözümler üreten sezgisel algoritmaların kullanılması kaçınılmazdır. Bu nedenle sarmal

yöntemler, öznitelik seçiminde, genellikle sezgisel algoritmalara başvurmaktadır. Yapılan çalışmada sarmal yöntem olarak Genetik Algoritma (GA) yaklaşımına başvurulmuştur. GA, popülasyon tabanlı bir algoritma olup, Darwin'in doğal seleksiyon teorisine bağlı olarak geliştirilen bir stokastik arama yöntemidir (Holland 1992). GA'nın çalışma prensibinin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle algoritmada yer alan temel kavramlar açıklanmıştır:

- Gen, probleme has en küçük bilgiyi taşıyan birim olup, yapısı probleme özgü olarak farklı şekillerde kodlanabilir (encoding).
- Kromozom, birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu ve problem çözümünü temsil eden yapıdır.
- Popülasyon, uygun çözümleri temsil eden kromozomlar tarafından oluşturulan topluluktur. Popülasyonda yer alan kromozom sayısı ele alınan problemin yapısına göre karar verilen bir parametredir.
- Daha kaliteli nesiller üretmek için kullanılan genetik operatörler ise seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini içermektedir.



Şekil 7. Önerilen Tahmin Süreci



Şekil 7’de çalışma prensipleri verilen GA’ nın öznitelik seçim problemi için uygulama adımları izleyen bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır:

- Algoritma parametreleri olan popülasyon büyüklüğü, turnuva büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve maksimum iterasyon sayısı sırasıyla 20; 3; 0,90; 0,10 ve 100 olarak belirlenmiştir.
- Başlangıç popülasyonu oluşturulurken popülasyon büyüklüğü kadar birey tamamen rassal olarak oluşturulmuştur ve ikili kodlama (binary encoding) yapısı kullanılmıştır. Buna göre Şekil 8’de görüldüğü gibi kromozomda yer alan her bir gen bir özneliğe karşılık gelmektedir. Gen değerinin “1” olduğu durumda, ilgili öznelik modelde kullanılmakta, “0” olduğu durumda ise kullanılmamaktadır.

Öznitelikler:	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	...	$X_n$
	×	×	✓	✓	×	✓	...	×
Kromozom:	0	0	1	1	0	1	...	0

Şekil 8. Kromozom yapısı

- Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra popülasyonda yer alan bireyler uyum değerlerine göre değerlendirilir. Her birey özneliklerin oluşturduğu bir alt kümeyi temsil etmektedir. Uyum değeri olarak ise regresyon modelinin determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) kullanılmıştır.
- Seçim operatörü olarak turnuva seçim yöntemi kullanılmıştır. Buna göre turnuva büyüklüğü kadar birey popülasyondan rassal olarak seçilir ve uyum değeri en iyi olan yani  $R^2$  değeri en yüksek olan çözüm ebeveyn olarak seçilir.
- Seçim sürecinden sonra seçilen ebeveynler yeni bireylerin oluşturulması amacıyla çaprazlanır. Çaprazlama sürecinde ise Şekil 9’da görüldüğü gibi ikili kodlamada sıklıkla kullanılan tek nokta çaprazlama kullanılmıştır. Buna göre kromozomda rassal olarak bir nokta seçilir. Bu noktadan önceki genler birinci sonraki genler ise ikinci ebeveynden gelecek şekilde iki yeni birey oluşturulur.

Ebeveyn 1:	0	0	1	1	0	1	1	0
Ebeveyn 2:	1	0	1	1	0	0	1	1
Çocuk 1:	0	0	1	1	0	0	1	1
Çocuk 2:	1	0	1	1	0	1	1	0

Şekil 9. Tek nokta çaprazlama

- Algoritmanın yerel en iyiye takılmasını önlemek amacıyla yeni üretilen bireyler için mutasyon oranına bağlı olarak mutasyon operatörü uygulanır. Mutasyon operatörü uygulanırken kromozom içerisinde rassal olarak seçilen bir gen “1” ise “0”; “0” ise “1” değerini alır.
- Genetik operatörler uygulandıktan sonra yeni oluşturulan bireyler, popülasyonda yer alan bireylerle karşılaştırılarak popülasyon güncellenir.
- Durma kriteri sağlanana kadar yukarıdaki adımlar uygulanır, durma kriteri sağlanınca uyum değeri en iyi olan birey en iyi çözüm olarak raporlanır. İncelenen problem için durma kriteri olarak maksimum iterasyon sayısı kullanılmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Performans Ölçütleri

Geliştirilen modeller determinasyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) ve ortalama hata karesi kökü (Root Mean Squared Error, RMSE) performans ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır.

- Determinasyon Katsayısı ( $R^2$ ): Korelasyon katsayısının karesi olan determinasyon katsayısı, bağımlı değişkendeki değişkenliğin ne kadarının bağımsız değişkenlerdeki değişkenlikle açıklanabildiğini ifade eder. İki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü belirleyen determinasyon katsayısı 0-1 aralığında değer almakta olup ilişkinin gücü 1’e yaklaştıkça artmaktadır.
- Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE): Model tahmini ile hedef değer arasındaki mutlak farkın ortalamasını verir.

- Kök Ortalama Hata Karesi (Root Mean Squared Error, RMSE): Tahmin hatalarının standart sapmasıdır.
- $y_i$ :  $i$ . gözlemin hedef değeri;  $\hat{y}_i$ :  $i$ . gözlemin tahmin edilen değeri;  $\bar{y}$ : hedef değerlerin ortalaması,  $n$ : örneklem büyüklüğü ve  $e_i$ :  $i$ . gözleme ilişkin hata ve  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  olmak üzere, modeller karşılaştırılırken kullanılan performans ölçütleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Performans Ölçütleri

Açıklama	Formül
$R^2$	$= 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
MAE	$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  e_i $
RMSE	$= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}$

### 3.2. Karşılaştırmalı sonuçlar

Bu bölümde öncelikle öznitelik seçimi yapılmadan Çizelge 4'te verilen modeller karşılaştırılmıştır. Çizelge 4'te görüldüğü gibi ilk dört modelde gecikme değişkenleri kullanılmazken beşinci modelde Eşitlik (1) de belirtildiği gibi gecikme değişkenleri de ilave edilerek toplam 47 öznitelik kullanılmıştır.

Çizelge 4. Önerilen Modeller

Model	Değişkenler	Değişken sayısı
1	rüzgar hızı, rüzgar yönü	2
2	rüzgar hızı, rüzgar yönü, teorik güç eğrisi	3
3	rüzgar hızı, rüzgar yönü, meteorolojik değişkenler	10
4	rüzgar hızı, rüzgar yönü, teorik güç eğrisi, meteorolojik değişkenler	11
5	Model 4+ gecikme (lag) değişkenleri	47

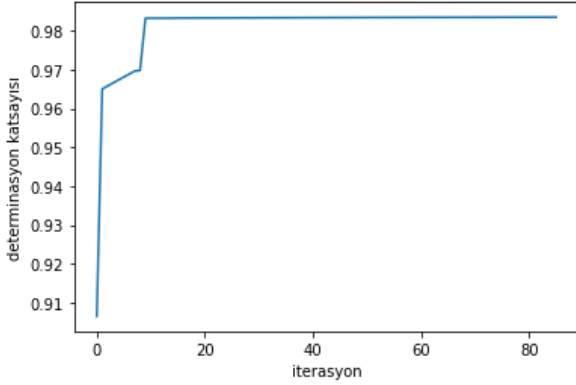
Çizelge 5'te görüldüğü gibi determinasyon katsayısı en yüksek olan model gecikme değişkenlerinin modele dahil edildiği beşinci modeldir. Yine beşinci modelde ortalama mutlak hata ve kök ortalama hata karesi değerleri diğer modellere göre daha düşük bulunmuştur.

Çizelge 5. Modellerin karşılaştırılması

Model 1:	$R^2$	MAE	RMSE
Çoklu Doğrusal Regresyon	0,844	353,583	502,740
Lasso Regresyon	0,844	353,618	502,738
Ridge Regresyon	0,844	353,585	502,740
Elastik Net	0,843	359,159	503,657
Karar Ağaçları	0,849	190,242	494,296
Rassal Ormanlar	0,904	169,702	393,838
Model 2:	$R^2$	MAE	RMSE
Çoklu Doğrusal Regresyon	0,909	173,155	383,387
Lasso Regresyon	0,909	173,089	383,392
Ridge Regresyon	0,909	173,154	383,387
Elastik Net	0,909	172,359	383,658
Karar Ağaçları	0,842	193,356	506,329
Rassal Ormanlar	0,906	165,469	390,059
Model 3:	$R^2$	MAE	RMSE
Çoklu Doğrusal Regresyon	0,856	347,524	482,809
Lasso Regresyon	0,852	353,297	489,667
Ridge Regresyon	0,854	351,091	486,466
Elastik Net	0,848	360,071	496,420
Karar Ağaçları	0,928	116,940	341,406
Rassal Ormanlar	0,957	99,554	263,208
Model 4:	$R^2$	MAE	RMSE
Çoklu Doğrusal Regresyon	0,921	169,411	357,754
Lasso Regresyon	0,916	180,118	368,278
Ridge Regresyon	0,919	175,621	363,171
Elastik Net	0,913	186,291	374,894
Karar Ağaçları	0,935	109,528	323,198
Rassal Ormanlar	0,959	95,722	256,888
Model 5:	$R^2$	MAE	RMSE
Çoklu Doğrusal Regresyon	0,983	76,454	164,878
Lasso Regresyon	0,983	75,044	164,242
Ridge Regresyon	0,983	75,984	164,282
Elastik Net	0,983	73,372	165,008
Karar Ağaçları	0,966	89,633	233,145
Rassal Ormanlar	0,982	70,273	170,941

Kullanılan yöntemler değerlendirildiğinde ise Çoklu Doğrusal Regresyon, Lasso Regresyon, Ridge Regresyon ve Elastik Net sonuçları birbirine yakın bulunurken değişken sayısının az olduğu Model 1, Model 2, Model 3 ve Model 4 için Rassal Orman Algoritması daha iyi performans göstermiştir. Model 5'te ise Karar Ağaçları dışında diğer yöntemler

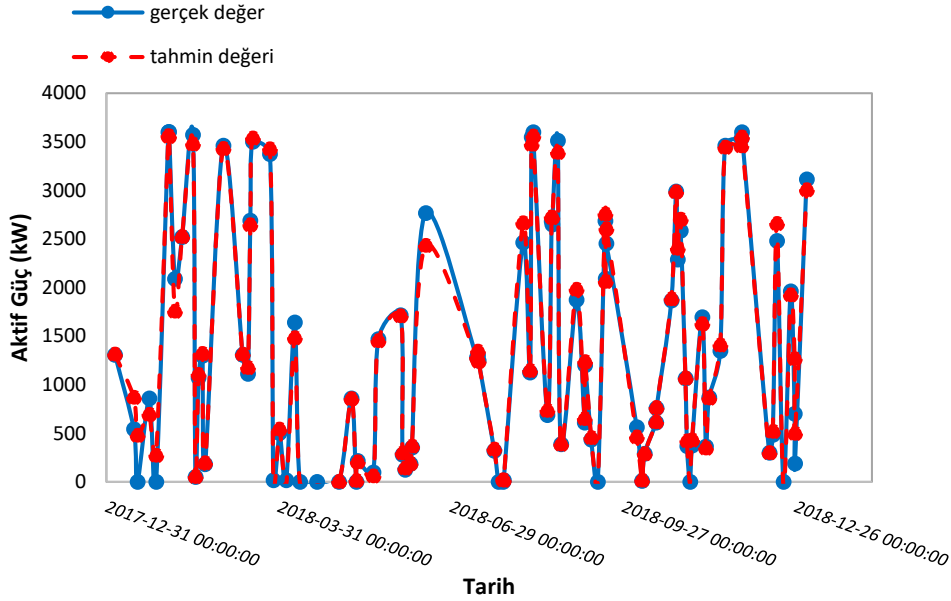
birbirine yakın performans gösterirken Karar Ağaçları diğer yöntemlere kıyasla daha başarısız bulunmuştur.



Şekil 10. GA performansı

İkinci aşamada ise Model 5 için öznitelik seçiminde GA'nın performansı değerlendirilmiştir. GA ile elde edilen modelde sadece dokuz değişken kullanılarak Şekil 10'da görüldüğü gibi ilk yirmi iterasyonda determinasyon katsayısı 0,906'dan 0,983 değerine ulaşmıştır. Böylece modele gereksiz şekilde dahil edilmeleri, model karmaşıklığını artırarak modelin yorumlanmasını zorlaştırabilecek olan değişkenler modelden uzaklaştırılmıştır.

Şekil 11 'de öznitelik seçim sürecinin ardından önerilen nihai modelin performansı değerlendirilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi test verisi ve tahmin değerleri karşılaştırıldığında tahmin değerlerinin gerçek değerlere oldukça yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Tahmin performansı

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada makine öğrenme teknolojisi, son zamanlarda popülaritesi artan, yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisi tahmini için kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında kullanılan bağımsız değişkenlere göre farklı regresyon modelleri geliştirilmiştir. Sadece SCADA değişkenlerinin kullanıldığı model için Çoklu Doğrusal Regresyon modelinde  $R^2$  değeri 0,909 olarak bulunurken, NASA tarafından paylaşılan meteorolojik değişkenlerin modele dahil edilmesiyle  $R^2$  değeri 0,921 olarak elde edilmiştir. Gecikmeli değişkenlerin de kullanıldığı

toplam 47 değişkenin bulunduğu modelde ise  $R^2$  değeri 0,983'e çıkmıştır.

Çalışmada ayrıca farklı makine öğrenme algoritmalarının performansları da karşılaştırılmıştır. Değişken sayısının az olduğu modellerde Rassal Orman algoritması diğer yöntemlere göre daha iyi performans göstermiştir. Gecikme değişkenlerinin kullanıldığı modelde ise Karar Ağaçları dışındaki yöntemler oldukça benzer performans gösterirken Karar Ağaçlarının performansı diğer yöntemlere göre düşük bulunmuştur.

Regresyon modelinde modelin performansına etki etmeyen değişkenlerin modelde kullanılması hem modelin eğitilmesi için gereken süreyi artırarak modelin etkinliğini sınırlandırmakta hem de büyük miktarda öznitelik kullanımı ile tahminlerde

belirsizlik oluşabilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmada makine öğrenme algoritmalarından etkin düzeyde yararlanılması amacıyla öznitelik seçim prosedürü uygulanmıştır. Öznitelik seçim sürecinde GA'dan yararlanılmıştır. Algoritma sonuçlarına göre ilk 20 iterasyon gibi oldukça kısa bir sürede popülasyonda yer alan en iyi bireyin  $R^2$  değeri 0,906 dan 0,983 değerine ulaşmıştır. Böylece 47 değişkenli modelin  $R^2$  değerine sadece 9 değişkenin kullanıldığı model ile ulaşılarak etkin ve güçlü bir regresyon modeli geliştirilmiştir.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda kullanılan makine öğrenme algoritmalarına ilişkin hiperparametre (hyperparameter) değerleri sezgisel algoritmalarla belirlenerek model performansları karşılaştırılabilir. Lasso ve Ridge Regresyon yöntemlerinde kullanılan  $\lambda$  değerinin belirlenmesi için çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilebilir. Bunun dışında benzer bir tahmin süreci, güneş enerjisi gibi farklı yenilenebilir enerji kaynakları için de uygulanabilir.

## 5. Kaynaklar

- Azimi R, Ghofrani M, Ghayekhloo M, 2016, A hybrid wind power forecasting model based on data mining and wavelets analysis. *Energy conversion and management*, **127**, 208-225.
- Belkin M, Hsu D, Ma S, Mandal S, 2019, Reconciling modern machine-learning practice and the classical bias–variance trade-off. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **116**, **32**, 15849-15854.
- Breiman L, 2001, Random forests. *Machine learning*, **45**, **1**, 5-32.
- Demolli H, Dokuz AS, Ecemis A, Gokcek M, 2019, Wind power forecasting based on daily wind speed data using machine learning algorithms. *Energy Conversion and Management*, **198**, 111823.
- Deng Y-C, Tang X-H, Zhou Z-Y, Yang Y, Niu F, 2021, Application of machine learning algorithms in wind power: a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-22.
- Foley AM, Leahy PG, Marvuglia A, McKeogh EJ, 2012, Current methods and advances in forecasting of wind power generation. *Renewable energy*, **37**, **1**, 1-8.
- Heinermann J, Kramer O, 2016, Machine learning ensembles for wind power prediction. *Renewable Energy*, **89**, 671-679.
- Higashiyama K, Fujimoto Y, Hayashi Y, 2018, Feature extraction of NWP data for wind power forecasting using 3D-convolutional neural networks. *Energy Procedia*, **155**, 350-358.
- Hoerl AE, Kennard RW, 1970, Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, **12**, **1**, 55-67.
- Holland JH, 1992. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, A Bradford Book MIT Press, p.
- Kuhn M, Johnson K, 2013. *Applied predictive modeling*, New York: Springer, 26, 13.
- Le TT, Fu W, Moore JH, 2020, Scaling tree-based automated machine learning to biomedical big data with a feature set selector. *Bioinformatics*, **36**, **1**, 250-256.
- Liu H, Chen C, 2019, Data processing strategies in wind energy forecasting models and applications: A comprehensive review. *Applied Energy*, **249**, 392-408.
- Liu X, Zhang H, Kong X, Lee KY, 2020, Wind speed forecasting using deep neural network with feature selection. *Neurocomputing*, **397**, 393-403.
- Lu P, Ye L, Zhao Y, Dai B, Pei M, Li Z, 2021, Feature extraction of meteorological factors for wind power prediction based on variable weight combined method. *Renewable Energy*, **179**, 1925-1939.
- Melkumova L, Shatskikh SY, 2017, Comparing Ridge and LASSO estimators for data analysis. *Procedia Engineering*, **201**, 746-755.
- Olson RS, Moore JH, TPOT: A tree-based pipeline optimization tool for automating machine learning, *Workshop on automatic machine learning*, 66-74.
- Renani ET, Elias MFM, Rahim NA, 2016, Using data-driven approach for wind power prediction: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, **118**, 193-203.
- Salcedo-Sanz S, Pastor-Sánchez A, Prieto L, Blanco-Aguilera A, García-Herrera R, 2014, Feature selection in wind speed prediction systems based on a hybrid coral reefs optimization–Extreme learning machine approach. *Energy Conversion and Management*, **87**, 10-18.
- Shi J, Wang L, Lee W-J, Cheng X, Zong X, 2019, Hybrid Energy Storage System (HESS) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling

based on output feature extraction. *Applied Energy*, **256**, 113915.

Sun S, Qiao H, Wei Y, Wang S, 2017, A new dynamic integrated approach for wind speed forecasting. *Applied Energy*, **197**, 151-162.

Theofilatos A, Chen C, Antoniou C, 2019, Comparing machine learning and deep learning methods for real-time crash prediction. *Transportation research record*, **2673**, **8**, 169-178.

Tibshirani R, 1996, Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, **58**, **1**, 267-288.

Tso GK, Yau KK, 2007, Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks. *Energy*, **32**, **9**, 1761-1768.

Wang H, Sun J, Sun J, Wang J, 2017, Using random forests to select optimal input variables for short-term wind speed forecasting models. *Energies*, **10**, **10**, 1522.

Wang K, Qi X, Liu H, Song J, 2018, Deep belief network based k-means cluster approach for short-term wind power forecasting. *Energy*, **165**, 840-852.

WCED SWS, 1987, World commission on environment and development. *Our common future*, **17**, **1**, 1-91.

Zhang S, 2012, Nearest neighbor selection for iteratively kNN imputation. *Journal of Systems and Software*, **85**, **11**, 2541-2552.

Zou H, Hastie T, 2005, Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the royal statistical society: series B (statistical methodology)*, **67**, **2**, 301-320.

### **internet kaynakları**

- 1- <https://sdgs.un.org/goals>, (16.04.2022)
- 2- <https://www.globalgoals.org/goals/7-affordable-and-clean-energy/>, (16.04.2022)
- 3- [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf), (14.04.2022)
- 4- <https://www.kaggle.com/datasets/berkerisen/wind-turbine-scada-dataset>, (16.05.2022)
- 5- <https://www.tureb.com.tr/>, (16.05.2022)
- 6- <https://www.renewables.ninja/>, (16.05.2022)

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055201 (1041-1050)

AKU J. Sci.Eng.22 (2022) 055201 (1041-1050)

DOI: 10.35414/akufemubid.1020732

Araştırma Makalesi / Research Article

## Hibrit Düşey Rüzgâr Türbini Tasarım ve Analizi

Barış AKBUDAK<sup>1\*</sup>, Rasim DOĞAN<sup>2</sup><sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Sistemleri Bölümü, Afyonkarahisar.<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.Sorumlu yazar\* e-posta<sup>1</sup>: baris519@hotmail.comORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9416-9493>e-posta<sup>2</sup>: rsm dgn@gmail.comORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2122-9528>

Geliş Tarihi: 24.11.2021

Kabul Tarihi: 19.10.2022

### Anahtar kelimeler

Rüzgâr;  
Darrieus;  
Savonius;  
Rüzgâr Enerjisi;  
Elektrik Enerjisi;

### Öz

Bu çalışma kapsamında, rüzgâr gücünden faydalanarak geleneksel türbinlerden farklı olarak tasarımının ve analizlerinin yapıldığı hibrit düşey rüzgâr türbinlerinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bunun için araştırmalar sonucunda üç farklı kanat tipinde tasarım ortaya koyulmuş ve analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. İncelenen türbin tasarımlarının içerisinde en yüksek verimi sağlayan kanat profilleri ile tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu tasarımlar simülasyon ortamında test edilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

## Hybrid Vertical Wind Turbine Design and Analysis

### Keywords

Wind;  
Darrieus;  
Savonius;  
Wind Energy;  
Electrical Energy;

### Abstract

Within the scope of this study, hybrid vertical wind turbines, which are designed and analyzed differently from traditional turbines, are compared by using wind power. For this purpose, as a result of the research, three different blade types were designed and analyzed. Among the turbine designs examined, designs were made with blade profiles that provide the highest efficiency. These designs were tested in the simulation environment and the results were presented.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji sistemleri arasında yer alan önemli kaynaklardan birisidir. Bu sebeple ülkeler, enerji ihtiyaçlarının ihmal edilemeyecek bir kısmını rüzgâr enerjisinden elde etmeye yönelmişlerdir (Horstink *et al.* 2020). Ülkemizde ise yüksek rüzgâr potansiyelinin varlığı, rüzgâr enerji santrallerinin hem sayısının artması hem de genişlemesi için uygun ortam sağlamaktadır. Rüzgâr türbinleri yatay ve düşey eksenli olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Yatay eksenli rüzgâr türbinleri genellikle bireysel veya küçük ölçekli kullanımlar için tercih edilmemektedir (Türkdoğan vd. 2020). Bu tür kullanımlar için geliştirilen düşey eksenli rüzgâr türbinleri ise her yönden rüzgâr alabilmesi, düşük rüzgâr hızlarında çalışabilmesi ve küçük boyutlu olmasından dolayı yatay eksenli rüzgâr türbinlerinden daha kullanışlı olduğu ortaya konulmuştur (Göktaş ve Kılıç 2019). Türkiye’de ise son zamanlarda düşey rüzgâr türbinleri üzerine

yapılan yatırımlar artmaktadır (Sercan 2017). Özellikle, sokak ve karayolu aydınlatmaları üzerine çeşitli ürünler denenmeye ve kullanılmaya başlanmıştır.

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri (DERT) sayesinde çeşitli güçlerde elektrik üretimi yapılabilmektedir. Küçük ve orta boy inşa edilecek türbinlerle mesken yapılarıdaki elektrik ihtiyacının karşılanması sağlanabilmektedir (Ragunath *et al.* 2019). Daha büyük boylarda inşa edilecek türbinlerle ise bölgesel elektrik ihtiyacının karşılanmasına yetecek üretim yapılabilmektedir (Int Kyn. 1).

Düşey eksenli rüzgâr türbinleri Darrieus ve Savonius tip olmak üzere iki ana grupta karşımıza çıkmaktadır (Johari *et al.* 2018). Darrieus tip türbinler aerodinamik bakımdan, Savonius tip türbinler ise kalkış gücü bakımından üstünlük göstermektedirler (Kumar *et al.* 2018). Bu nedenlerden dolayı, makalede tasarımı yapılan hibrit düşey rüzgâr türbininde bu iki farklı tip türbin özelliklerinin bir

arada kullanılması amaçlanmıştır. Bu konuya benzer çalışmalar literatürde yer almaktadır. Örneğin, El-Zafry (2019) hibrit modellerde dahil olmak üzere DERT türlerini incelediği çalışmada, hangisinin daha iyi performansa sahip olduğu konusunda bir çalışma gerçekleştirmemiştir. Siddiqui vd. (2016) ise deneysel bir çalışma gerçekleştirmişler, ancak hibrit düşey rüzgâr türbinin karşılaştırılmasını yalnızca bir boyutu ile ele almıştır. Loughborough Üniversitesi öğrencisi Ahmedov (2016) doktora tezinde hibrit rüzgâr türbinlerinin bilgisayar ortamında iki boyutlu modellemesini gerçekleştirmiştir. Fakat bu modellemede, kanat sayısına dikkat etmeyip gerçek bir akış durumunda oluşacak sürtünmeleri de dikkate almamıştır. Mazarbhuiya vd. (2019) rotor kanatlarındaki kalınlığın rüzgâr türbininin performansı üzerine etkisini incelemiştir. Rassoulinejad-Mousavi vd. (2013) ise hibrit rüzgâr türbini için kombine yöntemler üzerine bir çalışma yapmışlar ve iki farklı güçte türbin tasarlamışlardır. Bu türbin modelleri üzerine geliştirme yapılabileceğine dikkat çekmişlerdir.

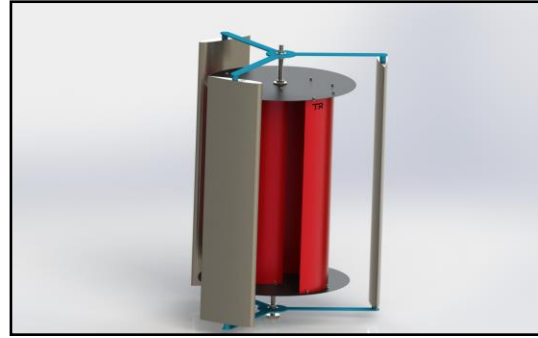
Bu makale kapsamında, araştırılan ve incelenen çalışmalardaki önemli noktalara dikkat edilerek tasarım, analiz ve üretim boyutlarıyla üç farklı türbin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar ile yapılan simülasyon sonuçlarına göre, türbinlerin dinamik ve verimli olmasına önem verilerek incelenenler içerisinde en yüksek verimi sağlayan kanat profilleri ile tasarım gerçekleştirilmiş ve hibrit düşey rüzgâr türbinlerinin aerodinamik karakteristiklerinin karşılaştırılmalı analizi yapılmıştır. Önerilen tasarım profilleri kuşkusuz rüzgârdan yüksek güç elde etme ve bu alanda araştırma boşluklarını katkıya sahip olacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

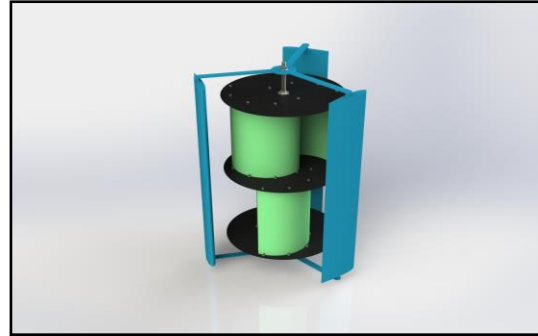
Materyal ve metot kısmında, öncelikle üç farklı tip hibrit türbin tasarımı açıklanmıştır. Sonrasında rüzgâr türbini için kritik rol oynayan kanat çizimleri gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, türbinlerin akış diyagramları da detaylıca açıklanmıştır.

### 2.1. Türbin Tasarımı

Hibrit düşey rüzgâr türbininin tasarım işlemi Solidworks programında düzenlenmiştir ve en verimli tasarım belirlenerek 3 farklı model ortaya konulmuştur (Schubel and Crossley 2012). Şekil 1’de tek katlı kanat sistemi, Şekil 2’de iki katlı kanat sistemi, Şekil 3’te ise Spiral tip kanat sistemi tasarımı yer almaktadır.



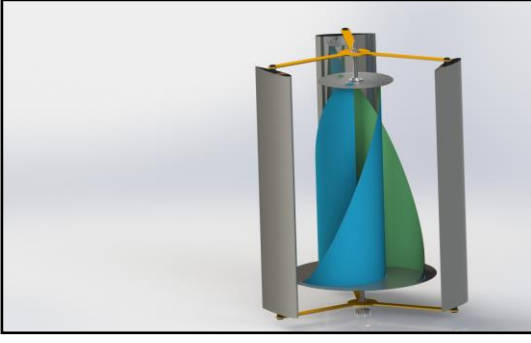
Şekil 1. Hibrit-1 Türbin (H1).



Şekil 2. Hibrit-2 Türbin (H2).

Türbin, iç ve dış kanatlar olmak üzere iki kısımdan oluşan bir yapıdadır (Kumar and Nikhade 2014). Savonius iç kanatlar, Darrieus dış kanatlardır. Rüzgâr türbinlerinde hafiflik ve esneklik bakımından genellikle kompozit malzeme kullanılmaktadır (Leon et al. 2017). Bunun yanında geleneksel kompozitlerin dışında nano mühendislikle yapılmış hibrit kompozitler de kullanılmaya başlanmıştır (Leon et al. 2017).





Şekil 3. Hibrit-3 Türbin(H3).

Kanatlar için bu projede maliyet, ağırlık ve kullanılabilirliği ön planda olan galvanizli sac tercih edilmiştir. Bu malzeme ucuz ve kolay şekillendirilebilir, aynı zamanda uzun ömürlüdür. Sac malzeme kullanılarak simülasyon ortamında tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Kanatlarda en önemli kriter hangi ortam şartlarına uygun olarak yapılacağıdır. Bunun için incelenen çalışmalardan, ortam şartlarında en yüksek verimi sağlayacak olanların tasarımlarından yararlanıldı (Mazarbhuiya et al. 2019). Bu konudaki yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen tasarımlar arasında proje için verimli olanları seçilip düzenlemeleri yapıldı. Optimizasyon işlemi sonucunda en yüksek verimde tasarım bulunduktan sonra da türbinin hava akış analizine başlandı.

## 2.2. Kanatların Çizimi

Üç farklı türbin tasarımında da hem Darrieus hem de Savonius tipi kanatlar bulunmakta ve her birinin boyut ve ölçüleri ayrı ayrı ele alınmıştır.

### 2.2.1 Darrieus Kanadının Çizimi

Bu aşamada Darrieus kanat tasarımına uygun şekil için kanat profilleri içerisinde seçim yapılması gerekmektedir. Daha önceki araştırmalarda ulaşılan sonuçlara göre, rüzgar türbinleri için en kullanışlı kanat profil çeşidi NACA profilleri olduğu belirlenmiştir (Tanürün vd. 2020).

NACA profillerinden tasarım için uygun olan 4 hane seri kesit ailesinden 0018 seçilmiştir. Bunun nedeni bu serideki kanatların üstün özellikleri ki bunlar;

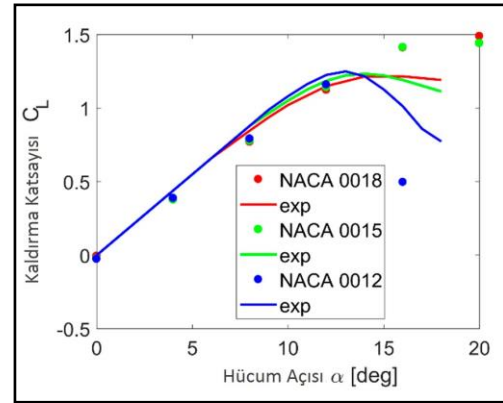
- İyi tutunma kaybı davranışı
- Basınç merkezinin büyük bir sürat aralığı içinde çok az yer değiştirmesi

• Yüze pürüzlülüğüne karşı hassas olmama  
Bu serinin zaafı ise;

- Düşük azami kaldırma katsayısı
- Göreceli yüksek direnç katsayısı
- Yüksek trim momenti

NACA 0018 kanat modeli aerodinamik performans olarak düşey türbinler için kolaylık sağladığı da rapor edilmiştir (Tanürün vd. 2020).

Ayrıca düşey türbinler için kullanılan diğer kanat tipleriyle karşılaştırması da Şekil 4'te gösterilmiştir (Rogowski et al. 2020). İncelenen projede NACA 0018 kanat profilinin azimut açısı basınç değerleri vs. diğer üstün özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



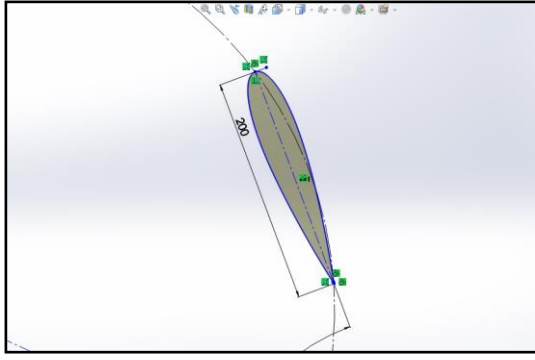
(b)

Şekil 4. NACA 0012, NACA 0015 ve NACA 0018'in aerodinamik kanat profili özelliklerinden kaldırma katsayısının karşılaştırılması.

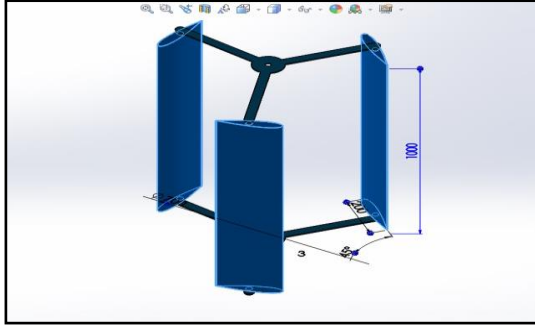
Çizimin ilk aşamasında dış kanat şablonu için Şekil 5a'da gösterildiği gibi kanat veter uzunluğu 20 cm ve Şekil 5b'de gösterildiği gibi yüksekliği de 100 cm olarak alınmıştır. Ayrıca 3 kanadın aralarındaki mesafe 360 derecenin düzlemde 45 derecelik boşluklarla eşit olarak yerleştirilmesiyle yapılmıştır (Akbudak 2021).

Darrieus kanatlarının sayısının üç olmasının nedeni ise pervanenin tüm hızlarda sabit atalet momentine sahip olmasıdır (Elibüyük ve Üçgül 2014). Bununla birlikte kanatların aerodinamik olarak titreşimini en az seviyede tutmak için de bu sayı kullanılır.





(a)



(b)

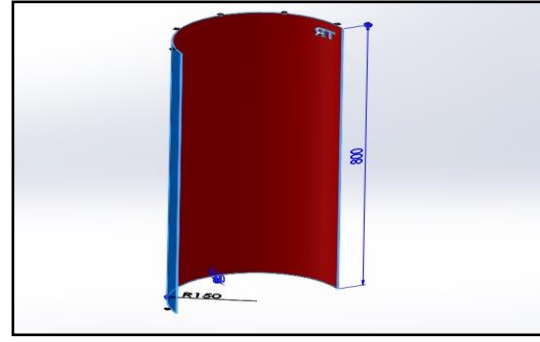
Şekil 5. (a) Darrieus kanatlarının kesit görünümü ve (b) son hali.

Kanatları birbirine bağlamak için hem aşağı hem yukarıda olmak üzere 35 cm uzunluğunda çubuklar kullanılmıştır. Çubukların ortada birleşmesi için de 10 cm çapında kazayağı metal kullanılmıştır.

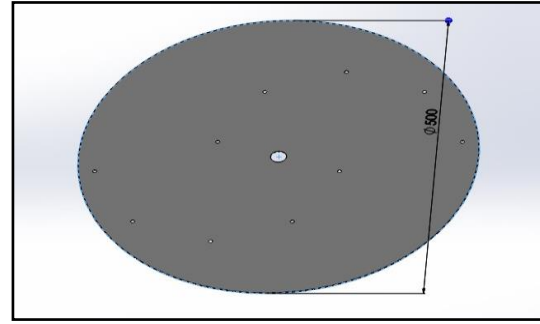
### 2.2.2 Savonius Kanadının Çizimi

Tasarlanan üç tip hibrit düşey rüzgâr türbinlerinin kendi içinde farklı kanatları bulunmaktadır. Makalede bulunan türbinlerin kanatları ikili ve üçlü seçilmiştir (Kılıç ve Göktaş 2018).

H1 türbinindeki kanat, Şekil 6a'da gösterildiği gibi 15 cm yarıçapında ve 80 cm uzunluğunda 0,5 mm levhanın yarım daire şeklinde bükülmesiyle meydana gelmektedir. Bükülen levhanın üst ve altında Şekil 6b'de görülen 2 adet 50cm çapında 1 mm kalınlığında metal levha bulunmaktadır. Kalınlığın 1 mm olmasının nedeni ise levhaların üzerine koyulan kanatların taşınması ve levha ağırlığının orta mile binen yükünün azaltılmasıdır. Bükülen levha ile diğer metal levhanın üst ve alt bağlantısı yapılarak H1 türbininin iç kanadı tamamlanmıştır (Akbudak 2021).



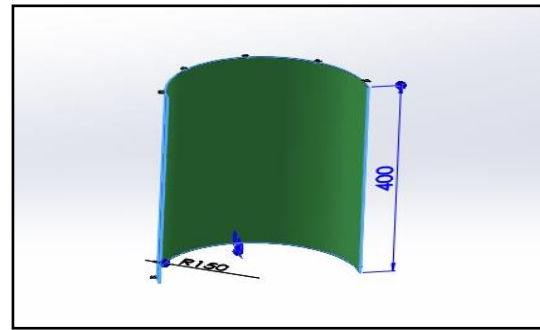
(a)



(b)

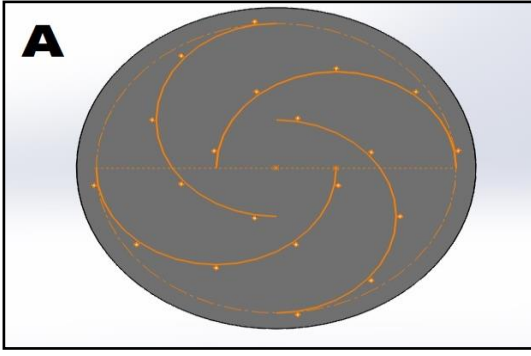
Şekil 6. (a) H1 Savonius kanatları ile (b) üst ve alt levhası.

H2 türbininde ise, buradaki kanat yapısı Şekil 7'de gösterildiği gibi 15 cm yarıçapında ve 40 cm uzunluğunda 0,5 mm levhanın bükülmesiyle meydana gelmektedir (Akbudak 2021).

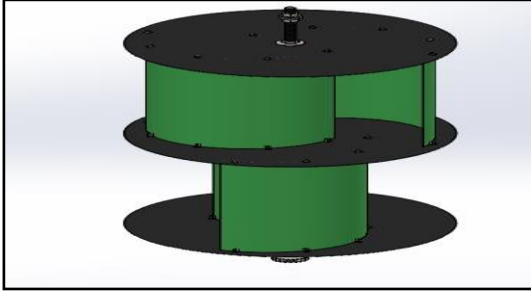


Şekil 7. H2 Savonius kanatlarının çizimi.

Bu tasarımda 2 kat bulunmakta ve her kat 2 kanatlı bir yapıya sahiptir. Bükülen kanatların üst, alt ve ortasında 3 adet 50 cm çapında 1 mm kalınlığında metal levha bulunmaktadır. Orta levha Şekil 8'deki gibi tasarlanırken alt ve üst levhalar H1 türbini için tasarlanan levhalarla aynıdır (bkz. Şekil 6b). Ancak üst iki kanat alt iki kanatla aynı yönde değil, 90° döndürülmüş haldedir (bkz. Şekil 9).



Şekil 8. 4 kanat için delinen orta levha.



Şekil 9. H2 türbin kanatlarının son hali.

H3 türbinindeki kanat yapısı 0,5 mm levhanın Şekil 10a'da gösterildiği gibi 15 cm yarıçapında ve 81 cm uzunluğunda bükülmesinden sonra 20° açıyla kesilmesi sonucunda meydana gelmektedir. Bu tasarımda kanatlardan 3 tane kullanılmıştır. Bükülüp kesilen kanatların altına ve üstüne diğer tasarımlardaki gibi levhalar (bkz. Şekil 6b), kanatların sabitlenmesi için delinmiş ve yerleştirilmiştir (bkz. Şekil 10b).

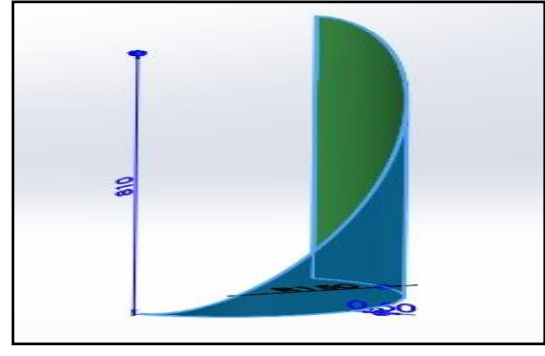
### 2.3. Türbinlerin Akış Analizleri

Çizim ve tasarım işlemleri yapılan türbinlerin, akış analizleri aşaması ANSYS programında gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar tekniği kullanılarak yapılan analiz için öncelikle sınırların belirlenmesi (Şekil 11) ve sonrasında ise bu sınırlar içerisindeki ağ örgüsünün oluşturulması gerekmektedir (Akbudak 2021).

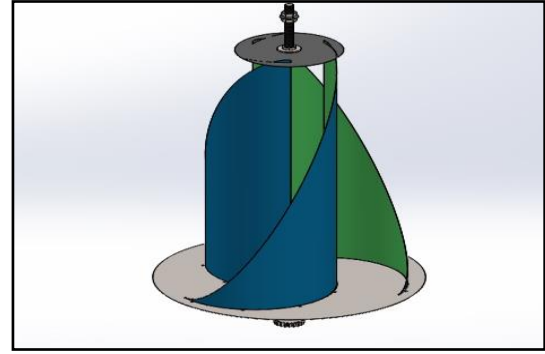
Oluşturulan ağ örgüsü sayıları her bir tasarım için ayrı ayrı Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Ağ örgüsü değerleri.

Model	Ağ örgü sayısı
H1	782968
H2	853626
H3	1619355

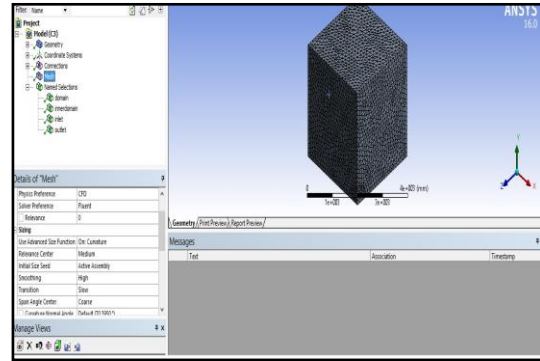


(a)



(b)

Şekil 10. (a) H3 Savonius kanatları ve (b) son hali.



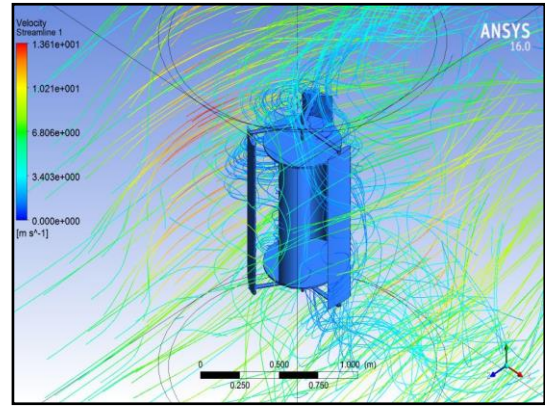
Şekil 11. Türbinin ağ örgüsünün yapılması.

Ağ yapısının belirlenmesinden sonra, gerekli olan verilerin girişleri yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir (Akbudak 2021). Bu veriler;

- Hava değerinin yoğunluğu: 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- Hız büyüklüğü: 5m/s
- Türbülans yoğunluğu: %0,01
- Viskozite oranı: 0,5
- Geri akış türbülans yoğunluğu: %0,01
- Geri akış viskozite oranı: 0,5
- Adım boyutu: 0,1sn
- Adım sayısı: 150
- Maksimum iterasyon: 20

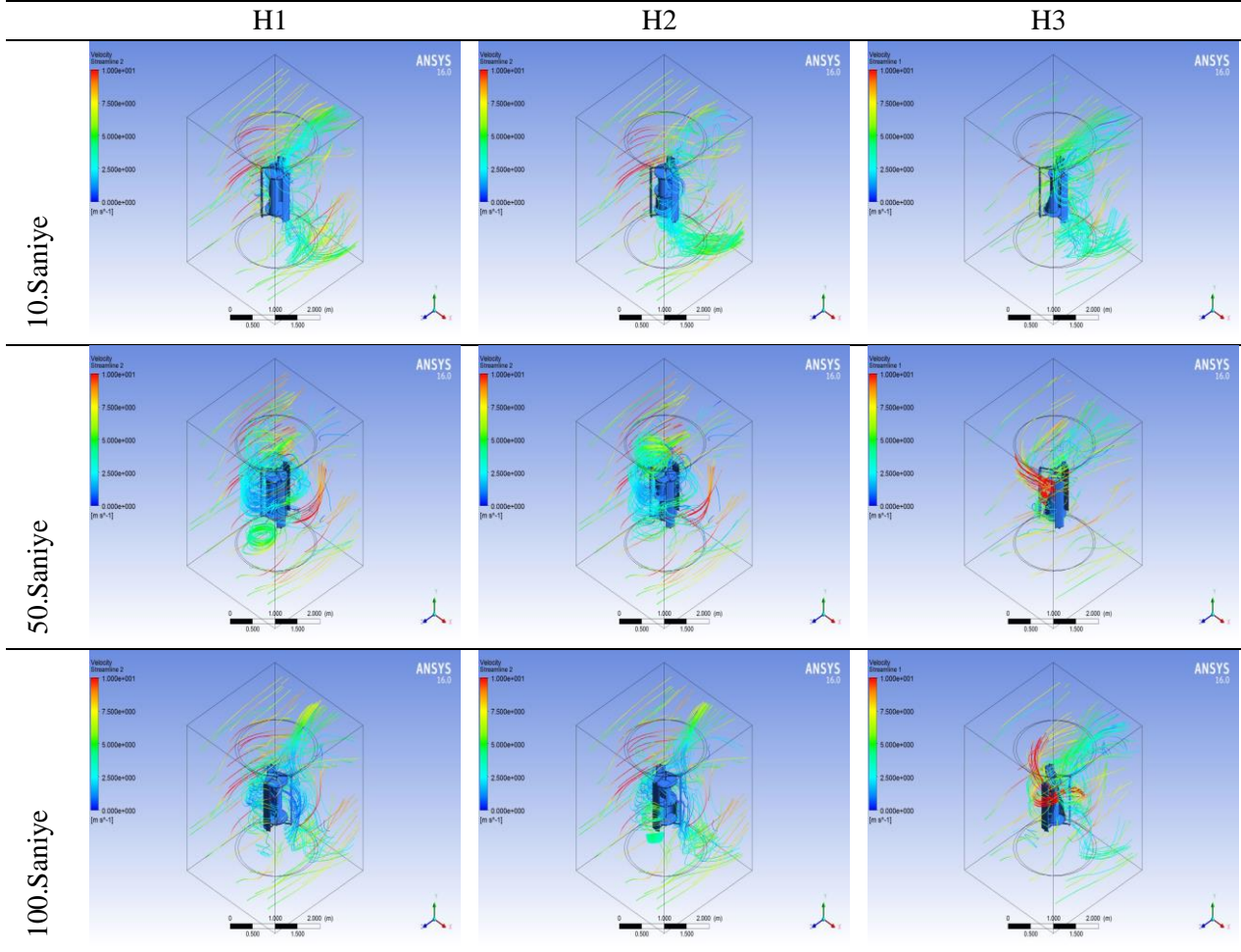
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada H1, H2 ve H3 olmak üzere 3 farklı tip hibrit düşey rüzgâr türbininin tasarım ve performansları incelenmiştir. Ulaşılan sonuçlara göre türbinlere uygulanan 5m/s rüzgâr hızının türbin kanatlarındaki hareketliliği Şekil 12’de sunulmaktadır. Uygulanan rüzgâr ile türbin dönmeye başlamış ve rüzgâr hızı renklerle belirtilmiştir. Yeşil çizgiler 6,8m/s hızı gösterirken mavi çizgiler 3,4m/s hızı ifade etmektedir (Akbudak 2021). Uygulanan rüzgâr hızına göre, 10, 50, 100, 130 ve 150sn sonunda üç ayrı türbinin verdiği tepkilerin karşılaştırılması Çizelge 2’de gösterilmiştir. Türbinlerin rüzgâr tepkileri sonrasında, vektörel hız akış incelemesi de Çizelge 3’te sunulmuştur.

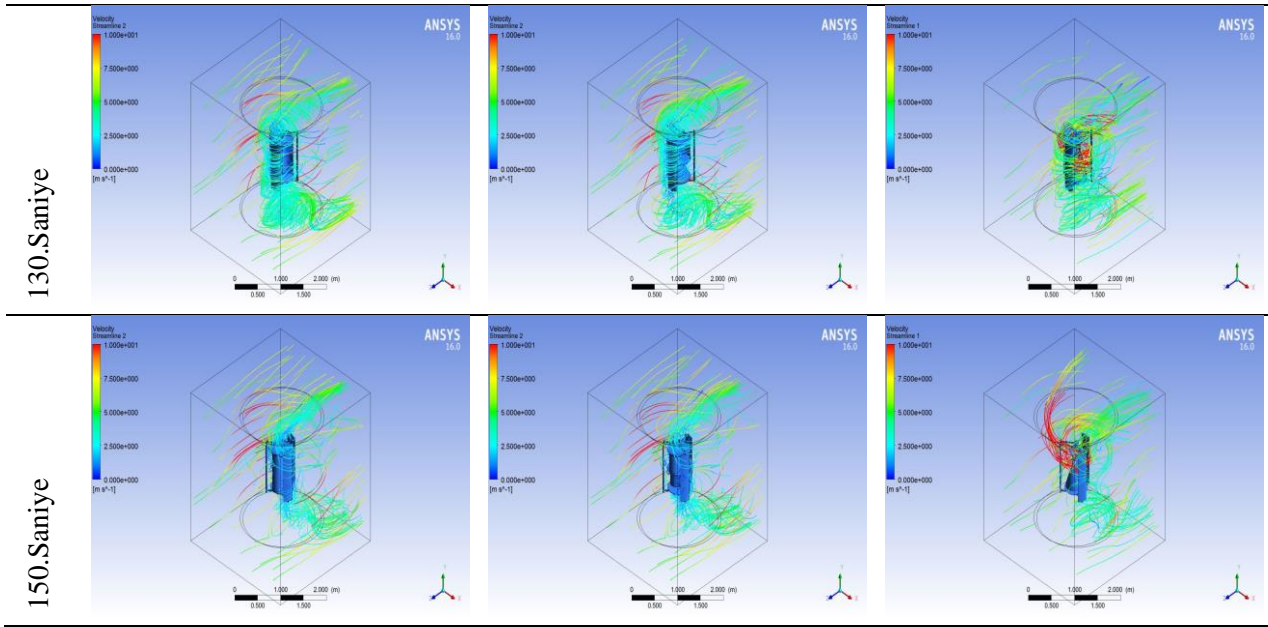


Şekil 12. Türbine uygulanan rüzgâr kuvveti.

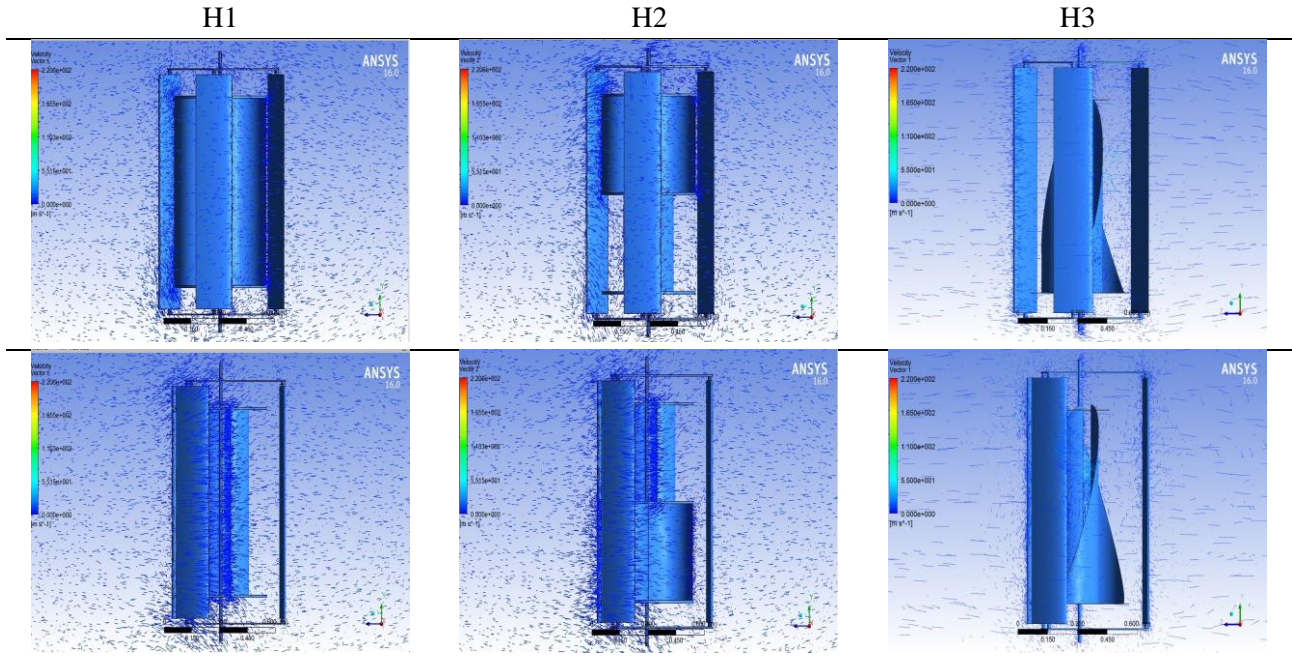
Çizelge 2. Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin karşılaştırılması.







Çizelge 3. Türbine uygulanan rüzgâr kuvvetinin vektörel karşılaştırılması.



Görüldüğü üzere H1, H2 ve H3 türbinlerine uygulanan rüzgâr enerjisinin türbinleri döndürmesi ve rüzgârın türbinden çıkarken savurulması işlenmiştir (bkz. Çizelge 2). Buradaki her satır belli bir zamandaki türbin durumunu göstermektedir. Uygulanan rüzgâr kuvvetinde rüzgâr ilk olarak iç kanatlara çarpmış ve dönüşe başlamıştır. Devamında türbin dış kanatlarındaki hava akımının kaldırma etkisi ile dönüşüne devam etmiştir. Türbin dönmeye devam ederken hava akımlarının farklı zamanlarda kanadı terk etmesinden dolayı basınç farkı oluşmuştur.

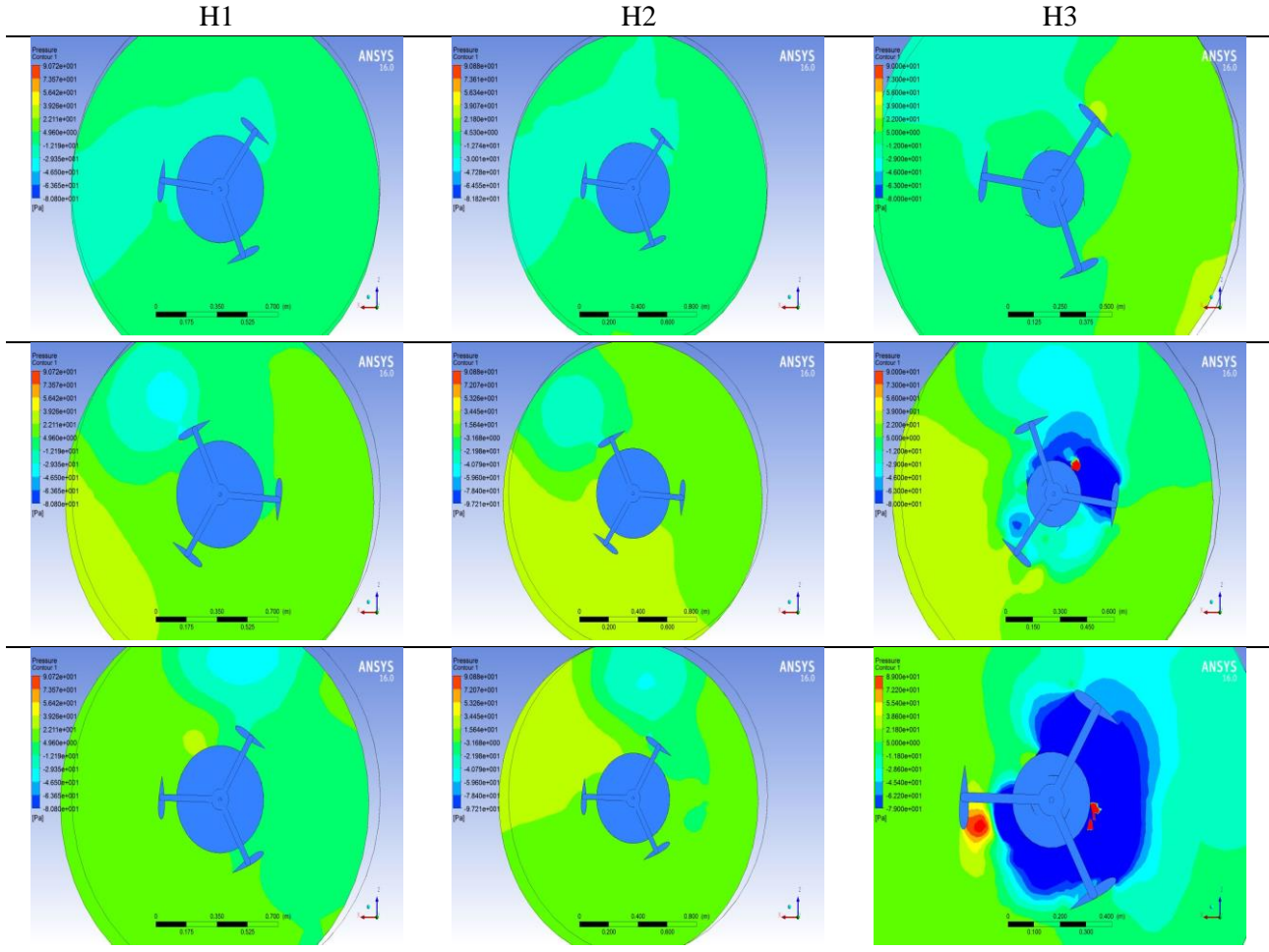
Üç türbin için de basınç farkı Çizelge 4'te gösterilmiştir. Kanat ön ve arka bölgesinde oluşan basınç farkından tork üretimi oluşmaktadır. H1 ve H2 türbinlerindeki basınçlar 5 Pa ile 50 Pa arasında normal değerler gösterirken H3 türbininde kırmızı renkli görünen yer belli bir zaman sonra kanatlardaki uç basınç yükselişini, mavi renkli kısım ise basınç düşüşünü ifade etmektedir.

Çizelge 3'te vektörel karşılaştırmada ise rüzgârın türbinlere noktasal çarpması gözükmemektedir. Burada en dikkat çekici kısım H2 türbininin 90°'lik 2 katlı kanatlarının her yönden rüzgârı alışıdır. Elde edilen şekil örüntülerini daha iyi anlamak ve

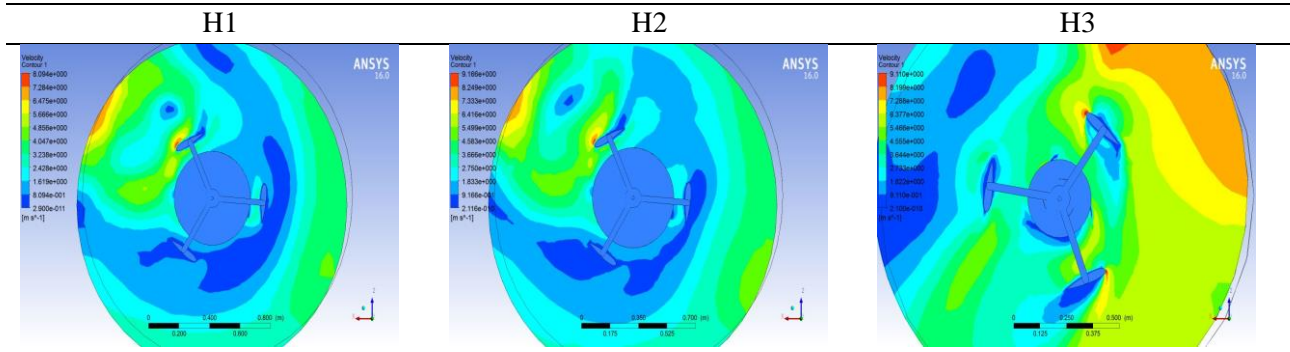
yorumlamak için yüzeysel hız dağılımlarına da bakılması gerekmektedir (Akbudak 2021). Çizelge 5'te yüzeysel hız dağılımları gösterilmiştir. Yüzeysel hızlara göre türbinlerdeki yeşil renkli kısımlar, optimum rüzgâr hızını gösterirken mavi renkli kısımlar ise düşük rüzgâr hızını göstermektedir. H1 ve H2 türbinlerine uygulanan rüzgârın, türbin

çıkışında mavi renge döndüğü yani türbinin rüzgârı kullandığı görülmektedir. H3 türbininde ise uygulanan rüzgâr türbin çıkışında yeşil-mavi karışımı renkte gözükmemektedir. H3 türbinini spiral tip olduğu için rüzgârı yukarı yönlü kaldırmış ve dışarı yönlendirmiştir.

Çizelge 4. Türbinlerdeki basınç farklılıkları.



Çizelge 5. Türbinlerin yüzeysel hız dağılımları.



Hava gücü ve türbin gücü sonuçları formüller ve görsellerden yararlanılarak bulunmuştur (Akbudak 2021). Türbin gücü ve rüzgâr gücü

karşılaştırmalarına göre H2 türbinini H1 türbininden %32 H3 türbininden %37 daha fazla güç üretebileceği (bkz. Çizelge 6) görülmüştür.

**Çizelge 6.** Analizleri yapılan türbinlerin rüzgâr ve türbin güçlerinin karşılaştırılması.

Türbin Adı	Ortalama Hız Değeri (m/s)	Rüzgâr Gücü (W)	Türbin Gücü (W)
H1	7	660	251
H2	8	985	374
H3	6,85	618	235

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada hibrit düşey rüzgâr türbinlerinin aerodinamik karakteristiklerinin karşılaştırılması analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde listelenmiştir.

- Çizim ve tasarım işlemi yapılan model türbinlerin uygulanan rüzgârla birlikte gösterdikleri dönme eğilimleri, H1, H2 ve H3 türbinlerinin hepsinde de yüksek seviyede olduğu gösterilmiştir.
- Uygulanan kuvvetin vektörel gösteriminde de dikkat edileceği üzere türbinlerin tüm kanatlarına noktasal olarak rüzgâr teması söz konusudur. Burada dikkat edilirse H2 ve H3 türbinlerinin uygulanan kuvveti dış kanatlara daha çok ilettiği böylece dönmeye devam etme gücünü arttırdığı belirlenmiştir.
- İncelenen basınç farklarına göre H3 türbininde Savonius yani iç kanatlarında belli bir zaman sonra basınç farkının arttığı gözlemlenmiştir. H3 türbininin kanat açıklıkları dikkate alındığında havayı yukarı yönlü süpürmesi kanatın üst kısımlarında basıncın artmasına neden olmuştur. Bu basınç farkı zamanla türbinde dış kanatlarda da hissedilmiştir.
- Yüzeysel hız dağılımlarında H1 ve H2 türbinleri yakın değerler gösterirken H3 türbini biraz daha yavaş kalmıştır. Bunun sebebi kanat ucunda oluşan basınçtır. Bu durum, dönme hızının düşük ve basıncının yüksek olması nedeniyle aerodinamik olarak daha yavaş bir hıza sahip olmasına neden olmuştur.
- Bu araştırma neticesinde H2 türbininin diğer iki türbine göre çok yönlü rüzgâr alması, başlangıç dönme hareketi ve devamlılığı gibi özellikleriyle diğerlerine oranla daha başarılı olduğu aerodinamik olarak ortaya konulmuştur.

#### 5. Kaynaklar

- Ahmedov, A.S., 2016. Investigation of the Performance of a Hybrid Wind Turbine Darrieus-Savonius. Doktora Tezi, University of Ruse 'Angel Kanchev', Ruse, 40.
- Akbudak, B., 2021. Hibrit Dikey Rüzgâr Türbini Tasarım ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 66.
- Elibüyük, U. ve Üçgül İ., 2014. Rüzgar Türbinleri, Çeşitleri ve Rüzgar Enerjisi Depolama Yöntemleri. *Yekarum e-Dergi*, **2**, 1-14.
- El-Zafry, A.M.A., El-Hameed, O.E., Hassan, M.S., and Shaheen, M.M., 2019. A review on the types of vertical axis wind turbine sand the methods of their performance study. *Journal of Multi disciplinary Engineering Science and Technology*, **6**, 10633–10643
- Göktaş, M. ve Kılıç, F., 2019. Savonius rüzgâr türbini çevresindeki hava akışının hesaplanabilir akışkanlar dinamiği yöntemi ile analizi. *Politeknik Dergisi*, **22**, 11-17.
- Horstink, L., Wittmayer, J.M., Ng, K., Luz, G.P., Marín-González, E., Gährs, S., Campos, I., Holstenkamp, L., Oxenaar, S. and Brown, D., 2020. Collective Renewable Energy Prosumers and the Promises of the Energy Union: Taking Stock. *Energies*, **13**, 421.
- Johari, M.K., Jalil, M. and Shariff, M.F.M., 2018. Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). *International Journal of Engineering and Technology*, **7**, 74-80.
- Kılıç, F. ve Göktaş, M., 2018. Savonius Rüzgâr Türbini (İkili ve Üçlü) Kanat Çevresi Akışının Sayısal Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **22**, 1256-1261.
- Kumar, A. and Nikhade, A., 2014. Hybrid Kinetic Turbine Rotors: A Review. *IJESAT*, **4**, 453-463.
- Kumar, R., Raahemifar, K. and Fung, A.S., 2018. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **89**, 281-291.
- Leon, M.Jr., Kim, B., Helga, N.P., Justine, B., Malcolm M. and Bent, F.S., 2017. Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, **10**, 1285.
- Mazarbhuiya, H.M.S.M., Biswas, A. and Sharma, K.K., 2019. Experimental Investigation on the Performance of Varying Thickness H-Darrieus Rotor. *J. Phys: Conf. Ser.*, **1172**, 012082.

- Ragunath, S.V., Pandey, J.K., Mondal, A.K. and Karn, A., 2019. Electricity Generation from Wind Turbines at Low Wind Velocities: A Review. *SSRN*, 1, 33.
- Rassoulinejad-Mousavi, S.M., Jamil, M. and Layeghi, M., 2013. Experimental Study of a Combined Three Bucket H-Rotor with Savonius Wind Turbine. *World Applied Sciences Journal*, **28**, 205-211.
- Rogowski, K., Hansen, M. and Bangga, G., 2020. Performance Analysis of a H-Darrieus Wind Turbine for a Series of 4-Digit NACA Airfoils. *Energies*, **13**, 3196.
- Sercan, A., 2017. Kanatlarına Basamak Açmanın Darrieus Düşey Eksenli Rüzgar Türbini Güç Üretimine Etkisi, *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **19**, 399-409.
- Schubel, P.J. and Crossley, R.J., 2012. Wind Turbine Blade Design. *Energies*, **5**, 3425-3449.
- Siddiqui, A.S., Mian, N.S., Alam, M., Haq-ul, M.S., Memon, A.H. and Energy, M.S.J., 2018. Experimental Study To Assess The Performance of Combined Savonius Darrieus Vertical Axis Wind Turbine At Different Arrangements. *2018 IEEE 21<sup>st</sup> International Multi-Topic Conference*, 1-8.
- Tanürün, H.E., Ata, İ., Canlı, M.E. ve Acır, A., 2020. Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, **23**, 371-381.
- Türkdoğan, S., Mercan, M.T. ve Çatal, T., 2020. Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Sistemleri Kullanılarak 40 Hanelik Bir Topluluğun Elektrik ve Termal Yük İhtiyacının Karşıllanması: Teknik ve Ekonomik Analizleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **18**, 476-485.

### **İnternet Kaynakları**

- 1- <https://qz.com/763715/>, (01.05.2021)



## Araştırma Makalesi / Research Article

**Farklı Sıcaklıklarda Kurutulmuş Madımak Bitkisinin (*Polygonum cognatum* Meisn.) Kuruma Hızının ve Bazı Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi**Elif UĞUR<sup>1</sup> Ferda SARI<sup>2</sup><sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, TÜRKİYE<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü 58140, Sivas, TÜRKİYESorumlu yazar e-posta<sup>2</sup> : fesari@cumhuriyet.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2249-3489>e-posta<sup>1</sup>: ugurelif92@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1229-6454>

Geliş Tarihi: 27.04.2022

Kabul Tarihi: 22.09.2022

**Öz**

Bu çalışmada madımak (*Polygonum cognatum* Meisn.) bitkisi tepsili kurutucuda 40, 50 ve 60 °C'de kurutulmuştur. Sıcaklığın madımağın kuruma kinetiği, toplam fenolik madde içeriği, antioksidan kapasitesi, klorofil a, b ve toplam klorofil miktarı üzerine etkisi incelenmiştir. Madımağın kuruma eğrisini tanımlamak için Page, Newton ve Weibull olmak üzere 3 farklı model test edilmiştir. Uygulanan tüm koşullarda en iyi uyum sağlayan modelin Page model olduğu belirlenmiştir. Kurutma azalan hız periyodunda gerçekleşmiş olup uygulanan sıcaklığın artmasıyla kuruma oranı artmış ve kuruma süresi ise azalmıştır. Kurutulmuş madımağın toplam polifenol içeriği ve antioksidan kapasitesi sırasıyla 21.06-27.80 mg GAE g<sup>-1</sup> KM ve % 66.82-76.33 arasında değişmiştir. Her üç sıcaklık için de, kurutma sonrası madımağın toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan kapasitesinde taze örneğe göre azalma saptanmıştır. Azalma en fazla 40 °C'de en az ise 60 °C'de tespit edilmiştir. Uygulanan tüm sıcaklıklar için, kurutulmuş madımağın taze örneğe göre daha az klorofil a, b ve toplam klorofil içerdiği belirlenmiştir. Klorofildeki bu azalma, en fazla 60 °C'de en az ise 40 °C'de gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler**

Kurutma; Madımak (*Polygonum cognatum* Meisn.); Toplam fenolik; Antioksidan aktivite; Klorofil

**Determination of Drying Rate and Some Quality Parameters of Madımak (*Polygonum cognatum* Meisn.) Dried at Different Temperatures****Abstract**

In this study, madımak (*Polygonum cognatum* Meisn.) was dried in a convective dryer at the temperatures of 40, 50 and 60 °C. The effect of temperature on the drying kinetics, total phenolic content, antioxidant capacity, chlorophyll a, b and total chlorophyll content of madımak plant was investigated. Three different models, Page, Newton and Weibull, were tested to define the drying curves of madımak. It was determined that the best fit model in all conditions applied was the Page model. Drying took place in the decreasing rate period, and with the increase in the temperature applied, the drying rate increased and the drying time decreased. Total polyphenol content and antioxidant capacity of dried madımak varied between 21.06-27.80 mg GAE g<sup>-1</sup> DM and 66.82-76.33 % respectively. For all temperatures applied, after drying, the total phenolic content and antioxidant capacity of madımak decreased compared to the fresh sample. The highest and the lowest decreases were detected at 40 °C and 60 °C, respectively. For all temperatures applied, dried madımak contained less chlorophyll a, b and total chlorophyll contents than fresh one. The highest and the lowest decreases in chlorophyll contents were detected at 60 °C and at 40 °C, respectively.

**Keywords**

Drying; Madımak (*Polygonum cognatum*); Total phenolic; Antioxidant activity; Chlorophyll



## 1. Giriş

Bitki örtüsü zenginliği bakımından Anadolu, dünyanın önemli bölgelerinden biridir. Birçok yabancı ot Anadolu'da doğal olarak yetişmektedir. Bu otlar daha çok taze olarak, salata veya işlenmiş gıdalar olarak tüketilmektedir (Sayili *et al.* 2013). Madımak olarak adlandırılan *Polygonum cognatum* Meisn, Polygonaceae familyasından Orta Anadolu'ya özgü endemik bir bitkidir (Çevik *et al.* 2014) ve yol kenarlarında, tarla sınırlarında ve tarım yapılmayan alanlarda yetişir (Baytop 1999, Yıldırım *et al.* 2003). Madımak Tokat, Sivas, Amasya, Çorum illerinde geleneksel bir Türk yemeği olarak yaygın olarak tüketilmektedir. Daha önce geleneksel olarak toplanıp evlerde tüketilen madımak, giderek ticari bir ürüne dönüşmüştür. Bu nedenle artan pazar ihtiyacını karşılamak amacıyla madımak tarımı yapılmaya başlanmıştır (Özkurt 2008). Madımlar ilkbahar mevsiminde (Nisan, Mayıs ve Haziranın ilk yarısı) toplanmaktadır. Ayrıca kurutularak kışlık olarak da kullanılmaktadır. Tarımsal ürünlerin kurutularak dayanıklılık kazandırılması yöntemi, insanın doğadan öğrendiği en eski muhafaza yöntemidir (Aral and Beşe 2016). Gıdaların mikrobiyolojik, enzimatik ve kimyasal olarak bozulması su aktivitesi ile ilgilidir. Gıdaların kurutulmasında amaç gıdada bulunan su miktarının bu reaksiyonları durduracak seviyeye düşürülmesidir (Xu *et al.* 2017). Kurutulan ürünün kalitesi, kurutma koşullarının yanı sıra kurutma yönteminden de büyük ölçüde etkilenir (Naidu *et al.* 2016).

Bu çalışmada madımların (*Polygonum cognatum*) farklı sıcaklıklarda kurutulması ve uygulanan farklı sıcaklıkların kurutma kinetiği üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca sıcaklığın toplam fenolik madde içeriği, antioksidan kapasite, klorofil a, b ve toplam klorofil miktarı üzerine etkileri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan madımlar Sivas'ta yerel bir pazardan satın alınmıştır. Madımlar +4 °C'de muhafaza edilerek 24 saat içerisinde denemeye alınmıştır.

## 2.2 Yöntem

### 2.2.1 Kurutma

Çalışmada kullanılan tepsili kurutucu EKSiS Makine Tic. Ltd. Şti. (Isparta) tarafından üretilmiştir. Kurutma işlemi sabit hava hızında (0.5 m/s), 40, 50 ve 60 °C'de yapılmıştır. Kurutma işlemi yıkanmış ve kağıt havlu ile kurulan madımların sağlıklı kısımlarından yaklaşık 5 g alınarak tek sıra olacak şekilde tel sepetlere dizilerek gerçekleştirilmiştir. Kurutma kinetiğinin belirlenmesinde örnekler sabit tartıma ulaşıncaya kadar her 15 dakikada bir kurutucudan alınıp  $\pm 0.01$  g hassasiyete sahip dijital tartım cihazında (AND GX 4000) tartılmıştır. Her bir tartım süresinin 10 saniyeyi geçmeyecek şekilde yapılmasına dikkat edilmiştir. Denemeler üç tekrarlı yapılmıştır.

### 2.2.2 Nem İçeriğinin Ve Kuruma Hızının Belirlenmesi

Madımların kurutulması sırasında, herhangi bir t süresindeki nem içeriği hesaplanmıştır (Eşitlik 1).

$$M_t = \frac{m - KM}{KM} \quad (1)$$

Burada,  $M_t$  t süresindeki nem miktarını ( $g\ su\ g^{-1}\ KM$ ), m numunenin kütlesini (g), KM numunenin kuru madde miktarını (g) belirtmektedir.

Kuruma hızı ( $g\ su\ g^{-1}\ KM\ sn$ ), aşağıdaki eşitlik kullanılarak, nem içeriğine karşılık kuruma süresi eğrilerinin türevleri alınarak bulunmuştur.

$$\text{Kuruma Hızı} = -\frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad (2)$$

Burada,  $M_{t+dt}$ , t + dt süresindeki nem içeriğini ( $g\ su\ g^{-1}\ KM$ ), dt ise kuruma süresini (saniye) belirtmektedir.

### 2.2.3 Nem Oranının Hesaplanması

Modellemelerde madımların ağırlık değişimlerinden hesaplanan nem oranı değerleri (Eşitlik 3) kullanılmıştır.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (3)$$

Burada MR, nem oranını (birimsiz),  $M_t$ , t süresindeki nem miktarını ( $g\ su\ g^{-1}\ KM$ ),  $M_o$ , başlangıç nem miktarını ( $g\ su\ g^{-1}\ KM$ ),  $M_e$ , denge nem miktarını (0 kabul edilir) ( $g\ su\ g^{-1}\ KM$ ) belirtmektedir.

### 2.2.4 Kurutma Prosesinin Modellenmesi

Madımakların kuruma davranışını açıklamak için Newton, Page ve Weibull modelleri test edilmiştir (Çizelge 1). Modellerin deneysel verilere uyumu doğrusal olmayan regresyon yapılarak MİNİTAB (16) istatistik programında belirlenmiştir. En uygun modelin belirlenmesi için validasyon yapılmıştır. Modeller ile nem oranlarının tahmin edilmesinde iki tekerrür ortalaması kullanılarak validasyon 3. tekerrür sonuçları ile yapılmıştır.

**Çizelge 1.** Modellemede kullanılan eşitlikler

Model	Eşitlik	Kaynaklar
Newton	$MR = \exp(-k \cdot t)$	Soysal (2006)
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$	Soysal (2006)
Weibull	$MR = \exp(-t/\alpha)^\beta$	Babalıs et al. (2006)

Modelin kuruma eğrilerine uyumunu belirlemek için regresyon katsayısı ( $R^2$ ), ortalama karesel hatanın karekökü (RMSE) ve  $\chi^2$  hesaplanmıştır. RMSE ve  $\chi^2$  değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır (Walther and Moore 2005).

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{tah,i} - MR_{den,i})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{tah,i} - MR_{den,i})^2}{N-z} \quad (5)$$

Burada, N gözlem sayısını, z kullanılan modeldeki katsayı sayısını,  $MR_{den,i}$ , deneysel nem oranının i. düzeyi,  $MR_{tah,i}$ , modelden tahmin edilen i. düzeyi belirtmektedir.

## 2.3 Analizler

### 2.3.1 Örneklerin Ekstraksiyonu

Kurutulan madımaklar kahve öğütücüde (Sinbo) öğütülmüş ve daha sonra elek açıklığı 300  $\mu m$  ve 150  $\mu m$  olan eleklerden (RETSCH) geçirilmiştir. Ekstraksiyon için taze ve kurutulmuş örneklerden 0.2 g alınarak üzerine 10 ml 50 °C'de saf su konulmuştur. Daha sonra 30 dakika 50 °C'deki çalkalamalı su banyosunda tutulmuştur. Ardından 1

dakika vortekste karıştırılan örnekler filtre kağıdından süzölmüştür. Ekstraktlar analize kadar -18 °C'de tutulmuştur.

### 2.3.2 Toplam Polifenol Tayini

Madımakların toplam polifenol içeriği ISO (14502-1:2005) yöntemi kullanılarak yapılmış sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE)  $g^{-1}$  kuru madde (KM) olarak ifade edilmiştir.

### 2.3.3 Antioksidan Kapasite Tayini

Örneklerin antioksidan kapasitesi, DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) yöntemi (Türkmen et al. 2009) kullanılarak belirlenmiştir.

### 2.3.4 Klorofil Ekstraksiyonu ve Analizi

Klorofil ekstraksiyonunda % 80'lik soğuk aseton kullanılmıştır (Shivanna ve Subban 2014, Sun ve Li 2017). 0.05 g örnek üzerine feofitinizasyonu önlemek için 0.01 g  $MgSO_4$ , klorofillerin ekstraksiyonu için 3 ml % 80'lik aseton ilave edilerek 30 s havanda ezilmiştir. Daha sonra süpernatant alınarak kalıntı üzerine 3 ml aseton ilave edilmiştir. Bu işlem 4 defa tekrarlanmıştır. Elde edilen süpernatantlar birleştirilerek 1 dakika vortekste karıştırılarak filtre kağıdından süzölmüş ve spektrofotometrede (Optima, SP-3000 plus) 645 ve 663 nm'de absorbanları ölçülmüştür. Hesaplama aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır. Sonuçlar mg klorofil  $g^{-1}$  KM olarak ifade edilmiştir.

$$Klorofil\ a\ (mg\ L^{-1}) = 12.72 * A_{663} - 2.59 * A_{645} \quad (8)$$

$$Klorofil\ b\ (mg\ L^{-1}) = 22.88 * A_{645} - 4.67 * A_{663} \quad (9)$$

$$Top.klorofil\ a\ (mg\ L^{-1}) = 20.29 * A_{645} - 8.05 * A_{663} \quad (10)$$

### 2.3.5 İstatistiksel Analiz

İstatistik analizleri, Statistica (1995) programında varyans analizi ile gerçekleştirilmiştir. Ortalamalar arasındaki önemli farklılıklar çoklu karşılaştırma testlerinden Tukey's testi yapılarak belirlenmiştir ( $p < 0.05$ ).

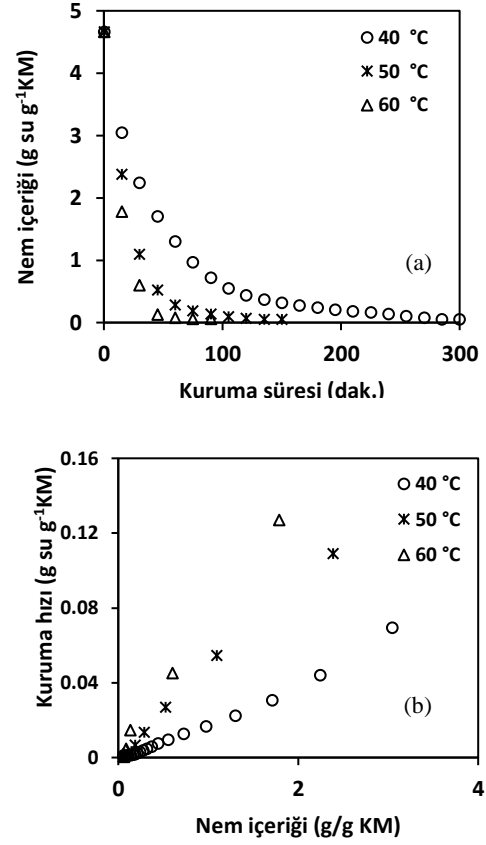
### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Farklı Sıcaklıkların Madımak Bitkisinin

##### Kurutma Kinetiği Üzerine Etkisi

##### 3.1.1 Nem İçeriği Değişimi

Madımakların başlangıç nem miktarları eşitlik 1.'e göre hesaplanmış ve  $4.67 \text{ g su g}^{-1} \text{ KM}$  olarak bulunmuştur. Madımak örneklerinin farklı sıcaklıklarda kurutma denemelerine ait kuruma süreleri 40, 50 ve  $60^\circ\text{C}$ 'de sırasıyla 300, 150 ve 90 dakika sürmüştür. Kuruma sonrası örneklerin nem içeriği ise ortalama  $0.05 \text{ g su g}^{-1} \text{ KM}$  olarak bulunmuştur. Kuruma süresi en düşük  $60^\circ\text{C}$ , en yüksek ise  $40^\circ\text{C}$  sıcaklıkta tespit edilmiştir. Sıcaklığın  $40^\circ\text{C}$ 'den  $50^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılmasıyla kuruma süresinde % 50,  $60^\circ\text{C}$ 'ye çıkarılmasıyla % 70'lik bir azalma görülmüştür. Sıcaklığın artması kuruma süresini azaltmıştır. Bu durum daha önceki çalışmalarda da tespit edilmiştir (Prabhanjan *et al.* 1995, Ramesh *et al.* 2001). Madımak bitkisinin farklı sıcaklıklarda kurutulması sırasında zamana bağlı olarak nem içeriklerinin değişimi Şekil1 (a)'da verilmiştir. Şekil 1 (a)'dan da görüldüğü gibi, kuruma süresi uygulanan kurutma sıcaklığından etkilenmiş, sıcaklık arttığında nem kaybı hızlanmış ve kuruma süresi ise kısalmıştır. Benzer durum daha önce yapılan çalışmalarda da tespit edilmiştir (Simal *et al.* 1996, Vega *et al.* 2007). Madımak örneklerinin nem içeriğindeki değişim başlangıçta hızlı iken denemelerin sonlarında ise daha yavaş olmuştur.



Şekil 1. Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş madımakların kuruma eğrisi (a) ve kuruma hızı eğrisi (b)

Kurutmanın başlangıcında en hızlı kuruma  $60^\circ\text{C}$ 'de en düşük ise  $40^\circ\text{C}$ 'de elde edilmiştir. Örneklerdeki su kaybı fazla olduğu için kuruma eğrilerinde hızlı düşüşler görülmüştür. Kurutma havası sıcaklığının artması kuruma süresinin kısalmasına neden olmuştur. Kurutma havası sıcaklığının yükselmesi kurutulan malzemeye olan ısı transferinin artmasıyla su moleküllerinin enerjisini yükselterek nemin hızlı bir şekilde uzaklaşmasına dolayısıyla kuruma süresinin de kısalmasına neden olmaktadır (Sousa *et al.* 2018). Aynı durum reyhan bitkisinin (Polatçı ve Tarhan, 2009), alıcın (Aral and Beşe 2016), ve ayvaların (Szychowski *et al.* 2018) kurutulması sırasında da görülmüştür.

##### 3.1.2 Kuruma Hızı Değişimi

Farklı sıcaklıklarda kurutulan madımak örneklerinin kuruma hızı değerleri Şekil 1 (b)'de verilmiştir. Madımakların kuruma hızları eşitlik 2'ye göre hesaplanmış olup şekilden de görüldüğü gibi

kurutmanın başlangıcında 40 °C'de 0.0694 g su g<sup>-1</sup> KM dak., 50 °C'de 0.1090 g su g<sup>-1</sup> KM dak. ve 60 °C'de 0.12682 g su g<sup>-1</sup> KM dak. olarak bulunmuştur. Sıcaklık arttığında kuruma hızının da arttığı görülmektedir. Kuruma hızı en yüksek 60 °C'de en düşük ise 40 °C'de kurutulan örneklerde görülmüştür. Kurutmanın başlarında örneklerde nem içeriği yüksek olduğu için daha çok nem difüzyonu olmaktadır. Bu durumda daha yüksek kuruma hızları elde edilmiştir. Düşük sıcaklıkta kurutma uygulandığında kurutulan materyal daha uzun süre ısıya maruz kalmaktadır. Bu durum hücre duvarlarının büzülmesine neden olarak kuruma hızını azaltmaktadır (Karunasena *et al.* 2014, Aral and Beşe 2016). Sıcaklık artışının kuruma hızını artırdığı diğer çalışmalarda da tespit edilmiştir (Gupta *et al.* 2002, Aral and Beşe 2016, İzli *et al.*

2017). Farklı sıcaklıklarda kurutulan madımakların kuruma hızı azalan hız periyodunda gerçekleşmiştir. Azalan hız periyodunda, üründeki nem oranının azalması ile kuruma hızı azalmaktadır (Sousa *et al.* 2018).

### 3.1.3 Kuruma Eğrilerinin Matematiksel Modellere Uygunluğu

Tarımsal ürünlerin farklı koşullarda kuruma eğrilerinin modellenmesinde birçok eşitlik kullanılmaktadır. Bu çalışmada madımak bitkisinin farklı sıcaklıklarda kurutulması sırasında elde edilen nem oranının kuruma süreleriyle değişimi Page, Newton ve Weibull modele göre yapılmıştır (Çizelge 1). Bu modellere ilişkin uyum verileri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş Madımak bitkisine uygulanan modellere ilişkin parametreler ve modellere uyum verileri

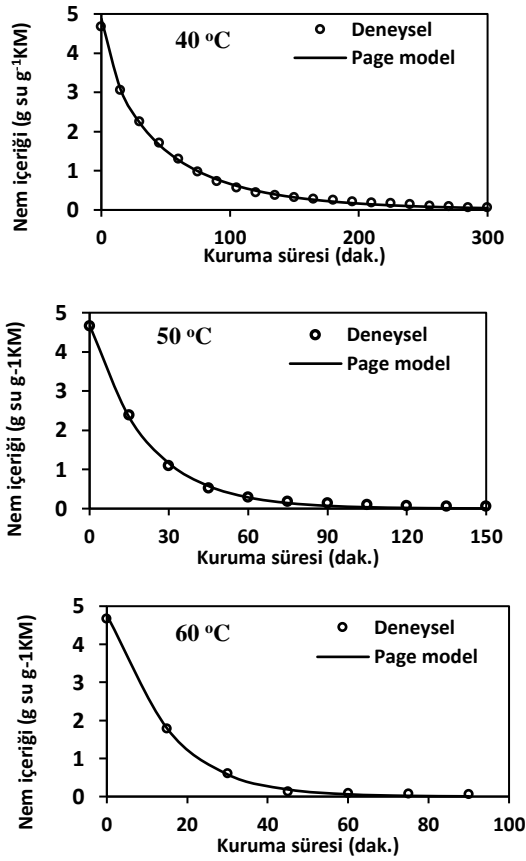
Sıcaklık (°C)	Model	Katsayılar	R <sup>2</sup>	RMSE	χ <sup>2</sup>
40	Page	k: 0.0448946; n:0.800916	0.9991	0.00772	0.00006
	Newton	k:0.0216148	0.9956	0.02683	0.00076
	Weibull	α:45.5391; β:0,800916	0.9991	0.00772	0,00006
50	Page	k: 0.0477709; n:1.01051	0.9985	0.01220	0.00018
	Newton	k:0.0464843	0.9984	0.01245	0.00017
	Weibull	α:21.5671; β:1.01051	0.9985	0.01220	0.00018
60	Page	k: 0.048685; n:1.1084	0.9994	0.00883	0.00011
	Newton	k:0.0664636	0.9984	0.01371	0.00022
	Weibull	α:15.5476; β:1.1084	0.9994	0.00883	0.00011

k: dak<sup>-1</sup> α: dak

Matematiksel modellerin uygunluğu R<sup>2</sup> değerinin yüksek, RMSE ve χ<sup>2</sup> değerlerinin ise mümkün olduğunca düşük olması ile belirlenir (Sarsavadia *et al.* 1999, Soysal *et al.* 2006). Modellere ait regresyon katsayıları (R<sup>2</sup>) dikkate alındığında tüm sıcaklık uygulamalarında Page ve Weibull modelde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bir modelin uygunluğunun belirlenmesinde RMSE'nin sifıra eşit veya yakın olması istenir (Walther and Moore 2005). Modellere ilişkin RMSE değerleri karşılaştırıldığında uygulanan tüm sıcaklıklarda RMSE değeri en düşük Page ve Weibull modellerinde tespit edilmiştir. χ<sup>2</sup> değerinin düşük olması test edilen modele uygunluğun arttığını göstermektedir. Modellere ilişkin χ<sup>2</sup> değerleri 50 °C dışındaki (bu sıcaklıkta modeller arasında farklılık olmamıştır) diğer tüm sıcaklıklarda en düşük Page ve Weibull modellerinde belirlenmiştir. Madımakların kuruma davranışını açıklamak için karşılaştırılan her üç modelin R<sup>2</sup>,

RMSE ve χ<sup>2</sup> değerleri ele alındığında Page ve Weibull modellerinin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak Page modeli gıdaların kuruma davranışlarının incelenmesinde yaygın olarak kullanıldığından ve dolayısıyla diğer çalışmalarla karşılaştırma kolaylığı sağlayacağından (Goyal *et al.* 2006, Szychowski *et al.* 2018) madımakların kuruma davranışını açıklamak için Page modelin en uygun model olduğuna karar verilmiştir. Page model parametrelerinden k 40, 50 ve 60 °C'de sırasıyla 0.0448946, 0.0477709 ve 0.048685 dak<sup>-1</sup> olarak n ise 0.800916, 1.01051 ve 1.1084 olarak bulunmuştur. Uygulanan kurutma sıcaklığının artmasıyla "k" değerlerinde artış tespit edilmiştir. Bu durum artan kurutma sıcaklığının ürün içerisindeki nem transferini artırdığından kurumanın kısa sürede gerçekleştiğini göstermektedir. Benzer bulgular çekirdeksiz üzümün (Pangavhane *et al.* 1999) ve dereotunun (Naidu *et al.* 2016) kurutulması

sonucunda da tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kurutulan madımalarda kuruma süresi ile nem içeriği değişimini gösteren deneysel değerlerin, Page denkleminde elde edilen değerlere uyumluluğu Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de Page modelin kuruma verilerine uyumunun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Mango dilimleri (Goyal *et al.* 2006) ve zencefilin (Phoungchandang and Saentaweek 2011) kuruma davranışını araştıran çalışmalarda da benzer sonuçlar belirtilmiştir.



Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda kurutulan madımalarda deneysel ve Page denkleminin tahmini nem içerikleri

### 3.2 Farklı Sıcaklıklarda Kurutmanın Madımak Bitkisinin Kalite Parametreleri Üzerine Etkisi

Sıcaklığın madımak bitkisinin toplam fenolik madde, antioksidan aktivite, klorofil a, klorofil b ve toplam klorofil üzerine etkisi incelenmiştir, Varyans analiz sonuçları ise Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Farklı sıcaklıklarda kurutmanın madımak bitkisinin kalite parametreleri üzerine etkisine ilişkin varyans analizi

Faktör	Bağımlı değişken	SD <sup>1</sup>	Kareler ortalaması	F değeri
Sıcaklık	Toplam fenolik madde	3	28.62	53.09***
	Antioksidan aktivite		64.47	166.08***
	Klorofil a		3.38	393.41***
	Klorofil b		0.21	0.01**
	Toplam Klorofil		5.11	134.81***

\*: p<0.05, \*\*:p<0.01, \*\*\*: p<0.001, <sup>1</sup>Serbestlik Derecesi

#### 3.2.1 Toplam Fenolik Madde Ve Antioksidan Aktivite Üzerine Etkisi

Sıcaklığın madımalarda toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan aktivitesi üzerine etkisi (Çizelge 3) önemli bulunmuştur (p<0.001).

Çizelge 4. Farklı sıcaklıklarda kurutulan madımalarda toplam fenolik madde (mg GAE g<sup>-1</sup> KM) ve antioksidan aktiviteleri (% inhibisyon)

Sıcaklık °C	Toplam fenolik madde	Antioksidan kapasite
Taze	27.80 ± 0.24 <sup>a</sup>	76.33 ± 0.28 <sup>a</sup>
40	21.06 ± 0.69 <sup>c</sup>	66.82 ± 0.72 <sup>c</sup>
50	24.17 ± 1.09 <sup>b</sup>	69.10 ± 0.63 <sup>b</sup>
60	27.14 ± 0.66 <sup>a</sup>	75.24 ± 0.75 <sup>a</sup>

\*: Aynı sütunda farklı harfler istatistiksel olarak birbirinde farklıdır (p<0.05)

Taze madımalarda toplam fenolik madde miktarı 27.80 mg GAE g<sup>-1</sup> KM olarak bulunmuştur (Çizelge 4). Eruygur *et al.* (2020) yaptıkları araştırmada Sivas yöresindeki madımalarda toplam fenolik miktarını 32.59 mg GAE g<sup>-1</sup> KM olarak daha yüksek bulmuşlardır. Bu farklılığın analiz yönteminin, uygulanan ekstraksiyon koşullarının ve hasat zamanının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kurutulmuş örneklerin toplam fenolik madde miktarı ise 40, 50 ve 60 °C'de sırasıyla 21.06, 24.17 ve 27.14 mg GAE g<sup>-1</sup> KM olarak tespit edilmiştir (Çizelge 4). Kurutulmuş örneklerde fenolik madde içeriği en düşük 40 °C'de en yüksek ise 60 °C'de elde edilmiştir. Taze örneklerin toplam fenolik madde içeriği sıcaklığa bağlı olarak azalmıştır. Taze örneğe göre bu azalma 40, 50 ve 60 °C'de sırasıyla % 24.24, % 13.06 ve % 2.37 olmuştur. Taze örneklere göre 40 ve 50 °C'de toplam fenolik madde miktarındaki bu azalma önemli (p<0.05) iken 60 °C sıcaklık uygulamasında önemsiz bulunmuştur (p>0.05). Benzer şekilde Kumar *et al.* (2015) hibiskus yapraklarını 65 °C'de, kuruttukları araştırmalarında

örneklerin toplam fenolik madde içeriğinde, taze örneğe kıyasla azalma tespit etmişlerdir. Madımak örneklerinin fenolik madde miktarındaki azalma en düşük 60 °C'de olmuştur. Daha önce yapılan araştırmalarda maqui meyvesinin 40-80 °C'de (Rodríguez *et al.* 2016) ve biberlerin (çili) 50-70 °C'de (Wiriya *et al.* 2009) kurutulmasında 60 °C'den düşük sıcaklıklarda uzun süren kurutma işleminin oksidasyon sonucunda fenolik bileşiklerde daha fazla kayba neden olduğu belirtilmiştir. İzli *et al.* (2017), kivi meyvesini 60, 70 ve 80 °C'de kurutmuşlar ve örneklerin toplam fenolik madde miktarı değişimine bakmışlardır. Sıcaklığa bağlı olarak taze kiviye göre 60 ve 70 °C'de toplam fenolik madde içeriğindeki kayıp % 49 iken 80 °C'deki kaybın % 5 olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar bu durumu düşük sıcaklıklardaki kurutmada (60, 70 °C) örneklerin ısıl işleme daha uzun süre maruz kalmasına neden olduğunu dolayısıyla düşük sıcaklık uygulamasının oksidatif enzimlerin tamamen inaktif olmamasına, bu nedenle fenolik bileşiklerin parçalanmasına neden olduğuna bağlamışlardır. Kim and Chin (2016) domates tozu elde etmek üzere domatesleri 60, 80 ve 100 °C'de kurutmuşlar ve sadece sıcaklık uygulamalarını kendi aralarında değerlendirmişlerdir. Araştırma sonucunda sıcaklık artmasıyla toplam fenolik miktarında artış tespit etmişlerdir. Bu araştırma sonuçları ile uyumlu olarak kurutma sıcaklıkları kendi aralarında değerlendirildiğinde sıcaklığa bağlı olarak toplam fenolik madde içeriğinin arttığı gözlenmiştir ve bu artış anlamlı bulunmuştur ( $p < 0.05$ ).

Yapılan araştırmalarda ısı uygulamalarının gıda matriksinde biyokimyasal değişiklikleri indüklediğini ve termal uygulama sırasında hücre yapısının bozulmasıyla fenolik bileşiklerin salınımının arttığı dolayısıyla ekstraksiyon çözeltisine geçişin kolaylaştığı belirtilmiştir (Chism and Haard 1996). Ayrıca düşük sıcaklıkta uzun süren kurutma işleminin peroksidaz ve polifenoloksidaz gibi oksidatif enzimlerin inaktif olmaması nedeniyle fenolik bileşiklerdeki kaybın oksidasyon sonucu olduğu belirtilmektedir (İzli *et al.* 2017).

Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş madımakların antioksidan aktiviteleri taze örnekte % 76.33 olarak bulunurken kurutulmuş madımak örneklerinin antioksidan aktiviteleri ise taze örneğe göre azalma göstererek 40, 50 ve 60 °C'de sırasıyla % 66.82, % 69.10 ve % 75.24 olarak tespit edilmiştir. Sıcaklığın antioksidan aktivite üzerine etkisi önemli bulunmuş olup (Çizelge 3 ve Çizelge 4) sıcaklığın antioksidan aktivite üzerine etkisi toplam fenolik madde üzerine etkisi ile aynı eğilim göstermiştir.

Taze örneklerle göre 40 ve 50 °C'de antioksidan aktivitedeki bu azalma önemli ( $p < 0.05$ ) iken 60 °C sıcaklık uygulamasında önemsiz bulunmuştur ( $p > 0.05$ ). Bu durumun örneklerin fenolik madde miktarı ile ilişkisi olduğu düşünülmektedir. Toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan aktivite arasında kuvvetli bir ilişki olduğu daha önce yapılan çalışmalarda da gösterilmiştir. (Velioglu *et al.* 1998, Kim and Chin 2016). Tan *et al.* (2013) 40, 50 ve 60 °C'de kuruttukları acı kabağın antioksidan aktivitesinde 50 °C'ye kadar azalış 60 °C'de ise benzer şekilde antioksidan aktivitenin tekrar arttığını tespit etmişlerdir. İzli *et al.* (2017), kivi meyvesini 60, 70 ve 80 °C'de kurutmuşlar ve örneklerin antioksidan aktivitesine bakmışlardır. Araştırmacılar benzer şekilde sıcaklık uygulamasının taze kiviye göre antioksidan aktivitesinde azalmaya neden olduğunu ancak sıcaklık derecesi arttıkça antioksidan aktivitenin arttığını belirtmişlerdir. Kim and Chin (2016) domates tozu elde etmek üzere domatesleri 60, 80 ve 100 °C'de kuruttukları ve sıcaklıkları kendi aralarında değerlendirdikleri araştırmalarında sıcaklık artmasıyla örneklerin antioksidan aktivitelerinde de artış tespit etmişlerdir. Araştırmacılar yüksek sıcaklık uygulamalarının Maillard reaksiyonuna neden olduğunu ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin antioksidan aktiviteyi artırdığını belirtmişlerdir.

### **3.2.2 Klorofil a, Klorofil b ve Toplam Klorofil Üzerine Etkisi**

Taze ve kurutulmuş madımakların klorofil miktarları Çizelge 5'te, Varyans analizi sonuçlarında Çizelge 3'te verilmiştir. Taze madımak örneğinin klorofil a, b ve toplam klorofil miktarı sırasıyla 6.42, 1.49 ve 7.91 mg

g<sup>-1</sup> KM olarak bulunmuştur. Yeşil renkli gıdalarda klorofil a ve b yaklaşık 3:1-4:1 oranında bulunmaktadır. Toplam klorofil miktarı çeşit, yetiştirme koşulları ve bitkinin olgunluğuna göre değişir. Ancak klorofil a/b oranı hemen hemen sabittir (Schwartz and Von Elbe 1983). Daha önce yapılan araştırmalarda klorofil a miktarının klorofil b'den fazla olduğu tespit edilmiştir (Shivanna and Subban 2014, Kumar *et al.* 2015). Çalışmada, bahsedilen araştırmalarla uyumlu olarak klorofil a, klorofil b'den daha fazla bulunmuştur. Taze madımak için klorofil a/b oranı ise 4.3 olarak tespit edilmiştir. Madımak bitkisinin klorofil miktarına ilişkin literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

**Çizelge 5.** Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş madımakların klorofil a, b ve toplam klorofil miktarları (mg g<sup>-1</sup> KM)

Sıcaklık (°C)	Klorofil a	Klorofil b	Toplam klorofil
Taze	6.42 ± 0.16 <sup>a</sup>	1.49 ± 0.23 <sup>a</sup>	7.91 ± 0.38 <sup>a</sup>
40	4.44 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.20 ± 0.08 <sup>ab</sup>	5.64 ± 0.03 <sup>b</sup>
50	4.33 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.96 ± 0.01 <sup>b</sup>	5.29 ± 0.01 <sup>bc</sup>
60	4.17 ± 0.07 <sup>c</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>b</sup>	5.09 ± 0.07 <sup>c</sup>

\*: Aynı sütunda farklı harfler istatistiksel olarak birbirinde farklıdır (p<0.05)

Çizelge 5 incelendiğinde farklı sıcaklıklarda kurutmanın klorofil üzerine etkisi önemli bulunmuştur. Taze madımakların klorofil içeriği kurutulmuş örneklerden yüksek bulunmuştur (p<0.05). Sıcaklık arttığında klorofil bileşikleri istatistiki olarak önemli düzeyde azalmıştır. Benzer olarak Shivanna and Subban *et al.* (2014), 60 °C'de kurutulmuş köri yapraklarında, Kumar *et al.* (2015) 65 °C'de kurutulmuş Hibiskus yapraklarında, Naidu *et al.* (2016) ise 50 °C'de kuruttukları dereotunda taze örneklerle göre klorofil miktarında azalma tespit etmişlerdir. Potisate ve Phoungchandang (2010), 50, 55 ve 60 °C'de kuruttukları sarmaşık kabak yapraklarında klorofil içeriklerine bakmışlardır. Araştırmacılar taze örneklerin klorofil miktarlarını sıcaklık uygulamalarından daha yüksek bulmuşlardır. Ayrıca çalışmada sıcaklığın artmasıyla klorofil miktarlarında azalma tespit etmişlerdir. Guan *et al.* (2005) 50, 60, 80 ve 100 °C'de kuruttukları yalancı iğde otu (*Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* Rousi) yapraklarında toplam klorofil miktarlarında sıcaklık artışına bağlı olarak azalma tespit etmişlerdir. Araştırmacılar toplam klorofil miktarındaki bu düşüşü klorofillerin sıcaklığa duyarlı olmasına ve dolayısıyla artan

sıcaklıklarda klorofilin degradasyona uğrayarak feofitinlerin oluşumuna bağlamışlardır. Ayrıca klorofil miktarındaki kayba ısı etkisiyle denatüre olan protein komplekslerinin de neden olduğu belirtilmektedir (Lisiewska *et al.* 2004, Ngamwonglumlert *et al.* 2017).

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada madımak bitkisi 40, 50 ve 60 °C'de 0,5 m/s hava hızında kurutulmuştur. Uygulanan farklı sıcaklıkların madımak bitkisinin kuruma kinetiği, toplam fenolik madde içeriği, antioksidan aktivite, klorofil miktarları üzerine etkileri incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda madımakların kuruma eğrilerini açıklamada en uygun model olarak Page model seçilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kurutulmuş madımakların toplam fenolik madde içeriği ve antioksidan kapasitesi sıcaklık uygulamalarında taze örneğe göre azalma göstermiştir. Taze madımakların klorofil a, b ve toplam klorofil içeriği kurutulmuş örneklerden daha yüksek bulunmuştur. Sıcaklık arttığında klorofil bileşikleri önemli düzeyde azalmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 60 °C'de kurutmada daha kısa sürede daha yüksek kuruma hızı tespit edilmiştir. Bu nedenle madımakların kurutulmasında 60 °C uygulaması önerilmektedir.

#### Bilgilendirme

Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Aral, S. and Beşe, A. V., 2016. Convective drying of hawthorn fruit (*Crataegus* spp.): effect of experimental parameters on drying kinetics, color, shrinkage, and rehydration capacity. *Food Chemistry*, **210**, 577-584.
- Baytop, T., 1999. Türkiye'de bitkiler ile tedavi: geçmişte ve bugün. Nobel Tıp Kitabevleri, 313.
- Chism, G.W. and Haard, N.F., 1996. Characteristics of edible plant tissues. In: Fennema O. R. (Ed.), *Food Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., 943-1011, New York.
- Çevik, Ö., Şener, A., Kumral, Z. Ö., Çetinel, Ş., Altıntaş, A., Oba, R., ... Yarat, A., 2014. Protective and therapeutic effects of polygonum cognatum meissn aqueous extract in experimental colitis. *Marmara Pharmaceutical Journal*, **18**(3), 126-134.

- Eruygur, N., Ucar, E., Ataş, M., Ergul, M., Ergul, M. and Sozmen, F., 2020. Determination of biological activity of *Tragopogon porrifolius* and *Polygonum cognatum* consumed intensively by people in Sivas. *Toxicology reports*, **7**, 59-66.
- Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R. and Ilyas, S.M., 2006. Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*, **95(1)**, 43-49.
- Guan, T.T., Cenkowski, S. and Hydamaka, A., 2005. Effect of drying on the nutraceutical quality of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis*) leaves. *Journal of Food Science*, **70(9)**, E514-E518.
- ISO 14502-1:2005. Determination of substances characteristic of green and black tea. Part 1: Content of total polyphenols in tea. Colorimetric method using Folin-Ciocalteu reagent.
- İzli, N., İzli, G. and Taskin, G., 2017. Drying kinetics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity properties of kiwi dried by different methods. *Food Measure*, **11**, 64-74.
- Karunasena, H.C.P., Hasemi, P., Senadeera, W., Gu, Y.T., Brown, R.J. and Oloyede, A., 2014. Scanning electron microscopic study of microstructure of gala apples during hot air drying. *Drying Technology*, **32**, 455-468.
- Kim, H.S. and Chin, K.B., 2016. Evaluation of different drying temperatures on physico-chemical and antioxidant properties of water-soluble tomato powders and on their use in pork patties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **96(3)**, 742-750.
- Kumar, S.S., Manoj, P., Shetty N. P. and Giridhar, P., (2015). Effect of different drying methods on chlorophyll, ascorbic acid and antioxidant compounds retention of leaves of *Hibiscus Sabdariffa* L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **95(9)**, 1812-1820.
- Lisiewska, Z., Kmiecik, W. and Słupski, J., 2004. Contents of chlorophylls and carotenoids in frozen dill: effect of usable part and pre-treatment on the content of chlorophylls and carotenoids in frozen dill (*Anethum graveolens* L.), depending on the time and temperature of storage. *Food Chemistry*, **84(4)**, 511-518.
- Naidu, M.M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R. and Hebbar, H.U., 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chemistry*, **192**, 849-856.
- Ngamwonglumlert, L., Devahastin, S. and Chiewchan, N., 2017. Natural colorants: pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **57(15)**, 3243-3259.
- Özkurt, M., 2008. *Polygonum Cognatum* Meisn. (Madımak) tohumlarının çimlenme biyolojisi ve klonları arasındaki genetik çeşitliliğin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 82 s.
- Pangavhane, D.R., Sawhney, R.L. and Sarsavadia, P.N., 1999. Effect of various dipping pretreatment on drying kinetics of thompson seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, **39(2)**, 211-216.
- Phoungchandang, S. and Saentaweek, S., 2011. Effect of two stage, tray and heat pump assisted-dehumidified drying on drying characteristics and qualities of dried ginger. *Food and Bioprocess Technology*, **89(4)**, 429-437.
- Polatçı, H. and Tarhan, S., 2009. Farklı kurutma yöntemlerinin reyhan (*Ocimum Basilicum*) bitkisinin kuruma süresine ve kalitesine etkisi. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, **1**, 61 s
- Potisate, Y. and Phoungchandang, S., 2010. Chlorophyll retention and drying characteristics of ivy gourd leaf (*Coccinia Grandis* Voigt) using tray and heat pump-assisted dehumidified air drying. *Drying Technology*, **28**, 786-797.
- Prabhanjan, D.G., Ramaswamy, H.S. and Raghavan, G.S.V., 1995. Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, **25**, 283-293.
- Ramesh, M.N., Wolf, W., Tevini, D. and Jung, G., 2001. Influence of processing parameters on the drying of spice paprika. *Journal of Food Engineering*, **49(1)**, 63-72.
- Rodríguez, K., Ah-Hen, K.S., Vega-Gálvez, A., Vásquez, V., Quispe-Fuentes, I., Rojas, P. and Lemus-Mondaca, R., 2016. Changes in bioactive components and antioxidant capacity of maqui, *Aristotelia chilensis* [Mol] Stuntz, berries during drying. *LWT-Food Science and Technology*, **65**, 537-542.
- Sarsavadia, P.N., Sawhney, R.L., Pangavhane, D.R. and Singh, S.P., 1999. Drying behaviour of brined onion slice. *Journal of Food Engineering*, **40**, 219-226.
- Sayili, M., Adiguzel, F. and Gozener, B., 2013. Investigation on madımak consumption status of consumers in central Tokat province. *Bulgarian journal of agricultural science*, **19(2)**, 303-313.



- Schwartz, S. J. and Von Elbe, J.H., 1983. Kinetics of chlorophyll degradation to pyropheophytin in vegetables. *Journal of Food Science*, **48(4)**, 1303-1306.
- Shivanna, V.B. and Subban, N., 2014. Effect of various drying methods on flavor characteristics and physicochemical properties of dried curry leaves (*Murraya koenigii* L. Spreng). *Drying Technology*, **32(8)**, 882-890.
- Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J. and Rosselló, C., 1996. Drying models for green peas. *Food Chemistry*, **55(2)**, 121-128.
- Sousa, A.D., Ribeiro, P.R.V., Canuto, K.M., Zocolo, G.J., Pereira, R.D.C.A., Fernandes, F.A.N. and Sousa de Brito, E., 2018. Drying kinetics and effect of air-drying temperature on chemical composition of phyllanthus amarus and phyllanthus niruri. *Drying Technology*, **36(5)**, 609-616.
- Soysal, Y., Öztekin, S. and Eren, O., 2006. Microwavedrying of parsley: modelling, kinetics and energy aspects. *Biosystems Engineering*, **93(4)**, 403-413.
- Sun, Y. and Li, W., 2017. Effects the mechanism of micro-vacuum storage on broccoli chlorophyll degradation and builds prediction model of chlorophyll content based on the color parameter changes. *Scientia Horticulturae*, **224**, 206-214.
- Szychowski, P.J., Lech, K., Sendra-Nadal, E., Hernández, F., Figiel, A., Wojdyło, A. and Carbonell-Barrachina, Á.A., 2018. Kinetics, biocompounds, antioxidant activity, and sensory attributes of quinces as affected by drying method. *Food Chemistry*, **255**, 157-164.
- Tan, E.S., Abdullah, A. and Maskat, M.Y., 2013. Effect of drying methods on total antioxidant capacity of bitter gourd (*Momordica charantia*) fruit. *AIP Conference Proceedings*, **1571(1)**, 710-716.
- Türkmen Erol N., Sari F., Çalikoğlu E. and Velioglu Y.S., 2009. Green and roasted mate: Phenolic profile and antioxidant activity. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, **33**, 353-362.
- Vega, A., Fito, P., Andrés, A. and Lemus, R., 2007. Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *Journal of Food Engineering*, **79(4)**, 1460-1466.
- Velioglu, Y.S., Mazza, G., Gao, L. and Oomah, B.D., 1998. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **46(10)**, 4113-4117.
- Walther, B. A. and Moore, J.L., 2005. The Concepts of Bias, Precision and Accuracy, and Their Use in Testing The Performance of Species Richness Estimators, With A Literature Review of Estimator Performance. *Ecography*, **28(6)**, 815-829.
- Wiriya, P., Paiboon, T. and Somchart, S., 2009. Effect of drying air temperature and chemical pretreatments on quality of dried chilli. *International Food Research Journal*, **16(3)**, 441-454.
- Xu, F., Jin, X., Zhang, L. and Chen, X.D., 2017. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods. *Food Research International*, **96**, 191-197.
- Yıldırım, A., Mavi, A., Kara, A.A., 2003. Antioxidant and antimicrobial activities of *Polygonum cognatum* Meisn extracts. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **83(1)**:64-69.

## Parselasyon Planına Göre İmar Parseli Üretimi İçin Yeni Bir Uygulama Stratejisi Geliştirme

Hakan AKÇIN<sup>1\*</sup>, Sercan AKSOY<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak .

<sup>2</sup>TKGM Erzurum Kadastro Müdürlüğü, Erzurum.

Sorumlu Yazar \*<sup>1</sup>e-posta: akcinh@beun.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8245-0018>

<sup>2</sup>e-posta: sercanaksoytkgm@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6963-769X>

Geliş Tarihi: 09.05.2022

Kabul Tarihi: 14.10.2022

### Öz

Arazi ve Arsa Düzenlemeleri (AAD), planlı şehircilik ilkeleri kapsamında uygulaması yerel yönetimlerce zorunlu olan uygulamalar kapsamındadır. Bu uygulamayla birçok parselin, parsel maliklerinden izin alınmaksızın İmar Kanununun 18. Maddesi ve uygulama yönetmeliği ile Planlı Alanlar Yönetmeliği hükümlerine ve uygulama imar planına göre parselasyonu yapılarak yapılaşmaya uygun hale getirilmektedir. Günümüz meri mevzuatı kapsamında parselasyon planına göre müstakil yapı yapılmasına müsait tapuya tescilli imar parseli üretimine ilişkin uygulamalar alan esaslı ve kısmen değer esaslı olarak yapılmakta olup her parselde eşit oranda değer artışı olduğu kabul edilmektedir. Ancak; bu durum her zaman her uygulamada sağlanamamaktadır ve bazı parsellerde diğer parsellere göre daha farklı değer artışları yaşandığı için hukuk dilinde haksız zenginleşmeye yol açmaktadır. İmar uygulamaları çalışmalarında alan esaslı çalışma yerine taşınmazın kadastro ve imar parsel değerlerine göre derece dönüşüm esaslı uygulama stratejisi geliştirilmiş, haksız zenginleşmeyi önleyebilecek daha adil bir model oluşturulmuştur. Çalışmada; Erzurum Büyükşehir Belediyesince kesinleştirilip tapu müdürlüğüne tescil edilen gerçek bir imar uygulaması incelenerek, her parselden eşit Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) kesintisi uygulamasına alternatif olacak şekilde, kadastro ve imar parsellerinin değerlerinin oranlanmasından derece dönüşüm modeli geliştirilmiş, imar parseli tahsisinde 1163 sayılı Kooperatifler Kanununun 23. Maddesine uygun olarak şerefiye esaslı tahsis modeli uygulanmış ve imar uygulaması nedeniyle oluşan değer artışı malikler arasında paylaştırılarak değer eşitliği sağlanmıştır.

### Anahtar kelimeler

İmar Uygulamaları;  
Taşınmaz Değerlemesi;  
Arazi ve Arsa  
Düzenlemesi (AAD);  
Parselasyon Planı;  
Derece Dönüşüm  
Modeli; Şerefiye Esaslı  
Tahsis Modeli.

## Developing A New Execution Strategy for the Production of Zoning Parcels According to the Parcel Plan

### Abstract

Land arrangements (LA) is within the scope of practices that are mandatory by local governments within the scope of planned urbanism principles. With this application; Cadastral parcels are made suitable for construction by subdividing them according to the zoning legislation and implementation zoning plan, without obtaining permission from the parcel owners. Within the scope of today's Turkish legislation; Applications for the production of zoning parcels, which are suitable for detached structures according to the parceling plan and registered with the title deed, are made on an area-based basis and it is accepted that there is an equal increase in value in each parcel. However; Equal increase in value cannot be achieved in every application and since some parcels experience different value increases compared to other parcels, it leads to unjust enrichment in the language of law. In the zoning implementation studies, an application strategy based on degree conversion has been developed according to the cadastral and zoning parcel values of the real estate instead of the area-based work. Thus, a fairer model has been created that can prevent unjust enrichment. In the study, a real zoning application, which was finalized by the Erzurum Metropolitan Municipality and registered by the land registry directorate, was examined. In practice; As an alternative to the application of equal Regulation Partnership Share (RPS) deduction from each parcel, a degree conversion model has been developed from the ratio of the values of the cadastral and zoning parcels. In this study, goodwill-based allocation model has been applied.

### Keywords

zoning  
implementation; Real  
Estate Valuation; Land  
Arrangement (LA);  
Parceling Plan; Degree  
Conversion Model;  
Goodwill-based  
Allocation Model.

## 1. Giriş

Parselasyon planına göre tapuda tescil görmüş imar parseli üretimi, diğer bir ifade ile AAD; planlı şehircilik ilkeleri kapsamında uygulaması zorunlu olan ve aynı uygulamayla birçok yapılı veya yapısız, kadastral veya imar parselinin, parsel maliklerinin rızasından bağımsız İmar Kanununun 18. Maddesi ve uygulama yönetmeliği hükümlerine ve uygulama imar planına göre, arazi vasfındaki kadastro parsellerinden DOP kesintisi yaparak artan alan miktarı kadar yapılaşmaya uygun yeni imar parseli üretimine olanak sağlayan yöntemdir.

AAD'nin başarısı; planlamaya ilişkin amaç ve hedeflerin belirlenmesinden planların uygulanmasına kadar olan tüm aşamaların birbiriyle ilişkisine, halkın süreç içerisinde bulunmasına, disiplinler arası ilişki düzeyine ve değerlendirme yöntemlerinin kullanılmasına bağlıdır. Ancak ülkemizde yapılan uygulamada, imar planı uygulaması ile planlama süreci kopuktur ve etkin bir kontrol mekanizması bulunmamaktadır. Farklılık gösteren kurumsal yapılar vardır ve plan yapma, onama, uygulama ve denetim süreçlerinde bütünsellik, uyum ve düzen bulunmamaktadır (Demirel 2019).

Kıta Avrupa'sında ve özelde Almanya Federal Cumhuriyeti İmar Kanuna göre uygulanan AAD, düzenleme nedeniyle oluşan değer artışının kamuya kazandırılması ilkesi üzerine kuruludur (Ziegenbein 2015). Bu ilke hem boyut hem de değer esaslı dağıtım yaklaşımlarında düzenleme nedeniyle oluşan değer artışının belirlenmesini gerektirir. AAD'ye ilişkin kurumsal yapı şeffaflığı ve katılımıcılığı desteklemektedir. Maliklerin AAD sürecine bilgi alma, danışmanlık ve iş birliği bağlamında katılımı teşvik edilir. Düzenlemenin başında maliklerle bireysel görüşmeler yapılır. Bu görüşmelerde maliklerin talepleri ile taleplerin gerçekleştirilme durumları üzerine tartışılır. AAD sonunda da taslak durumundaki parselasyon planı hakkında malikler ile bireysel görüşmeler yapılır. Malikler hukuki korumaya sahiptir, tüm idari kararlara karşı dava açma hakları vardır. Ancak kararların tam bir

uzlaşıyla alınması için çaba harcanır (Çağdaş ve Linke 2019).

Ülkemizdeki AAD uygulamalarında ise, yerleşme yerleri ile bu yerlerdeki yapılaşmaların; plan, fen, sağlık ve çevre şartlarına uygun teşekkülünü sağlamak amacıyla, düzenlemeye tabi tutulan yerlerin ihtiyacı olan yol, meydan, park, otopark, çocuk bahçesi/parkı ve yeşil alan, ibadet yeri, karakol ve Milli Eğitim Bakanlığına bağlı öğretime yönelik eğitim tesis alanları, kamuya ait kreş alanları, pazar yeri, semt spor alanı ve şehir içi toplu taşıma istasyonları ve durakları, Sağlık Bakanlığına bağlı sağlık tesis alanları, otoyol hariç erişme kontrolünün uygulandığı yol, su yolu, spor alanı, teknik altyapı alanı, kamuya ait trafo alanı, belediye hizmet alanı, sosyal ve kültürel tesis alanı, kent meydanı, kent parkı, özel tesis yapılmasına konu olmayan ağaçlandırılacak alan, rekreasyon alanı ve mesire alanları, resmî kurum alanı, idari tesis alanı, mezarlık alanı, bunun dışında kamusal ihtiyaçlara göre ortaya çıkacak imar planı kararıyla belirlenen diğer umumi ve kamu hizmet alanları ile taşkın kontrol gibi umumî hizmetlerle ilgili tesislere denk gelen alanlarda meri mevzuatlara göre taşınmazın değerindeki artışa karşılık %45 e kadar DOP kesilmek suretiyle uygulama gerçekleştirilmektedir (04.07.2019 tarih ve 7181 Sayılı Tapu Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun, 22.02.2020 tarihli Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik).

Uygulama sonucunda, uygulamaya giren tüm parsellerden aynı oranda kesinti yapılmakta olup, farklı konumlarda ve yapılaşma özelliklerinde imar parselleri üretilerek, bazı parsellerde diğer parsellere göre daha farklı değer artışları yaşanmaktadır (Yıldız 2008). İmar ve kadastro parsellerinin değerlerine bakılmaksızın arsa tahsislerinin yapılması, Anayasamızın 10. Maddesindeki eşitlik ilkesine de aykırıdır. Bu durumda vatandaşların kamuya güveninin azalması sonucu, kurumlar ya da vatandaşlarca uygulamalara idari yargıda davalar açılmaktadır. Davaların büyük çoğunluğu ise; teknik anlamda bir zorunluluk olmamasına rağmen, İmar Kanununa ve AAD ile ilgili Esaslar Hakkında Yönetmeliğin 17. Maddesine göre uygun olmayan kişiye özel değer artırıcı tahsisler

yapıldığı gerekçesiyle, uygulamaların iptali şeklinde karara bağlanmakta ve telafisi çok güç olan zararlar oluşmaktadır.

İmar uygulamaları çalışmalarında alan esaslı uygulamalar sonucu bu tür problemlerin yaşanmaması için, değer esaslı uygulama modeline geçmek; gerek uygulayıcı kurumların şeffaf, güvenilir ve daha hızlı hizmet vermesini sağlayacak, gerekse de idari ve adli yargının işini rahatlatarak ve haksız zenginleşmeyi önleyerek daha adil imar parseli dağıtımına olanak sağlayacaktır.

Bu çalışma ile; toplumsal adaleti gözeterek, haksız zenginleşmeye sebep olmayacak, arsa spekülasyonunun önlenmesini sağlayacak, değer esasına yönelik bir derece dönüşüm ve şerefiye esaslı imar parseli tahsisi için uygulama stratejisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ele alınan konu; Ülkemizdeki 1163 Sayılı Kanun çerçevesinde değerlendirilerek derece dönüşüm esaslı olarak değerlendirmeye tabi tutulmalıdır ve burada Belediyeler, Kooperatifler gibi değerlendirilmelidir.

## **2. Materyal ve Metot**

Değer esaslı imar uygulamasında işleyen bir mekanizmayı oluşturabilmek için öncelikle uygulamaya giren kadastral veya imar parsellerinin ve uygulama sonucu oluşan imar parsellerinin değerini yüksek doğrulukta belirleyebilmek gerekir.

04.07.2019 tarih ve 7181 sayılı Kanun ile getirilen düzenlemeyle 3194 sayılı İmar Kanuna göre yapılan AAD uygulamasında bedel tespitine yönelik 7181 sayılı Kanun ile "*Bedel takdir 2942 sayılı Kamulaştırma Kanununun 11. Maddesinde belirtilen bedel tespiti esasları da gözetilerek 06/12/2012 tarihli ve 6362 sayılı Sermaye Piyasası Kanununa göre lisans almış gayrimenkul değerlendirme uzmanları veya ilgili idare takdir komisyonlarınca raporlandırılarak tespit edilir*" hükmü getirilmiştir.

Kamulaştırma değerinin tespitinde, kamulaştırmayı gerektiren imar ve hizmet teşebbüsünün sebep olacağı değer artışları ile ilerisi için düşünülen kullanma şekillerine göre getireceği kâr dikkate alınmazken rayiç değer, "*taşınmazın en verimli ve en*

*iyi kullanımını*" esas almaktadır. Uygulamada bu iki ölçütün birbiriyle çelişmesi sebebiyle değer farklılığı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, kamulaştırma değeri, taşınmazların mevcut durum değerini ifade etmektedir. Ancak imar uygulamasında, özellikle de tahsis değerlerinin belirlenmesinde, imar planının getirdiği özellikler ve taşınmazın gelecekteki kullanım durumları önem kazanmaktadır. Kamulaştırma değerinde tüm bu unsurların ifade edilerek değerlendirilmesi hem mevcut tüze, hem de içtihat kararları açısından olanaklı olmadığı için imar uygulamasında kamulaştırma değerinin kullanılması sakıncalıdır (Yılmaz 2016).

Belirtilen bu sakıncadan dolayı; taşınmazın kadastral durumu ve dönüşüm sonrası imar parseli durumuna ilişkin rayiç değerlerin tespitinde karşılaştırma yönteminin kullanılmasının daha belirleyici olduğu yöntem olarak kabul edilmiştir. Yöntem, düzenleme bölgesinde ya da yakın çevresinde değerlendirme konusu taşınmazlarla ortak özelliklere sahip karşılaştırılabilir örneklerin emsal incelemesini gerektirmektedir.

Çalışmada; değerlendirme uzmanları tarafından değer tespitleri yapılan kısmi örneklemedeki taşınmazlar, uygulayıcı idareler tarafından yapılacak değerlendirme işlemlerinde karşılaştırma yönteminin gereksinim duyduğu emsal taşınmazlar olarak kullanılmıştır.

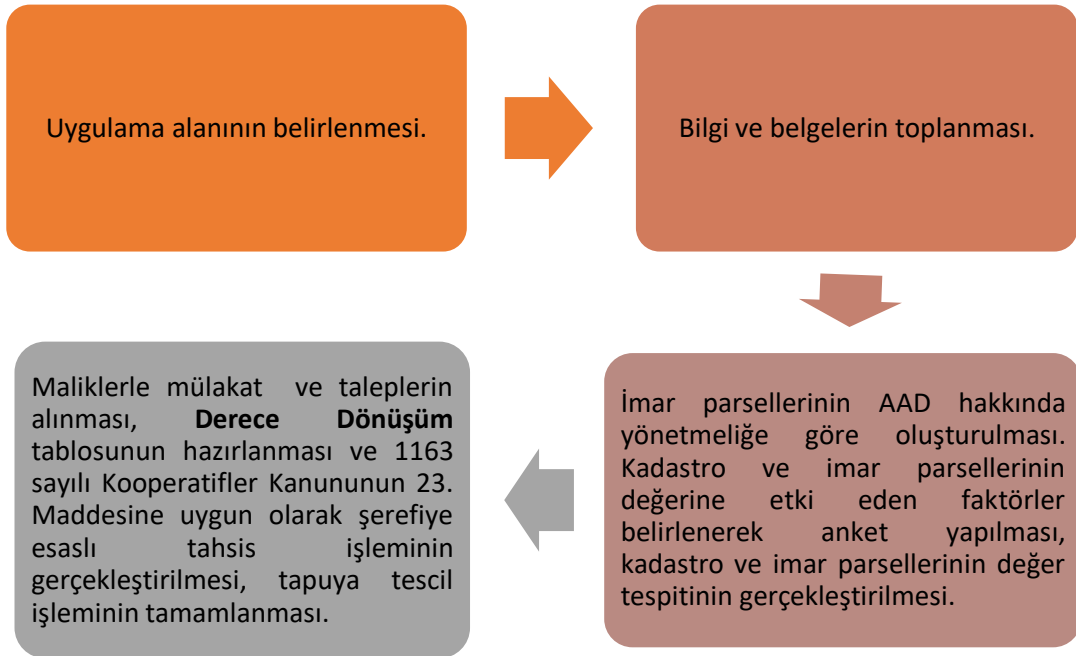
Ulusal literatürde verilen ve özellikle de T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) tarafından hazırlatılan değer esaslı imar uygulaması projesinde, çeşitli nedenler öne sürülerek imar uygulamasında nominal değer kullanılması önerilmiştir. Ancak yapılan araştırmalar, Nominal değer hesaplanmasında esas alınacak parametreler ile bu parametrelerin ağırlıklarının tüm ülke çapında yapılan imar uygulaması işlemlerinde doğru olarak belirlenmesinde yetersizler ve zorluklar yaratacağını göstermektedir. Yöntem, her ne kadar matematiksel bir yaklaşıma dayansa da, parametrelerin ve ağırlıklarının seçimi ya da ağırlıklandırılması öznel olduğundan farklı uzmanlarca yapılan değerlendirme işlemi sonucu bulunacak değerler de farklı olacaktır (Yıldız 2008, Gökçe ve Salalı 2014). Bu da değer malikler

tarafından sorgulanmasına sebep olacak ve buna ek olarak, uygulamaların bu farklılık sebebiyle dava konusu olması durumunda, mahkemelerce yeniden yapılacak değerlendirme işlemlerinde tespit edilen değer uygulamada kullanılan değerden farklı olmasına yol açacaktır. Ele alınan yaklaşım, uygulamaların iptaline sebep olacaktır (Yılmaz 2016).

Bu çalışmada; Uygulama alanı olan *Erzurum İli, Aziziye İlçesi, Gezköy Mahallesi* AAD uygulaması işlemi incelenmiş, uygulama öncesi değerleri ve uygulama sonrası oluşan parsel değerleri yöreye uygun faktörler ve faktör ağırlıkları kullanılarak, emsal kıyaslamayla yöntemiyle değer artışları tespit edilmiş ve mevcut tüzeğe alternatif şerefiye esaslı dağıtım modeli geliştirilmiştir. Uygulama aşamaları

Şekil 1’de, uygulamaya giren kadastro ve imar parselleri Şekil 2’de verilmiştir.

Üretilen imar parsellerindeki değer artışı ya da azalışı tespit edildikten sonra derece dönüşüm tablosu oluşturularak tahsis edilecek parseldeki şerefiye ücreti tespit edilerek, değeri yükselen parselden alınan şerefiye, değeri düşen parsele verilerek ve parsel maliklerinin uygulamaya olan ilgisi artırılarak, itirazların en aza indirilmesi sağlanmış olacaktır. Artan bedellerle de, değer artışını uygulayıcı idareye veya kamuya aktarılıp, uygulanan alanda yerel altyapı hizmet alanlarının inşa, yerel nitelikteki donatı alanlarının edinimi ve yerel nitelikteki donatı alanlarının inşa maliyetlerini karşılanması sağlanmalıdır.



Şekil 1. Uygulama adımlarını gösteren iş akış diyagramı.



Şekil 2. Uygulama bölgesinde, düzenleme sahası içindeki kadastro ve dağıtıma esas imar parselleri, uygulamanın ortofoto görünümüleri.

Şerefiye; bir bağımsız bölümün değerinin manzarası, imar durumu, cephesi, yönü, ulaşım durumu, kat durumu, gün ışığını ne kadar süre ile aldığı gibi özellikleri göz önüne alınarak ve tüm özelliklerinin değeri ayrı ayrı belirlenerek arsa paylarına veya bağımsız bölümlere eklenen bedeldir.

1163 sayılı Kooperatifler Kanununun 23. Maddesinde, "ortakların hak ve vecibelerinde eşit olduğu" hükmü bulunmaktadır. Buna göre şerefiye bedelleri; ortaklar arasında eşitliğin sağlanması amacıyla ortaklara tahsis edilecek taşınmaz yönünden önceden yapılmış değerlendirme sonucunda, bir kısım ortakların ödedikleri, bir kısmının da aldıkları bedellerdir. Burada parselasyon planı yapılan düzenleme bölgesi içerisindeki kadastro parselleri ortaklardır. Bu sebeple, belirlenen şerefiye bedelinin mutlaka şerefiye alacaklısı ortağa verilmesi gerekmektedir.

### 3. Bulgular

Uygulamada, AAD hakkında yönetmelik hükümlerine göre yapılan DOP hesaplamalarında Çizelge 1'de verilmiş olan değerler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda DOP %39,90972 olarak bulunmuştur.

Çizelge 1. Uygulamada DOP hesaplaması.

DÜZENLEME ORTAKLIK PAYI HESAP CETVELİ	
Toplam Tahsis	= 26141,08
Toplam İmar Ada Alanı	= 26141,08
ToplamOrtak Katılım Alanı	= 0,00
Toplam Düzenlemeye Giren (Dopal)	= 43503,01
Toplam Düzenlemeye Giren (Dopalma)	= 0,00
Toplam Kamulaştırılan Alan	= 0,00
Toplam Bağışlanan Alan	= 2746,41
Toplam Kadastro Parsel Alanı	= 37781,13
Toplam Pay	= 37781,13
Ortak Katılım Oranı	= 0,000000
Kamuya Ayrılan Alan: 43503,01-26141,08	= 17361,93
<b>DOP : 17341 / 43503,01</b>	<b>=0,3990972</b>



Parsellerin değerine etki eden faktörler ve ağırlıkları yöreden yöreye değişiklik göstermektedir. Esasında bu faktörleri belli bir kalıba sığdırmakta olası değildir. Öyle ki; bugün taşınmazın değerine etki eden faktörler kısıtlı olup yöredeki taşınmaz fiyatları yatay seyirdeyken, ülke ekonomik dinamiklerin değişmesi gibi (faiz oranının düşürülmesi vb.) nedenlerle, bir anda fiyatların

yükselmesi gibi genel faktörlere bağlı olmayan değişimler mevcut olmaktadır. Çizelge 2 ve 5'deki çalışma alanına ilişkin faktörler ve ağırlıkları, 16 adet yöre emlakçısı ve yöreye hizmet eden 6 değerlendirme uzmanıyla görüşmeler ve anketler sonucunda belirlenmiştir. Toplam dört sayfa olarak uygulanan anket formlarından bir görünüm Şekil 3'te verilmiştir.

İmar Uygulamaları kapsamında Erzurum İli, Aziziye İlçesi, Gezköy Mahallesi, Dadaşkent Semti için Kadastro ve İmar parsellerinin değerine etki eden faktör ağırlıklarının belirlenmesi anketidir. Siz değerli katılımcılardan aşağıda sorulan sorulara 0 ile 100 puan arasında puanlar vermenizi istemekteyim. Değere etki eden faktörler 0 dan 100 puana doğru sıralanmıştır. Yüksek puan faktörün değere daha çok etki etmekte olduğunu, az puan ise faktörün değere daha az etki ettiğini ifade etmektedir. Değere olumsuz etki eden faktörler için lütfen eksi (-) simgesi kullanıp puan yazınız. Çalışmama destek olduğunuz için teşekkür ederim.

Eğitim Durumunuz:  
Görev Unvanınız:  
Değerleme Uzmanlığında veya ilgili işinizde Çalıştığınız Yıl:

**KADASTRO PARSELLERİNİN DEĞERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER**

KONUM (EN YAKIN MERKEZE UZAKLIK)	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PARSEL ŞEKLİ	0-35 Az		
Etkisi Yok	<input type="text"/>		
PARSEL ALANI	0-35 Az		
Etkisi Yok	<input type="text"/>		
TOPLAM İNŞAAT ALANI	0-35 Az		
Etkisi Yok	<input type="text"/>		
TOPOGRAFYA	0-35 Az		
Etkisi Yok	<input type="text"/>		
BAKİ(GÜNEŞE GÖRE YÖNÜ)	0-35 Az		
Etkisi Yok	<input type="text"/>		

**İMAR PARSELLERİNİN DEĞERİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER**

KONUM (EN YAKIN MERKEZE UZAKLIK)	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PARSEL ŞEKLİ	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
PARSEL KULLANIM ALANI	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Toplam İnşaat Alanı	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
TOPOGRAFYA	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
BAKİ(GÜNEŞE GÖRE YÖNÜ)	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
İRTIFAK HAKKI	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
YOLA CEPHE	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
GÜRÜLTÜ	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
ALTYAPI HİZMETLERİ	0-35 Az	35-70 Normal	70-100 Fazla
Etkisi Yok	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Şekil 3. Çalışma kapsamında kullanılan anket formlarından görünüm.

Çalışma alanı Erzurum İli, Aziziye İlçesi, Gezköy Mahallesi, Dadaşkent semtinde bulunmaktadır. Bu alan alt-orta gelir düzeyine sahip vatandaşlarımıza

hitap etmekte olup, yumuşak zemin yapısından dolayı depreme önlem olabilmesi için en fazla 5 kata kadar yapı izni verilmektedir. Semtin son

yıllarda halkın kalabalıktan uzak sakin bir yaşam için tercih ettiği yerlerden sayılmaktadır. Dubleks ya da triblex olarak isimlendirilen konutlarda oturulmaktadır. Bölge küçük sayılabilecek bir yerleşim yeri olup, arsa değerleri sokaktan sokağa sert iniş çıkışlar yapmamaktadır. Fiyat değişimleri daha çok parselin imar planında ki fonksiyonuna, ana yola yakınlığına, ticari hacmine, vb. değişkenlere göre belirlenmektedir.

Kadastro parselleri için alınan emsal parselinin toplam satış bedeli 120.000,00TL olup, m<sup>2</sup> birim bedeli 442,00TL/m<sup>2</sup> dir. Konumsal ve hukuksal özellikleri uygulamaya giren kadastral parsellerle benzerdir. Piyasa rayiç bedellerinin tespiti için uygun bir emsaldir. Çizelge 3’de emsal alınan kadastro parselin faktör ağırlıklarıyla hesaplanmış toplam puanları verilmiştir.

Çizelge 4’de ise, AAD’ye konu olan parsellerin metrekare birim bedelleri tespit edilmiştir. En yüksek bedel 346,73TL/m<sup>2</sup> olup en düşük bedel 223,11TL/m<sup>2</sup> dir. Bulunan parsel değerleri konumsallık açısından beklenen sonuçlardır.

Kadastro parsellerinden sonra aynı yöntem uygulamayla oluşmuş imar parselleri için uygulanmıştır. İmar parselleri; imar planının getirmiş olduğu değer artırıcı ya da azaltıcı unsurları da barındırdığından dolayı, konumsallığın yanında hukuksal faktörlerde değere oldukça etki etmektedir. Çizelge 5’de; çalışma kapsamında tasarlanarak belirlenen imar parsellerinin değerine etki eden ve anket çalışması ile belirlenen ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 6’da imar parselleri için ele alınan iki emsal imar parselinin belirlenen puanları ve ağırlıklı puanları gösterilmiştir. Puanlama sonucuna göre; emsal A’nın m<sup>2</sup> birim bedeli 695.00TL, emsal B’nin m<sup>2</sup> birim bedeli 1.403.00TL ve emsal A arsa puanı 601, emsal B arsa puanı 885.2 bulunmuştur. Emsal A m<sup>2</sup> birim bedeli ile Emsal B m<sup>2</sup> birim bedeli toplamı 2.098,00TL, emsallerin puan toplamı 1486.2, İmar parselleri için emsal parsellerden yola çıkarak birim puan değeri (2.098,00TL / 1486.2) 1.41 bulunmuştur.

**Çizelge 2.** Kadastro parsellerinin değerine etki eden faktörler ve ağırlıkları.

DEĞERE ETKİ EDEN FAKTÖRLER (Kadastro Parselleri için)	DEĞERE ETKİ AĞIRLIKLARI			
	Yüksek (0.70-1.00)	Normal (0.35-0.70)	Az (0.00-0.35)	Yok
KONUM (MERKEZE UZ.)		0.60		
PARSEL ŞEKLİ		0.60		
PARSEL KULLANIM ALANI	0.80			
TOPLAM İNŞAAT ALANI				0
TOPOĞRAFYA	0.80			
BAKİ (GÜNEŞE GÖRE)		-0.60		
İRTİFAK HAKKI		0.40		
ANA YOLA UZ.	0.80			
GÜRÜLTÜ			-0.20	
ALTYAPI HİZMETLERİ			0.30	
TOPLU ULAŞIMA UZ.			0.30	
SOSYO-KÜLTÜREL YAPI			0.30	
SAĞLIK TESİSLERİNE UZ.			0.30	
EĞİTİM TESİSLERİNE UZ.			0.30	
İMAR PLANI FONKSİYONU				0
KAMU HİZMET BİNA. UZ.			0.30	
MANZARA		0.70		
ALIŞVERİŞ MERKEZLERİNE UZ.	0.90			
GÜVENLİK KUVVETLERİNE UZ.			0.30	
SOSYAL DONATILARA UZ.			0.30	

Çizelge 7’de ise ADD sonucu üretilen imar parsellerinin birim puana göre tespit edilen m<sup>2</sup> birim bedelleri verilmiştir. Elde edilen bedel tespitleri ayrıca, hem kadastro parselleri için hem de imar parselleri için yöre emlakçılarıyla görüşülerek, doğruluğu teyit edilmiştir. Uygulamaya konu olan parsellerin m<sup>2</sup> birim bedellerinde en az %242.13 en fazla ise %457.22 oranında değer artışının gerçekleştiği saptanmıştır. Kadastro parselleri için değere etki eden faktörler ağırlıklı olarak konumsalken, imar parsellerinin değerine etki faktörler ise ağırlıkla parsellerin imar planında ki fonksiyonu, şekli, yapılabilecek inşaatın toplam alanı, anayola mesafesi gibi etkenler olduğu görülmüştür.



**Çizelge 3.** Emsal kadastro parselinin faktör ağırlıklarıyla hesaplanmış toplam puanı.

Kadastral Emsal Parsel A	Parsellerin Puanları	Ağırlık	Puan * Ağırlık
Konum(EYMU)	70	0.60	42
Ana Yola Uz.	40	0.80	32
Toplu Taşımaya Uz.	40	0.30	12
Eğitim Tesislerine Uz.	57	0.30	17.1
Güvenlik Kuvvetlerine Uz.	80	0.30	24
Spor Tesislerine Uz.	40	0.30	12
Sağlık Tesislerine Uz.	30	0.30	9
Kamu Hizmet Bina. Uz.	30	0.30	9
Alışveriş Merkezle. Uz.	70	0.90	63
<b>TOPLAM PUAN</b>			<b>220.1</b>

**Çizelge 4.** AAD'ye konu kadastro parsellerinin emsalle hesaplanan m<sup>2</sup> birim bedelleri.

Kadastral Parseller	Toplam Puan	m <sup>2</sup> Birim Bedeli (KB)
1821/1	172.5	346.73 TL/m <sup>2</sup>
1821/2	172.5	346.73 TL/m <sup>2</sup>
1821/3	139.5	280.40 TL/m <sup>2</sup>
2101	111	223.11 TL/m <sup>2</sup>
2105	111	223.11 TL/m <sup>2</sup>
2116	111	223.11 TL/m <sup>2</sup>
2122	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2123	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2124	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2128	111	223.11 TL/m <sup>2</sup>
2133	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2133	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2134	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2138	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2139	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2140	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2141	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2144	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2145	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2146	122	245.22 TL/m <sup>2</sup>
2151	139.6	280.60 TL/m <sup>2</sup>
2153	142.6	286.63 TL/m <sup>2</sup>
2165	139.6	280.60 TL/m <sup>2</sup>

**Çizelge 5.** İmar parsellerinin değerine etki eden faktörler ve ağırlıkları.

DEĞERE ETKİ EDEN FAKTÖRLER (İmar Parselleri için)	DEĞERE ETKİ AĞIRLIKLARI			
	Yüksek (0.70-1.00)	Normal (0.35-0.70)	Az (0.00-0.35)	Yok
KONUM (MERKEZE UZ.)		0.60		
PARSEL ŞEKLİ	0.90			
PARSEL KULLANIM ALANI	0.90			
TOPLAM İNŞAAT ALANI	0.90			
TOPOĞRAFYA		0.60		
BAKİ (GÜNEŞE GÖRE)	0.80			
İRTİFAK HAKKI			-0.60	
ANA YOLA UZ.	0.80			
GÜRÜLTÜ				-0.20
ALTYAPI HİZMETLERİ		0.70		
TOPLU ULAŞ. UZ.		0.50		
SOSYO-KÜLTÜREL YAPI	0.90			
SAĞLIK TESİSLERİNE UZ.		0.70		
EĞİTİM TESİSLERİNE UZ.		0.70		
İMAR PLANI FONKS.	0.90			
KAMU BİNALARIN UZ.		0.70		
MANZARA		0.70		
ALIŞVERİŞ MERKEZLERİNE UZ.	0.90			
GÜVENLİK KUVV. UZ.		0.70		
SOSYAL DONAT. UZ.		0.70		

Derece dönüşüm esaslı dağıtım aşamasında, yukarıda çizelge 4 ve 7'de belirlenen kadastro ve imar parsel değerleri esas alınarak öncelikle kadastro ve imar parsel dereceleri belirlenmiştir. Aşağıda Çizelge 8 ve 9' da belirlenen değerlere göre derecelendirmeler hem kadastro parselleri hem de imar parselleri için verilmiştir. Çizelge 10' da ise imar parsel değerleri ve derecelerine göre oluşturulmuş derece dönüşüm tablosu gösterilmiştir.

Bir parselasyon planındaki parsellerin bedeli; manzarası, imar durumu, cephesi, yönü, ulaşım durumu, kat durumu, gün ışığını ne kadar süre ile aldığı gibi özellikleri vb. unsurlara bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Bu değişkenlik şerefiye olarak tanımlanabilir. Şerefiye arsa paylarına veya bağımsız bölümlere eklenen bedeldir. Şerefiye hesabı kooperatiflerde adaleti sağlamak için vazgeçilmez yöntemdir. İmar

uygulaması için şerefiye hesabı düşünüldüğünde, uygulama alanında ki kadastral parsellerinin oluşan imar parsellerine, DOP kesildikten sonra her bir parselde oluşan değer artış oranı belirlenebilmektedir. Her bir kadastral parsel malikinin ödemesi gereken ya da alması gereken bedel derece dönüşüm tablosu kullanılarak hesaplanabilmektedir. Böylece imar parseline tahsiste malikin ödemesi gereken ya da alması gereken bedel bulunur. Çizelge 11’de parsellerin derece dönüşümü ile bulunan şerefiye değerleri eksi ve artı olarak gösterilmiştir. Çizelge 12’de ise parsel bazında değer artış oranı hesapları verilmiştir.

**Çizelge 6.** İmar parsel değerinde kullanılan emsallerin puanları ve ağırlıklı puanları.

Emsal İmar Parselleri	Parsellerin Puanları		Ağırlık	Puan*Ağırlık	
	A	B		A	B
	Konum (M.U.)	10		20	0.60
Parsel Şekli	100	100	0.90	90	90
Parsel Kullanım Alanı	60	90	0.90	54	81
Toplam İnşaat Alanı	20	40	0.90	18	36
Topoğrafya	80	80	0.60	48	48
Bakı(Güneşe Göre)	50	100	0.80	40	80
İrtifak Hakkı	0	0	-0.80	0	0
Ana Yola Uz.	50	100	0.90	45	90
Gürültü	10	50	-0.20	-2	-10
Altyapı Hizmetleri	100	100	0.70	70	70
Toplu Ulaşım Uz.	50	100	0.40	20	40
Sosyo-Kültürel Yapı	100	100	0.90	90	90
Sağlık Tesislerine Uz.	10	20	0.60	6	12
Eğitim Tesislerine Uz.	30	47	0.60	18	28.2
İmar Planı Fonksiyonu	50	100	0.90	45	90
Kamu Hizmet Bina.Uz.	10	20	0.60	6	12
Manzara	20	70	0.90	18	63
Alışveriş Merkezle. Uz.	10	30	0.90	9	27
Güvenlik Kuvv. Uz.	10	20	0.60	6	12
Sosyal Donatılara Uz.	20	20	0.70	14	14
<b>Toplam Puan</b>				<b>601</b>	<b>885.2</b>

**Çizelge 7.** İmar parsellerinin emsallerin birim puanına göre belirlenmiş m<sup>2</sup> birim bedelleri.

İmar Parselleri	Toplam Puan	Birim Puan	m <sup>2</sup> Birim Bedeli (İB)
12447/1	882.5	1.41	1.244,32TL/m <sup>2</sup>
12447/2	856.5	1.41	1.207,66 TL/m <sup>2</sup>
12447/3	712.5	1.41	1.004,62 TL/m <sup>2</sup>
12447/4	695.5	1.41	980,65 TL/m <sup>2</sup>
12447/5	724.5	1.41	1.021,54 TL/m <sup>2</sup>

Örneğin DOP kesintilerinden sonra 1. Derece kadastro parseline imar adasından 4. Derece bir imar parseli verilecek ise katsayı 1244,32 / 1004,62= 1,2386 dır. Değer esaslı olarak tahsis edilecek alan miktarı 1,2386 kat fazla olmalıdır ya da 1,2386 kat alan ile normal tahsis edilecek alan miktarı arasındaki alan farkı bedele dönüştürülerek hak sahibine verilmelidir. Diğer bir durumda ise 3. Derece bir kadastro parseline 1. Derece bir imar parseli verilecek ise katsayı 1021,54 / 1244,32=0,8210 dur. Bu katsayı kadar daha az alan miktarı tahsis edilmeli ya da tahsis edilen alan ile bu katsayı kadar alan miktarı arasındaki fark bedele dönüştürülerek hak sahibinden alınmalıdır. Örneğin; 1000m<sup>2</sup> yer DOP sonrası tahsis edilmişse 1000 x 0,8210 = 821m<sup>2</sup> yer tahsis edilmeli ya da 1000 – 821 = 179m<sup>2</sup> ve karşılığı 179m<sup>2</sup> x 1.244,32TL = 222.733,28TL fark ücreti hak sahibinden alınmalıdır. Benzer şekilde 1. Derece bir kadastro parseline DOP kesintisi sonrası 1000m<sup>2</sup> 4. Derece imar parseli tahsis edilecek ise katsayı 1,2386 üzerinden (1000 x 1,2386 =) 1238,60m<sup>2</sup> alan tahsis edilmeli ya da (1238,6 – 1000 =) 238,60m<sup>2</sup> karşılığı (238,6m<sup>2</sup> x 1004,62TL =) 239.702,33TL hak sahibine verilmelidir.

**Çizelge 8.** Belirlenen kadastro parsel değerleri ve dereceleri.

Kadastro Parsel Değeri	Parsel Derecesi
346,73	1
286,63	2
280,60	3
245,22	4
223,11	5

**Çizelge 9.** Belirlenen imar parsel değerleri ve dereceleri.

İmar Parsel Değeri	Parsel Derecesi
1244,32	1
1207,66	2
1021,54	3
1004,62	4
980,65	5

**Çizelge 10.** İmar parsellerinin değerleri ve derecesine göre dönüşüm tablosu (dönüşümler soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğrudur).

Parsel derecesi	1	2	3	4	5
1	<b>1,00</b>	1,0304	1,2181	1,2386	1,2689
2	0,9705	<b>1,00</b>	1,1822	1,2021	1,2315
3	0,8210	0,8459	<b>1,00</b>	1,0169	1,0417
4	0,8074	0,8319	0,9834	<b>1,00</b>	1,0244
5	0,7881	0,8120	0,9600	0,9761	<b>1,00</b>

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmayla elde edilen bulgular aşağıda tartışılarak sonuçlar geliştirilmiştir:

- Ülkemizdeki 18. Madde uygulamalarında alan esaslı yöntemi kullanılmakta olup, düzenlemeye giren tüm arazi ve arsaların m<sup>2</sup> fiyatlarının aynı değerde olduğu ve uygulamadan sonra tüm parsellerde m<sup>2</sup> bazında aynı oranda değer artışı olduğu kabul edilmektedir. Halbuki bu uygulama ile kadastro parsellerinde farklı yüzdesel değer artışı olduğu ve bu artışlarında Çizelge 12'den % 235 ile % 106 aralığında olduğu, yine aynı Çizelgeden; parasal olarak en düşük 47.513,61TL ve en yüksek 184.272,30TL değer artışı olduğu saptanmıştır.
- Halen mevzuat gereği imar ve kadastro parsellerinin değerlerine bakılmaksızın arsa tahsislerinin yapılması birçok haksız uygulamaya yol açmaktadır. İmar uygulamalarında, uygulama nedeniyle değer artışı, parsellerin imar planındaki denk geldiği plan fonksiyonundan kaynaklanmaktadır. Plan fonksiyonları nedeniyle parsellerin birbirinde farklı oranda değerlendirilmesi tam manasıyla ele alınan konunun başlıca sorunu haline gelmektedir. Sorunun çözümü için 1163 Sayılı Kooperatifler Kanunu çerçevesinde durum değerlendirilerek, Parselasyon Planı, derece dönüşüm esaslı olarak şerefiye bedelleri üzerinden değerlendirmeye tabi tutulmalıdır ve burada Belediyeler Kooperatifler gibi değerlendirilmelidir.

**Çizelge 11.** AAD Uygulama bölgesinde parselasyon planına göre derecelendirme ve kadastro parselleri için şerefiye bedellerinin hesabı (eksi değerler şerefiye verecekler, artı değerler alacakları ifade etmektedir).

Kadaastro Parseli	Kadastro Parseli		İmar Parseli	DOP	Şerefiye Bedeli (TL)
	TL/m <sup>2</sup> Birim Bedeli ve Derecesi (KPBB)	Tahsis Edilen İmar Parseli	TL/m <sup>2</sup> Birim Bedeli ve Derecesi (İPBB)	sonrası alan (m <sup>2</sup> ) (F)	
<b>1821/1</b>	346.73 (1)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	276.15	Yok
<b>1821/2</b>	346.73 (1)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	178.36	Yok
<b>1821/3</b>	280.40 (3)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	180.63	- 40232,31
<b>2101</b>	223.11 (5)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	101.55	- 26,775.83
<b>2105</b>	223.11 (5)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	101.55	- 26,775.83
<b>2116</b>	223.11 (5)	<b>12447/5</b>	1.021,54 (3)	94.34	- 3,854.88
<b>2122</b>	286.63 (2)	<b>12447/5</b>	1.021,54 (3)	93.74	+ 17,447.32
<b>2123</b>	286.63 (2)	<b>12447/5</b>	1.021,54 (3)	93.74	+ 17,447.32
<b>2124</b>	286.63 (2)	<b>12447/4</b>	980,65 (5)	94.34	+ 21,417.11
<b>2128</b>	223.11 (5)	<b>12447/5</b>	1.021,54 (3)	94.34	- 3,854.88
<b>2133</b>	245.22 (4)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	101.55	- 24,337.07
<b>2134</b>	245.22 (4)	<b>12447/2</b>	1.207,66 (2)	93.74	- 19,029.94
<b>2138</b>	245.22 (4)	<b>12447/3</b>	1.004,62 (4)	93.74	Yok
<b>2139</b>	286.63 (2)	<b>12447/3</b>	1.004,62 (4)	93.74	+ 19,032.38
<b>2140</b>	286.63 (2)	<b>12447/3</b>	1.004,62 (4)	94.34	+ 18,951.17
<b>2141</b>	286.63 (2)	<b>12447/3</b>	1.004,62 (4)	93.74	+ 19,032.38
<b>2144</b>	286.63 (2)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	94.34	- 2,934.73
<b>2145</b>	245.22 (4)	<b>12447/2</b>	1.207,66 (2)	93.74	- 19,029.94
<b>2146</b>	245.22 (4)	<b>12447/2</b>	1.207,66 (2)	93.74	- 19,029.94
<b>2151</b>	245.22 (4)	<b>12447/2</b>	1.207,66 (2)	93.74	- 19,029.94
<b>2153</b>	280.60 (3)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	93.74	- 20,879.02
<b>2165</b>	286.63 (2)	<b>12447/1</b>	1.244,32 (1)	67.90	- 2,492.44

**Çizelge 12.** Parsellerde değer artış miktarları ve oranları.

Kadastro Parseli	Kadastro Parseli		Toplam KPBB KPBB x F	Tahsis Edilen İmar Parseli	İmar Parseli m <sup>2</sup> Birim Bedeli (İPBB)	DOP sonrası alan (F)	Toplam İPBB İPBB x F	KP'deki Değer Artış Miktarı	KP'deki Değer Artış Yüzdesi (TİPBB/TKPBB-1)
	KP m <sup>2</sup> Birim Bedeli (KPBB)	Alanı (F)							
1821/1	346.73 TL/m <sup>2</sup>	459.57m <sup>2</sup>	159.346,70TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	276.15m <sup>2</sup>	343.619,00TL	<b>184.272,30TL</b>	% 116
1821/2	346.73 TL/m <sup>2</sup>	296.83m <sup>2</sup>	102.919,90TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	178.36m <sup>2</sup>	221.936,90TL	<b>119.017,00TL</b>	% 116
1821/3	280.40 TL/m <sup>2</sup>	300.61m <sup>2</sup>	84.291,04 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	180.63m <sup>2</sup>	224.761,50TL	<b>140.470,46TL</b>	% 167
2101	223.11 TL/m <sup>2</sup>	169.00m <sup>2</sup>	37.705,59 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	101.55m <sup>2</sup>	126.360,70TL	<b>88.655,11TL</b>	% 235
2105	223.11 TL/m <sup>2</sup>	169.00m <sup>2</sup>	37.705,59 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	101.55m <sup>2</sup>	126.360,70TL	<b>88.655,11TL</b>	% 235
2116	223.11 TL/m <sup>2</sup>	157.00m <sup>2</sup>	35.028,27 TL	12447/5	1.021,54 TL/m <sup>2</sup>	94.34m <sup>2</sup>	96.372,08 TL	<b>61.343,81TL</b>	% 175
2122	286.63 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	44.714,28 TL	12447/5	1.021,54 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	95.759,16 TL	<b>51.044,88TL</b>	% 114
2123	286.63 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	44.714,28 TL	12447/5	1.021,54 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	95.759,16 TL	<b>51.044,88TL</b>	% 114
2124	286.63 TL/m <sup>2</sup>	157.00m <sup>2</sup>	45.000,91 TL	12447/4	980,65 TL/m <sup>2</sup>	94.34m <sup>2</sup>	92.514,52 TL	<b>47.513,61TL</b>	% 106
2128	223.11 TL/m <sup>2</sup>	157.00m <sup>2</sup>	35.028,27 TL	12447/5	1.021,54 TL/m <sup>2</sup>	94.34m <sup>2</sup>	96.372,08 TL	<b>61.343,81TL</b>	% 175
2133	245.22 TL/m <sup>2</sup>	169.00m <sup>2</sup>	41.442,18 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	101.55m <sup>2</sup>	126.360,70TL	<b>84.918,52TL</b>	% 205
2134	245.22 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	38.254,32 TL	12447/2	1.207,66 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	113.206,00TL	<b>74.951,68TL</b>	% 196
2138	245.22 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	38.254,32 TL	12447/3	1.004,62 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	94.173,08 TL	<b>55.918,76TL</b>	% 111
2139	286.63 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	44.714,28 TL	12447/3	1.004,62 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	94.173,08 TL	<b>49.458,80TL</b>	% 111
2140	286.63 TL/m <sup>2</sup>	157.00m <sup>2</sup>	45.000,91 TL	12447/3	1.004,62 TL/m <sup>2</sup>	94.34m <sup>2</sup>	94.775,85 TL	<b>49.774,94TL</b>	% 109
2141	286.63 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	44.714,28 TL	12447/3	1.004,62 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	94.173,08 TL	<b>49.458,80TL</b>	% 111
2144	286.63 TL/m <sup>2</sup>	157.00m <sup>2</sup>	45.000,91 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	94.34m <sup>2</sup>	117.389,10TL	<b>72.388,19TL</b>	% 161
2145	245.22 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	38.254,32 TL	12447/2	1.207,66 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	113.206,00TL	<b>74.951,68TL</b>	% 196
2146	245.22 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	38.254,32 TL	12447/2	1.207,66 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	113.206,00TL	<b>74.951,68TL</b>	% 196
2151	245.22 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	38.254,32 TL	12447/2	1.207,66 TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	113.206,00TL	<b>74.951,68TL</b>	% 196
2153	280.60 TL/m <sup>2</sup>	156.00m <sup>2</sup>	43.773,60 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	93.74m <sup>2</sup>	116.642,60TL	<b>72.869,00TL</b>	% 166
2165	286.63 TL/m <sup>2</sup>	113.00m <sup>2</sup>	32.389,19 TL	12447/1	1.244,32TL/m <sup>2</sup>	67.90m <sup>2</sup>	84.489,33TL	<b>52.100,14TL</b>	% 161

- Parsellerin değer artışı ya da azalışı için 1163 sayılı Kanuna uygun olarak şerefiye uygulamasında, şerefiye bedelinin mutlaka şerefiye alacaklısı ortağa verilmesi gerekmektedir. Şerefiye ödeyeceklerin borçlandırılması, taksit olarak emlak vergisine ya da inşaat ruhsatı almak için belediyeye başvurdıklarında idarenin belirleyeceği yöntemle göre tahsil edilebilir. Çizelge 11'de belirlenen şerefiye değerleri incelendiğinde, alınması gereken toplam miktar 228.256,74 TL, şerefiye verilmesi gereken toplam miktar ise 113.327,68 TL dir. Burada oluşan 114.929,06 TL'lik fazlalık,

dolayısıyla artık bedel de, idareye veya kamuya aktarılıp, uygulanan alanda yerel altyapı hizmet alanlarının inşası, yerel nitelikteki donatı alanlarının edinimi ve yerel nitelikteki donatı alanlarının inşaa maliyetlerinin karşılanmasında kullanılmalıdır.

- Almanya'da İmar Kanunu, eyalet yönetimlerine bağımsız karar alma gücüne sahip arazi düzenleme kurulları oluşturma yetkisi vermiştir. Bu kurulların oluşumu eyaletlere göre değişse de genel olarak bir harita ve kadastro uzmanı, bir değerlendirme uzmanı, bir hukukçu ve belediye meclisi

tarafından atanan iki üyeden oluşur. Ekonomik sonuçlar doğurmasından ötürü düzenleme kararı alınmadan önce taşınmaz sahipleriyle görüşülür. Arazi düzenlemesinin nihai ürünü, taşınmaz sahiplerinin görüşleri de dikkate alınarak hazırlanan parselasyon planıdır (Çağdaş V ve H. J Linke 2019). Ülkemizde de AAD komisyonları nicelik ve nitelik yönünden zenginleştirilmelidir. Süreç sadece plan sonucunda değil plan üretim safhasında da katılım sağlanarak, şeffaf bir yapıya doğru evrilmelidir. İdarenin, yöre sakinlerinin haklarını korunması da değer esaslı yöntemlerle mümkün olabilecektir. Değer esaslı yöntemlerin uygulama zorlukları da mevcut olmakla birlikte bu çalışmayla verilen stratejik yaklaşımda olduğu gibi, doğru bir model ve uygulama ile bu sorunlar da aşılabılır.

- Türkiye’de ki mevcut yönetmelikte imar uygulamalarına vatandaş katılımını sağlama mecburiyeti bulunmamaktadır. İlgili idaresince tasarlanan uygulama; parsel maliklerinin istek ve düşüncelerinden yoksun, dağıtım yapan kişinin aldığı eğitime ve şehirleşme düşüncesine göre şekillenmektedir. Bu durum parsel sahipleri arasında tedirginlik yaratmakta ve idare ile aralarında konsensus sağlanamamakla birlikte uygulamayı spekülasyonlara açık hale getirmektedir. Bunun sonucu idari Mahkemelerine davalar açılmakta ve bu davaların büyük çoğunluğu açık ara vatandaşlar lehine sonuçlanarak, uygulamalar iptal edilmekte ve kök parsellere dönene kadar arazi yapısı değiştiği için sorun kronikleşmekte ve telafisi zor zararlar meydana gelmektedir.
- 7221 sayılı Kanun’un 6. maddesiyle İmar Kanunu’nun 8. maddesine eklenen 8. fıkrayla; “Kesinleşen imar planları veya parselasyon planlarına karşı kesinleşme tarihinden itibaren her halde beş yıl içinde dava açılabilir” düzenlemesine yer verilmiş, dava açma süresi 5 yıllı kısıtlanmıştır. Farklı hukuki sebeplerle bu süre daha da uzayabilmektedir. İmar uygulamalarıyla

alakalı idare mahkemelerinde açılan davalar; DOP’un hatalı hesaplanması, teknik olarak zorunluluk bulunmadığı halde giren ve tahsis edilen parselin aynı yerden verilmediği vb. durumları kapsamaktadır. Bu kapsamda, dağıtımın mevcut yönetmeliğe uygun yapılmadığı gerekçesiyle uygulamalar bozulmakta ve geriye dönüşler yaşanmaktadır.

- Bu olumsuzlukların önlenmesinde; modern dünyadaki gibi insan duygu ve düşüncelerini önemseyen, taşınmaz sahiplerinin imar uygulamasına konu parselasyon planının oluşumunda ve imar parsellerinin dağıtımında fikirlerine önem verecek şekilde taşınmaz sahipleri ile görüşmeler (mülakat) yapılmalıdır. İmar uygulamasıyla gerçekleşecek değer artışlarını belirleyebilecek değerlendirme uzmanlarının ve mülkiyet kavramında uzman hukukçuların, Almanya modelindeki gibi, yasal olarak sürece eklenmesi de gereklidir.
- Taşınmaz hukuku açısından; mülkiyet hakkı gereği, parselasyon planı ve tapuya tescilli imar parseli oluşumunda, kesinti miktarının taşınmazda meydana gelen değer artışının tam karşılığı olması gerekmektedir (Yılmaz ve Demir 2017). Bir taşınmazın değerinden aşağı bir karşılıkla özel mülkiyetten çıkarılması, mustakil parsel iken hisseli parselde dönüştürülmesi, dolayısıyla parselasyon planı ile daha düşük bir taşınmaza tahsisi, Anayasanın 2., 10., ve 13. Maddelerine aykırılık teşkil etmektedir (Anayasa Mahkemesi 12.10.1976 tarih ve E 1976/38, K 1976/46 sayılı kararı). Anayasamızın 13. maddesi gereği, temel hakların özüne dokunulması olanaksızdır. İmar uygulamasının dayanağı olan “kamu yararı” kavramı, mülkiyetin karşılıksız veya değerinden daha düşük arsalara tahsisinin yapılmamasını öngörmektedir. Anayasa Mahkemesi ise; gerçek değer yerine daha düşük bir değer ödenmesinin, “o taşınmazın kısmen müsadereyi (devlete haksız kazanç sağlanması)” niteliğini taşıyacağı görüşündedir (Köktürk ve

Köktürk, 2005). AAD ile ilgili olarak, 3194 sayılı mevcut yasal düzenlemede, düzenlemeye giren kadaströ parsellerinden eşit oranlı DOP kesintisinin yapılmasının, yasanın 18. Maddesinin 2. Fıkrasında belirtilen DOP kesintisinin “düzenleme dolayısıyla meydana gelen değer artışları” karşılığında olduğu ifade edilmektedir. Ancak, uygulamada bedelsiz kesintinin dayanağı olan değer artışının ya da azalışının tespit edilememesi sebebiyle Anayasaya aykırılık da devam etmektedir (Köktürk ve Köktürk, 2005 ; Yılmaz ve Demir 2017 ). Belirtilen bu hukuksal boşluklar nedeniyle, bu çalışmada tüm boyutlarıyla ele alınan parselasyon planına dayalı imar parseli üretiminde, değer esaslı uygulamaya geçilmesi gerektiği tüm açıklığıyla ortaya konmuştur. Derece dönüşüm esaslı şerefiye uygulamasında ortaya çıkan değer artışı ya da azalışının tam olarak tespit edilebilmesi dolayısıyla, DOP kesintisinin taşınmazlarda gerçekleşen değer artışı veya azalışına uygun olarak tahsis işlemine yansıtılmasını olanaklı hale getirmiştir.

## Teşekkür

İmar planı verilerinin kullanılmasına olanak sağlayan Erzurum Büyükşehir Belediyesi İmar Müdürlüğü ve Erzurum Tapu ve Kadastro Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

## 5. Kaynaklar

Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik, 22.02.2020.

Çağdaş, V., ve Linke, H. J., 2019. Almanya’da Arazi Düzenlemesi. *HKMO Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, **6 (2)**: 96-114.

Demirel, B., 2019. İmar Kanununun 18.Maddesinin Değerleme Esaslı Uygulanabilirliğinin İncelenmesi ve Öneriler. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 54.

Gökçe, D., ve Salalı, V., 2014. Kentsel Dönüşümde “Eşdeğerlik” İlkesinin Önemi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **18 (1)**: 55–65.

Köktürk, E., ve Köktürk, E., 2005., Yeni Bir İmar Tüzesinin En Önemli Ögesi Olarak Arsa Düzenlemelerinde Eşdeğerlik İlkesinin Oluşturulması, *10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Ankara.

Tapu Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun (Kanun No:7181), 04.07.2019.

Yalçır, Ş., ve Ekiz, M., 2017. Eşdeğerlilik Esaslı Arazi ve Arsa Düzenlemesinde Analitik Hiyerarşi Prosesinin Kullanımı. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **6 (1)**: 59-75.

Yıldız, F., Özkan, G., Yalçır, Ş., Yıldırım, H., Gökmen, A. ve Öztaş, M., 2008. Alan Düzenleme Ana Uygulama Esaslarının Belirlenmesinde Değer eşitliğini Esas Alan Modellerin Uygulaması Üzerine Bir Araştırma. *HKMO Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, **99 (2)**: 5-14.

Yılmaz, A., 2016. İmar uygulaması değerlendirme çatkısının oluşturulması ve değer esaslı uygulama modelinin ülkemize uyarlanması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 249.

Yılmaz, A., ve Demir, H., 2017. İmar Uygulamasında (3194/18) Değer Esası, Maliyet Karşılama ve Değer Kazanımı. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 3-6 Mayıs 2017, Ankara.

Ziegenbein, W., Reuter, F., and Voß, W., 2015. Immobilienwertermittlung. K. Kummer, T. Kötter and A. Eichorn (ed.), *Das deutsche Vermessungs und Geoinformationswesen* Wichmann, Berlin. 589-666.

## Taşınabilir Lazer Tarama Sistemleri ile Farklı Alanlarda Doğruluk Analizi

Zübeyir Bilal ÇAKMAK<sup>1</sup>, Burak AKPINAR<sup>1\*</sup>, Mahmut Oğuz SELBESOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

e-posta: zubeyircakmak21@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7109-3249>

Sorumlu yazar e-posta: bakpinar@yildiz.edu.tr\*

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-1578>

e-posta: selbesoglu@itu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1132-3978>

Geliş Tarihi: 02.07.2022

Kabul Tarihi: 18.10.2022

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Lidar; Mobil Lidar Sistemi; SLAM; Taşınabilir Lazer Tarama Sistemi; Üç boyutlu modelleme.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak mobil lidar sistemlerinin kullanım alanları günümüzde hızla artmaktadır. Özellikle GNSS ile konum belirlemenin mümkün olmadığı kapalı alanlarda SLAM algoritmalarının sağladığı avantajlar ile haritalama çalışmaları yüksek doğrulukta hızla yapılabilmektedir. Bu çalışmada, geliştirilen bir mobil lidar sistemi ile ağaçlık alan, kapalı alan ve dış mekanda yapılan ölçmeler sonucunda söz konusu alanların üç boyutlu modelleri üretilmiş ve üretilen modellerin doğruluk analizi yapılarak, GNSS ile konumlanmanın mümkün olmadığı durumlarda mobil lidar sistemlerinin doğrulukları araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda geliştirilen mobil lidar sistemi ile ağaçlık alanlar, kapalı alanlar ve dış mekânlarda yapılan çalışmalar için sırasıyla  $\pm 2.1$  cm,  $\pm 2.4$  cm ve  $\pm 3.0$  cm standart sapma değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre sistemin orman envanterinin belirlenmesi çalışmalarında, kapalı ve açık alanlarda yapılacak mimari röleve vb çalışmalarda kullanılabilmesi öngörülmektedir.

## Accuracy Assessment of Mobile Lidar System in Different Environments

### Abstract

#### Keywords

Lidar; Mobile Lidar System; SLAM; Simultaneous localization and mapping; 3-dimensional modelling;

Depending on the developments in technology, the usage areas of mobile lidar systems are increasing rapidly today. With the advantages of SLAM algorithms, mapping studies can be performed with high accuracy, especially in areas where positioning is not possible with GNSS. In this study, with a developed mobile lidar system, three-dimensional models of the different areas were produced as a result of measurements made in woodland, indoor and outdoor areas, and the accuracy of the produced models was investigated in cases where positioning with GNSS was not possible. As a result of the tests,  $\pm 2.1$  cm,  $\pm 2.4$  cm and  $\pm 3.0$  cm standard deviation values were obtained, respectively, for the studies carried out in woodland, indoor areas and outdoors with the mobile lidar system developed. According to these results, it is predicted that the system can be used in studies to determine the forest inventory, architectural surveys etc. to be made in indoor and outdoor areas.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

### 1. Giriş

3 boyutlu yoğun nokta bulutlarına olan ihtiyaç günümüzde gittikçe artmaktadır. Teknolojideki gelişmelere de paralel olarak 3 boyutlu nokta bulutu üreten ölçme sistemleri, harita mühendisliği uygulamalarında, ormanlık alanların ölçümü ve belgelenmesinde, dijital ikiz projelerinde, BIM (Building Information Modelling) standartlarında bina modeli oluşturulmasında, 3 boyutlu sanal tur

çalışmalarında vb. aktif olarak kullanılmaktadır. İhtiyaç duyulan 3 boyutlu yoğun nokta bulutları fotogrametrik yöntemlerle, yersel lazer tarayıcılar ile ve mobil lazer tarama sistemleri (MLS) ile elde edilebilmektedir.

Lazer ışınlarının kullanımı ile araştırma çalışmaları 1960 lı yıllarda atmosfer biliminde ve batimetrik çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır (Hickman



and Hogg 1969). Sonraki yıllarda lidar sistemlerinin ormanlık alanların ölçümünde ve arazi topografyasının belirlenmesinde kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Arp and Tranarg 1982). 1990 ların başında yakın kızılötesi ışık kullanan lazer profilleri ile birlikte lazer tarayıcılar ormanlık alanlarda ağaç yüksekliklerinin belirlenmesinde, 1990 ların sonlarında ise hava lazer tarama sistemleri ağaç yüksekliği, meşcere hacmi, ağaç taban alanı gibi bilgilerin elde edilmesinde kullanılmıştır (Nelsoon *et al.* 1988, Harding *et al.* 1994).

2000 li yıllara gelindiğinde ise lidar teknolojilerinin uzay tabanlı sistemlerde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Lefsk *et al.* 2005). 3 boyutlu nokta bulutlarının her türlü nesneyi farklı ölçeklerde ve detay seviyelerinde temsil etmekteki başarısı nedeniyle günümüzde 3 boyutlu görüntüleme tekniklerinin otonom araçlar, insansız hava araçları, robotlar da dahil olmak üzere endüstriyel, tıbbi, bilimsel vb. birçok alanda kullanılmaya başlandığı görülmektedir (Koide *et al.* 2019, Wang *et al.* 2021, Yang *et al.* 2021). Lidar sistemlerinin taşınabilir hale getirilmesi ile ilgili ilk çalışma ise Glennie (2009) tarafından helikoptere monte edilmiş lazer tarama sistemi ile karşımıza çıkmaktadır. Sonrasında SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmalarındaki gelişmeler ile birlikte taşınabilir lazer tarama sistemleri mobil haritalama sistemlerine doğru dönüşmeye başlamış ve lidar sistemlerinin hareket halindeki bir araca, insansız hava aracına ya da sırt çantasına monte edilmesi ile, hareket halinde, kısa süre içinde ve yüksek çözünürlükte ortamının 3 boyutlu haritaları üretilmeye başlanmıştır (Mossmann and Stiller 2011, Nüchter *et al.* 2007, Sobczak *et al.* 2021).

Haritalama amaçları için kullanılan ticari taşınabilir lazer tarama sistemlerinde genellikle GNSS (Global Navigation and Satellite System) alıcıları ile IMU (Inertial Measurement Unit) sistemleri bulunmaktadır ve bu sistemlerin kullanımı ile geo-referanslanmış, üç boyutlu nokta bulutu verisi elde edilmektedir (Stefano *et al.* 2021). SLAM algoritmalarının sağladığı avantajlar ile de GNSS kullanımının mümkün olmadığı alanlarda, lup

kapatma olarak adlandırılan, ölçüme başlanılan nokta ölçümün bitirilmesi yöntemi ile hataların minimuma indirilerek yüksek çözünürlüklü nokta bulutu verisi elde edilebilmektedir (Cabo *et al.* 2018, Gollob *et al.* 2020).

Bu çalışmada haritalama amaçlı geliştirilen bir taşınabilir lazer tarama sistemi ile ilgili bilgiler verilmiş ve geliştirilen sistem ile ağaçlık alan, kapalı alan ve açık alan olmak üzere üç farklı bölgede test ölçümleri yapılarak sistemin doğruluğu araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında geliştirilen taşınabilir lazer tarama sisteminde kullanılan yazılım ve donanımlar aşağıda ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

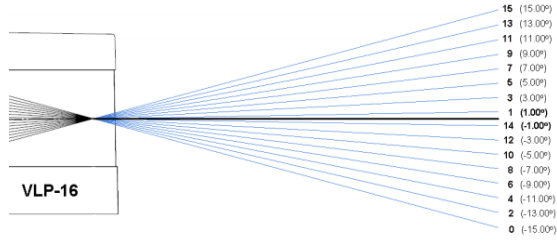
### 2.1 Taşınabilir Lazer Tarama Sisteminin Bileşenleri

Sistemde lidar sensörü olarak Velodyne VLP-16 kullanılmıştır (Şekil 1).



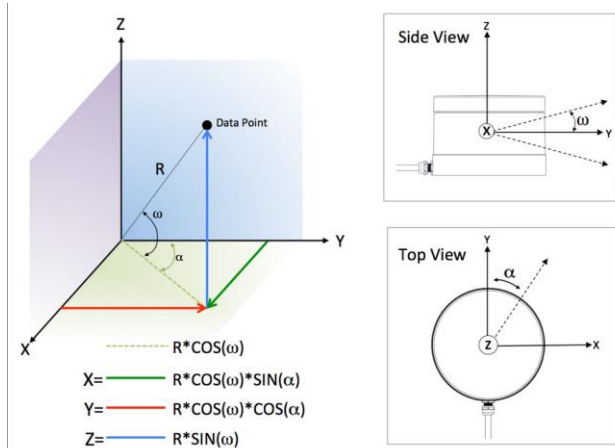
Şekil 1. Velodyne VLP-16 Lidar

Velodyne VLP-16 Lidar sistemi günümüzde sürücüsüz otomobiller, robotlar, insansız hava araçları vb birçok alanda aktif olarak kullanılan bir lidar sistemidir. Velodyne VLP-16 çalışma prensibi, aynı anda gönderilen 16 adet ışın demetinin ölçülen objenin yüzeyinden yansıyan sinyallerin alıcı üniteye geri dönmesi ve gönderilen ve geri dönen sinyalin gidiş-dönüş zamanının ölçülerek, konum belirleme algoritmaları ile objenin koordinatlarının hesaplanması şeklindedir (Şekil 2).



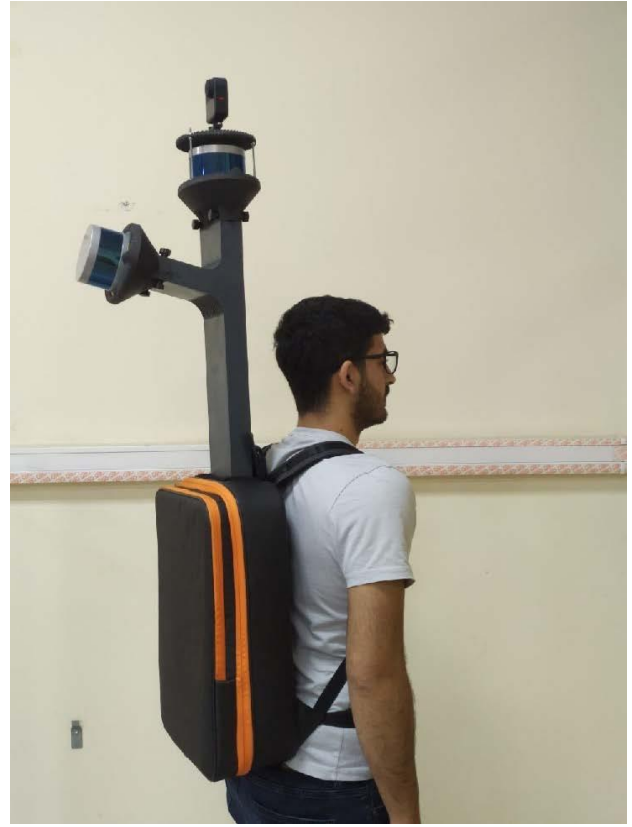
**Şekil 2.** Velodyne VLP-16 çalışma prensibi (Velodyne Lidar 2019)

Aynı anda gönderilen 16 adet sinyalin lidar sistemi içinde bulunan ayna mekanizması sayesinde döndürülerek dağıtılması ile saniyede 300.000 noktanın ölçümünün yapılması sağlanmaktadır. Ölçülen objenin koordinatlarının belirlenmesi aşamasında Lidar Koordinat Sistemi olarak adlandırılan, başlangıç noktası Lidarın merkezi olan bir koordinat sistemi kullanılmaktadır. Lidar tarafından gönderilen 16 adet çıkış açılarının ve obje ile Lidar arasında ölçülen uzunlukların kullanılması ile obje koordinatları Lidar Koordinat Sisteminde hesaplanabilmektedir (Şekil 3).



**Şekil 3.** Lidar Koordinat Sisteminde Objeye Koordinatlarının Hesaplanması (Velodyne Lidar 2019)

Geliştirilen sistemde 2 adet Velodyne VLP-16 Lidar sensörü kullanılmış ve sırt çantasına taşınabilir olarak tasarlanmıştır (Şekil 4).



**Şekil 4.** Geliştirilen sistemin genel görünümü

## 2.2 SLAM Algoritmaları

SLAM kavramı eşzamanlı konumlama ve haritalama olarak kullanılmaktadır ve bir robotun ortam haritasını oluşturarak bu haritayı aynı anda konumlama için kullanabileceği bir süreç olarak da tanımlanmaktadır. Hareketli bir lazer tarayıcı ile harita oluşturabilmek için lidarın konumunu bilmek gereklidir ancak lidarın konumunu bilmek için bir haritaya ihtiyaç duyulur. Bu durum robotikte bir ikilem oluşturmaktadır. SLAM bu sorunu eş zamanlı konumlama yaparak bilinmeyen bir ortam haritası oluşturarak çözer (Wang *et al.* 2011). SLAM yöntemi ile oluşturulan ortam haritasının doğruluğu, sistemler kullanılan sensörlere bağlı olduğu gibi aynı zamanda seçilen SLAM algoritması ile de doğrudan ilişkilidir.

**Genişletilmiş Kalman Filtreleme Yöntemi ile SLAM (GKF-SLAM):** Genişletilmiş Kalman Filtresi ile dinamik bir sistemin durumunun özyinelemeli olarak tahmini mümkün olmaktadır. GKF-SLAM yaklaşımında, robotun konumu, dönüklüğü ve gözlemlenen noktalar GKF kullanılarak tahmin edilir ve durumlar arasında korelasyonlar hesaplanarak

optimum bir tahmin elde edebilmek için elde edilen 1. korelasyonlar korunur. Robotun konumu, dönüklüğü ve gözlemleri bir durum vektörü ve kovaryans matrisi ile temsil edilir.

Robotun durumları  $X_r=[x_r, y_r, \phi_r]^T$  olmak üzere,  $(x_r, y_r)$  robotun konumunu,  $\phi_r$  robotun dönüklüğünü belirtmektedir. Özelliklerin durumları  $X_m= [x_1, y_1, x_1, y_1, \dots]^T$  olmak üzere,  $(x_j, y_j)$  j noktasının konumunu temsil etmektedir. Robotun durum vektörü ise  $X=[X_r, X_m]^T$  olarak tanımlanır.

Robotun t zamanda ve t zamanına bağlı olarak t+1'inci zamanda oluşturduğu kinematik model ise Eşitlik 1'de tanımlanmıştır.

$$X_r(t+1) = f(X_r(t), u(t)) + w_r(t) \quad (1)$$

Burada  $u(t)$  t zamanındaki kontrol ölçüsünü ifade eder. Bu kontrol ölçüsü odometri ya da hız verisi gibi önceden t zamanda hareketi tahmin etmeye yarayan verilere dayanır.  $w_r(t)$  ise sıfır ortalamalı ve  $Q_r$  kovaryanslı Gauss gürültüsünü ifade eder.  $f$  fonksiyonu robotun modeline göre değişkenlik gösteren ve robotu tanımlayan bir fonksiyonu ifade eder. Zamana bağlı durum vektörü Eşitlik 2 de tanımlanmıştır (Bailey et al. 2006).

$$\begin{bmatrix} X_r(t+1) \\ X_m(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(X_r(t), u(t)) \\ X_m(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_r(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Lidardan elde edilen gözlemleri tanımlamak için gözlem modeli oluşturulması gerekir. Gözlem modeli Eşitlik 3 de tanımlanmıştır.

$$z(t) = H(X(t)) + v(t) \quad (3)$$

Burada H fonksiyonu doğrusal olmayan koordinat dönüşümünü ifade eder.  $v(t)$  ise  $w(t)$  ile korelasyonu olmayan bağımsız bir Gauss gürültüsünü ifade etmektedir. GKF-SLAM durum vektörünü tahmin etmek için ve ilişkili kovaryans matrisini hesaplamak için Genişletilmiş Kalman Filtresi kullanır. Kovaryans matrisi Eşitlik 4 de tanımlanmıştır.

$$P = \begin{bmatrix} P_{rr} & P_{rm} \\ P_{rm}^T & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kovaryans matrisindeki  $P_{rr}$  robotun konum ve dönüklük tahminine,  $P_{mm}$  ortam haritasına karşılık gelen alt matrisi ifade eder.  $P_{rm}$  ise korelasyon matrisini ifade eder. GKF iki aşamada yinelemeli olarak SLAM problemini çözer;

1. Tüm sistemin durum geçiş modeli kullanılarak robotun mevcut konum ve dönüklükleri ve özellik konumları tahmin edilir. Elde edilen sonuçlar ile kovaryans matrisi hesaplanır.

$$\hat{X}_r(t+1|t) = f(\hat{X}_r(t|t), u(t)) \quad (5)$$

$$\hat{X}_m(t+1|t) = \hat{X}_m(t|t) \quad (6)$$

$$P(t+1|t) = \nabla F_x P(t|t) \nabla F_x^T + Q \quad (7)$$

2. Gözlem modelini kullanarak, durum vektörü ve kovaryans matrisi güncellenir.

$$K(t+1) = P(t+1|t) \nabla H_x^T S(t+1)^{-1} \quad (8)$$

$$S(t+1) = \nabla H_x P(t+1|t) \nabla H_x^T + R \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{X}(t+1|t+1) &= \hat{X}(t+1|t) + \\ K(t+1)[z(t+1) - H(\hat{X}(t+1|t))] \end{aligned} \quad (10)$$

$$P(t+1|t+1) = P(t+1|t) - K(t+1)$$

$$S(t+1)K(t+1)^T \quad (11)$$

**Grafik Tabanlı SLAM Yaklaşımı:** SLAM sorununu ele almak için grafik tabanlı yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Robotun pozu ve özellik konumları bir grafik düğümü olarak temsil edilir. Kontrol ölçümleri ve robotun gözlemlediği noktaların konumları ilgili düğümler kullanılarak kenarları oluşturur. Robot pozu  $X_{r0}, \dots, X_{rl}$ , özellikler s ve durum vektörleri  $X_{m0}, \dots, X_{ml}$  olarak tanımlanmıştır. Kontrol ölçümleri ve gözlemler sırasıyla  $u_k$  ve  $z_k$  olarak tanımlanırsa sonsal olasılıklı SLAM Eşitlik 12 de tanımlanmıştır (Grisetti et al. 2010).

$$p(X_{r(0:l)}, X_{m(1:s)} | z_{1:l}, u_{1:l}) \quad (12)$$

Gözlemlerin koşullu olarak bağımsız olduğu varsayılırsa, sonsal olasılıklar Eşitlik 13 de tanımlanmıştır.

$$c p(X_{r0}) \prod_k [p(X_{rk} | X_{r(k-1)}, u_k) * \prod_i p(z_k^i | X_{rk}, X_{mji})] \quad (13)$$

Formülde c normalleştirmeyi,  $(X_{r0})$  sonsal olasılığı,  $z_k^i$  i'inci gözlemi temsil eder.

Her ölçümde ve robotun pozunda Gauss gürültüsü olduğu varsayıldığı için durum geçiş modeli Eşitlik 14 ve 15 de gözlem modeli ise Eşitlik 16 ve 17 de tanımlanmıştır.

$$p(X_{rk} | X_{r(k-1)}, u_k) \quad (14)$$

$$\propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)]^T Q_r^{-1} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)] \right\} \quad (15)$$

$$p(z_k | X_{rk}, X_{m(1:s)}) \quad (16)$$

$$\propto \exp \left\{ -\frac{1}{2} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})]^T R^{-1} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})] \right\} \quad (17)$$

Eşitlik 15 ve Eşitlik 17 deki  $Q_r$  ve R durum ve gözlem gürültülerine karşılık gelen kovaryans matrisleridir. Durum ve gözlem matrisleri yazıldıktan sonra negatif logaritmik sonlu olasılık denklemi Eşitlik 18 de tanımlanmıştır.

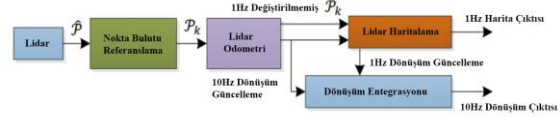
$$\begin{aligned} & -\log p(X_{r(0:l)}, X_{m(1:s)} | z_{1:l}, u_{1:l}) \\ & \propto \sum_k [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)]^T Q_r^{-1} [X_{rk} - f(X_{r(k-1)}, u_k)] + \sum_k [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})]^T R^{-1} [z_k - H(X_{rk}, X_{m(1:s)})] = \Psi(X) \end{aligned} \quad (18)$$

Burada  $X = [X_r^T, X_m^T]^T$  dir. Kontrol ölçülerinin ve robotun yaptığı gözlemlerin olasılığını minimize etmek için 'Maximizing Likelihood' yöntemi kullanılır. Eşitlik 19'daki maliyet fonksiyonu ile en uygun değer hesaplanır (Koide *et al.* 2020).

$$\hat{X} = \underset{X}{\operatorname{argmin}} \Psi(X) \quad (19)$$

**Lidar Odometri ve Haritalama (LOAM):** LOAM algoritması, düşük odometri kaymasına sahip haritalar oluşturabilmek için geliştirilmiş bir algoritmadır. Geliştirilen yöntemde IMU gibi ek sensör ölçümlerine ihtiyaç duyulmadan düşük odometri kayması ve düşük hesaplama yoğunluğu ile yoğun nokta bulutu elde edilmektedir (Zang and Singh 2014). Hesaplama karmaşıklığını azaltabilmek için ve performans optimizasyonu için LOAM algoritması temel olarak iki ana bölüme ayrılır. İlk algoritma LIDAR'ın hızını ve konumunu belirleyebilmek için yüksek frekanslı ancak düşük doğruluklu odometri verisi üretir. İkinci algoritma odometri verisi kullanarak nokta bulutlarını hassas bir şekilde eşler. Her iki algoritma kenar ve düzlemsel alanların noktasal özelliklerini çıkarıp, t+1

zamanda üretilen kenar ve düzlemsel alanları eşlemeyi esas alır. Kullanılan odometri algoritmasında, tespit edilen özellikler kullanılarak LIDAR'ın konumu, dönüklüğü ve hızı tahmin edilir.



Şekil 5. LOAM Algoritması Akış Diyagramı (Zang and Singh 2014).

Şekil 5 de LOAM algoritmasının akış diyagramı gösterilmiştir. Lidardan alınan nokta bulutu verileri  $P$  olarak gösterilmiştir. Algoritma başlangıçta bir koordinat sistemi oluşturur ve alınan verileri kaydeder. Buradaki temel sorun lidardan gelen her veri kendine ait lokal koordinat sisteminde geldiğinden dolayı koordinat sistemleri arasında dönüşüm yapılması gerekir. Gelen sensör verilerinin kenar ve düzlemsel özellikleri çıkartılarak eşlenir bu sayede sabit bir koordinat sisteminde haritalama yapılabilir. Birleştirilmiş ve kaydedilmiş nokta bulutları diyagramda  $P_k$  olarak tanımlanmıştır. Lidar odometri algoritması lidarın mevcut hızını dönüklüğünü ve konumunu hesaplar. Hesaplanan odometri verisi ile kaydedilmiş nokta bulutlarına ( $P_k$ ) ek bir düzeltme getirilir. Son olarak 10 Hz hızında ve 1 Hz hızında çalışan iki algoritma entegre edilerek sonuç nokta bulutu elde edilir. Elde edilen nokta bulutlarının konumsal doğruluğunu etkileyen en önemli faktör odometri hesabının doğruluğudur. LOAM algoritmasında kullanılan odometri hesabı özellik çıkarma ve özellik eşleştirme olmak üzere 2 ana başlık altında incelenir.

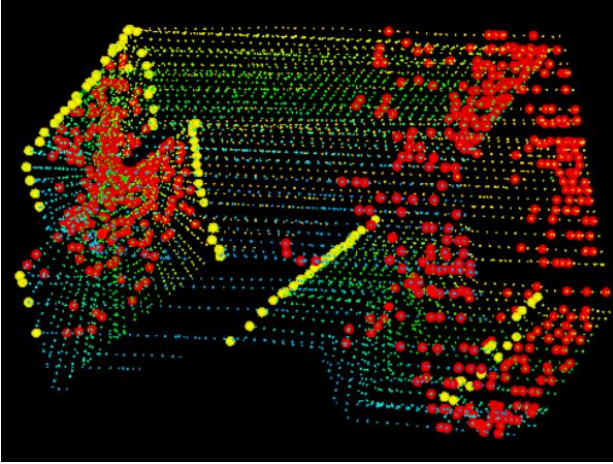
*i) Özellik Çıkarma:* Hareketli bir lidar sisteminde, lidarın ürettiği her veri farklı bir koordinat sisteminde olacaktır. Hareketli sistemlerde 3 eksende hareket olabileceğinden koordinat dönüşümü yapabilmek için iki yöntem vardır. İlk yöntemde lidarın konumu ve dönüklüğünün bilinmesi gerekir fakat SLAM probleminde olduğu gibi lidarın konumunun belirlenebilmesi için ortam haritasına ihtiyaç duyulur ve bu durum ek sensör verileriyle çözülebilir. İkinci yöntem ise düzlemsel

bölgelerin ve kenarların özelliklerinin çıkartılıp eşleştirilmesine dayanır.

Lidardan alınan nokta bulutunda yüzeyin düzgünlüğü tespit etmek için Eşitlik 20 kullanılır.

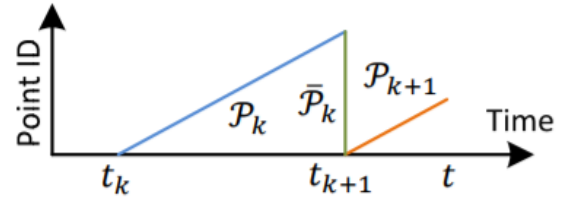
$$c = \frac{1}{|S| \| \bar{X}_{(k,i)}^L \|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{(k,i)}^L - X_{(k,j)}^L) \right\| \quad (20)$$

Burada S aynı taramada lidar tarafından alınan nokta kümesini ifade eder. Taramadaki her nokta c değerlerine göre sıralanır. Maksimum c değerine sahip noktalar kenar özelliklerini belirtirken, minimum c değerine sahip noktalar düzlemsel alanları ifade eder. Özellik noktaları 4 alt bölgeye bölünür. Daha sonra kenar özellikleri ve düzlemsel özellikler için belirli bir eşik değeri belirlenir. Her alt bölge maksimum 2 kenar noktası ve 4 düzlemsel nokta sağlayacak şekilde ayarlanır ve belirtilen kriterlere göre özellik noktaları belirlenir (Zang and Singh 2014).



Şekil 6. Nokta bulutundan çıkarılan kenar noktaları (sarı) ve düzlemsel noktaların (kırmızı) bir örneği.

ii) *Özellik Eşleştirme:* Hareketli bir lidarın  $t_k$  zamanında üretilen nokta bulutu ( $P_k$ ) ile  $t_{k+1}$  zamanda üretilen nokta bulutu ( $P_{k+1}$ ) arasında ortak bir alan oluşturulmalıdır. Şekil 7 de görüldüğü gibi  $P_k$  ve  $P_{k+1}$  nokta bulutları zaman damgaları ile lokal koordinat sistemleri oluşturulur. Bu koordinat sistemleri arasında dönüşümü sağlamak,  $\widehat{P}_k$  nokta bulutunu elde edebilmek için iki nokta bulutundaki düzlemsel ve kenar özellikleri eşleştirilir ve ortak koordinat sistemine kaydedilir. Özellikleri eşleyebilmek için iki tarama bölgesinde ortak alanın olması gerekir.



Şekil 7. Zaman damgalı iki LIDAR taramasının koordinat sistemlerinin birleştirilmesi

LOAM algoritmasında, tarama boyunca lidarın mevcut konumunu ve dönüklüğünü hesaplanır,  $\widehat{P}_k$  her iterasyon sonunda güncellenir ve tarama sonunda sonuç nokta bulutunu oluşturur. Çıkarılan özellikler eşleştirilirken  $P_k$ 'den çıkarılan özellikler ile  $P_{k+1}$ 'den çıkarılan özellikler arasındaki mesafe hesaplanır ve çıkan sonuçlara göre noktalar eşleştirilir. Kenarı özelliğini eşleştirebilmek için en az 4 noktaya ihtiyaç duyulur ve kenar özelliklerinin arasındaki mesafe hesaplanırken Eşitlik 21 kullanılır.

$$d_\epsilon = \frac{|\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,j)}^L| \times |\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L|}{|\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L|} \quad (21)$$

Düzlemsel özellikleri eşleştirilirken en az 6 noktaya ihtiyaç duyulur ve düzlemsel özelliklerin arasındaki mesafe hesaplanırken Eşitlik 22 kullanılır.

$$d_H = \frac{|(\widehat{X}_{(k+1,i)}^L - \widehat{X}_{(k,j)}^L) \times ((\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L) \times (\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,m)}^L))|}{|(\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,l)}^L) \times (\widehat{X}_{(k,j)}^L - \widehat{X}_{(k,m)}^L)|} \quad (22)$$

### 2.3 Çalışma Bölgeleri

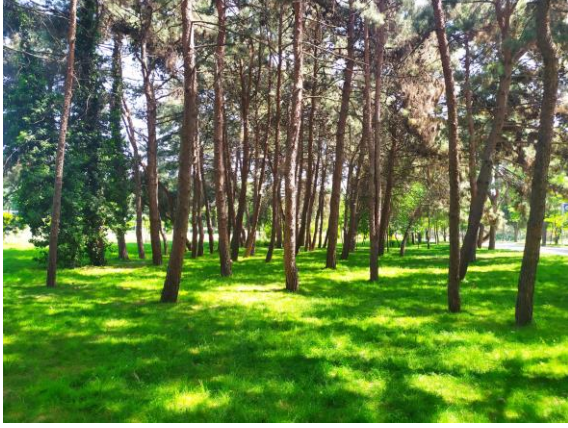
Çalışma kapsamında geliştirilen sistemin doğruluk analizleri için Şekil 8 de verilen, kapalı alan (Şekil 8a), açık alan (Şekil 8b) ve ağaçlık alandan (Şekil 8c) oluşan 3 farklı bölge seçilmiştir.



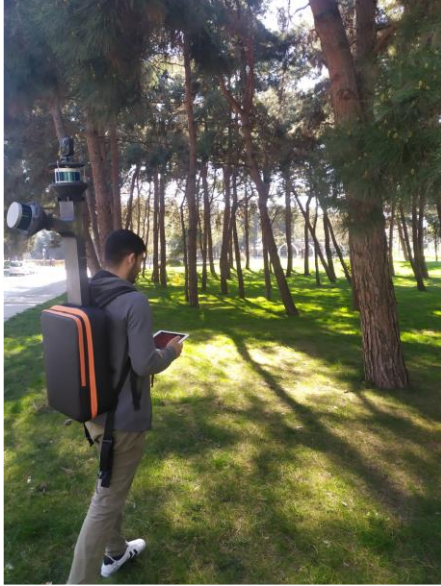
Şekil 8. Çalışma bölgeleri



Sistemin ağaçlık alanda ölçme doğruluğunu belirleyebilmek için Şekil 9 da gösterilen ağaçlık alan, sırt çantasına monte edilen taşınabilir lazer tarama sistemi ile ölçülmüştür (Şekil 10).

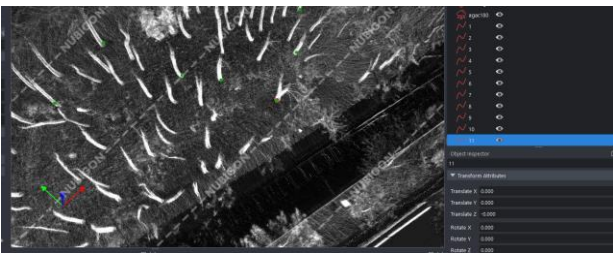


Şekil 9. Test sahası olarak seçilen ağaçlık alan



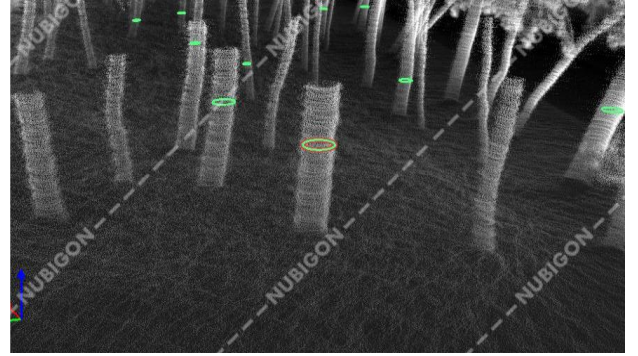
Şekil 10. Ağaçlık alanda yapılan ölçmeler

Şekil 9 da verilen 2800m<sup>2</sup> alana sahip ağaçlık alanının ölçüm süresi toplam 10 dk sürmüştür ve ölçüm sonucunda Şekil 11 de verilen nokta bulutu elde edilmiştir.



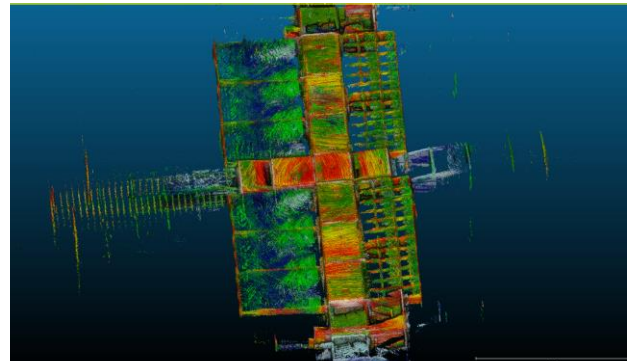
Şekil 11. Ağaçlık alana ait nokta bulutu

Sistemin ağaçlık alanda doğruluğunu belirleyebilmek için nokta bulutunda da bulunan 20 adet ağacın gövdesinin zeminden 1.30m yükseklikteki çevre uzunlukları metre ile ölçülmüş ve söz konusu ağaç gövdelerine ilişkin yarıçap değerleri belirlenmiştir. Seçilen 10 ağacın nokta bulutu verisi üzerinden de yine zeminden 1.30m yükseklikteki çevre uzunlukları ve yarıçap değerleri Nubigon yazılımı denemem sürümü kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 12).



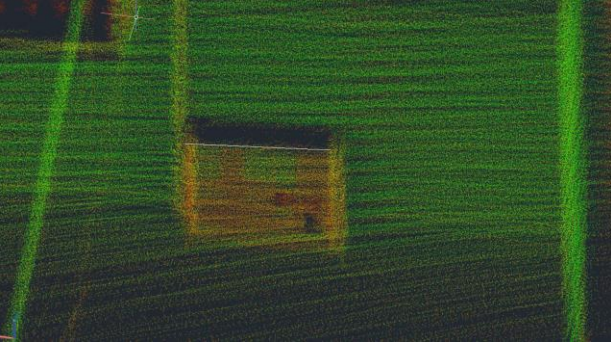
Şekil 12. Nokta bulutu üzerinde ağaç gövde yarıçaplarının belirlenmesi

Ağaçlık alanda yapılan testlerin ardından sistemin bina içi gibi kapalı alanlardaki ölçme doğruluğunun belirlenebilmesi amacıyla Şekil 8 de işaretlenen, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi D Blok da test çalışmaları yapılmıştır. Toplam 5 dakika süren ölçme işlemi sonucunda söz konusu alana ilişkin elde edilen nokta bulutu verisi Şekil 13 de verilmiştir.

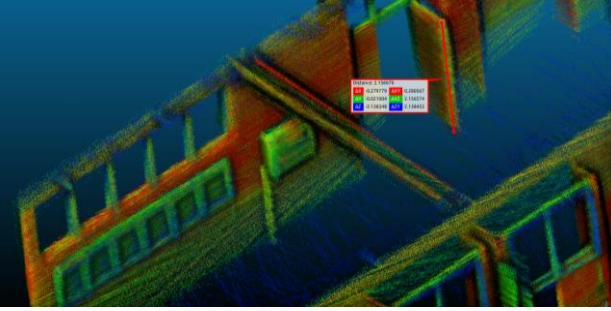


Şekil 13. Kapalı alana ilişkin nokta bulutu verisi

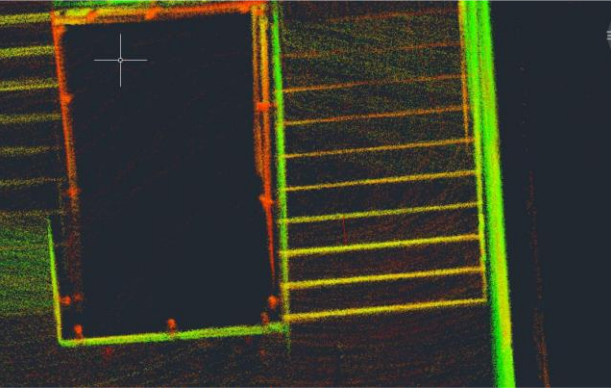
Sistemin kapalı alanda doğruluğunu belirleyebilmek için, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16 da verilen sırasıyla duvar panosu, kapı ve merdiven gibi detayların boyutları sahada metre ile ölçülmüş ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 14. Nokta bulutu verisinde duvar panosu detay görünümü

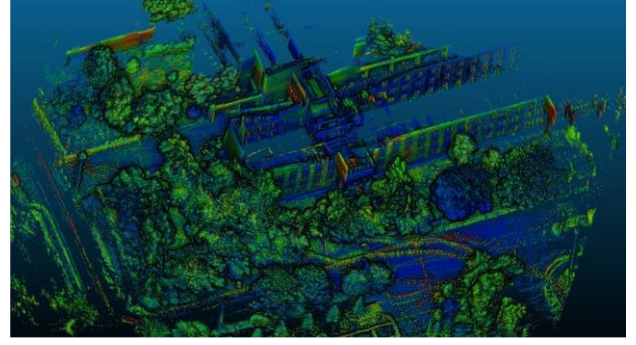


Şekil 15. Nokta bulutu verisinde kapı detay görünümü



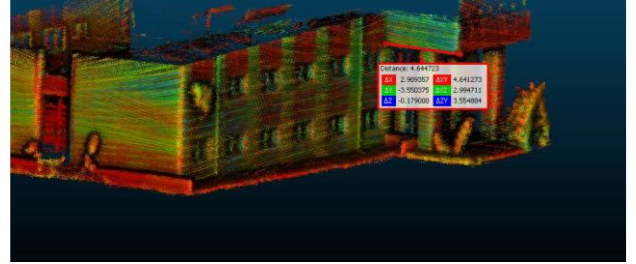
Şekil 16. Nokta bulutu üzerinde kapı detay görünümü

Ağaçlık ve kapalı alanlarda yapılan testlerin ardından sistemin açık alanlardaki performansının belirlenebilmesi için Şekil 8 de işaretlenen, Şekil 17 de ise nokta bulutu verilen, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi çevresinde 15 dakika süren test çalışmaları yapılmıştır.

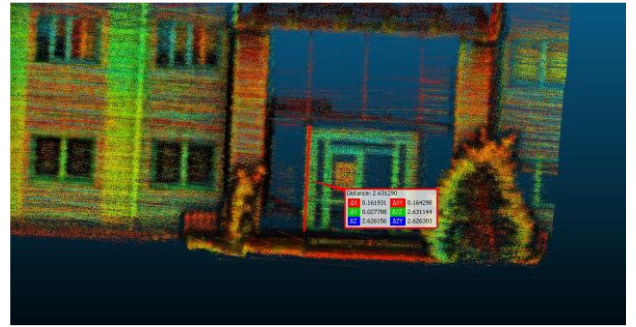


Şekil 17. Açık alanda elde edilen nokta bulutu verisi

Sistemin açık alanda, dış mekanda doğruluğunu belirleyebilmek için Şekil 18 ve Şekil 19 da verilen, farklı boyutlarda cephe elemanları sahada yersel jeodezik yöntemler ile ölçülmüş ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 18. Açık alanda kontrol ölçüleri-1



Şekil 19. Açık alanda kontrol ölçüleri-2

### 3. Bulgular

Ağaçlık alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin ağaçlık alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için 20 adet ağacın zeminden 1.30 m yükseklikteki gövde yarıçaplarının sahada metre ile ölçüm yapılarak bu veriler bilinen değerler olarak ele alınmış ve nokta bulutundan elde edilen gövde yarıçapları ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 1 de ağaçlık alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.



**Çizelge 1.** Ağaçlık alan ölçüm sonuçları.

Ağaç No	Lidar Yarıçap (cm)	Bilinen Yarıçap (cm)	Fark (cm)
1	11.0	14.0	-3.0
2	13.3	11.0	2.3
3	13.5	15.0	-1.5
4	16.9	16.0	0.9
5	18.5	20.0	-1.5
6	18.7	19.0	-0.3
7	19.2	19.0	0.2
8	19.5	22.0	-2.5
9	19.5	18.0	1.5
10	19.6	19.0	0.6
11	19.8	16.0	3.8
12	20.2	26.0	-5.8
13	20.5	21.0	-0.5
14	21.2	21.0	0.2
15	22.5	23.0	-0.5
16	22.7	21.0	1.7
17	24.2	28.0	-3.8
18	25.6	25.0	0.6
19	26.6	27.0	-0.4
20	26.9	27.0	-0.1
<b>Standart Sapma (cm)</b>			<b>2.1</b>

Kapalı alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin kapalı alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16 da verilen sırasıyla duvar panosu, kapı ve merdiven gibi toplam 20 adet detayın boyutları sahada metre ile ölçülerek bu veriler bilinen olarak ele alınmış ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 2 de kapalı alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 2.** Kapalı alan ölçüm sonuçları.

Ölçü No	Lidar Uzunluk (m)	Bilinen Uzunluk (m)	Fark (m)
1	0.062	0.030	-0.032
2	0.062	0.040	-0.022
3	0.151	0.175	0.024
4	0.170	0.190	0.020
5	0.250	0.235	-0.015
6	0.283	0.300	0.017
7	0.321	0.303	-0.018
8	0.480	0.450	-0.030
9	0.579	0.563	-0.016
10	0.677	0.655	-0.022
11	0.747	0.780	0.033
12	0.838	0.800	-0.038
13	0.840	0.820	-0.020
14	1.076	1.093	0.017
15	1.119	1.093	-0.026
16	1.184	1.130	-0.054
17	1.249	1.205	-0.044
18	1.340	1.310	-0.030
19	2.152	2.140	-0.012
20	2.310	2.280	-0.030
<b>Standart Sapma (m)</b>			<b>0.024</b>

Açık alanda yapılan test ölçmeleri sonucunda sistemin açık alanlarda doğruluğunun belirlenebilmesi için Şekil 18 ve Şekil 19 da örnek

olarak verilen toplam 20 adet detayın boyutları sahada ölçülerek bu veriler bilinen olarak ele alınmış ve nokta bulutu verisinden elde edilen değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 3 de açık alanda yapılan ölçme sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 3.** Açık alan ölçüm sonuçları.

Ölçü No	Lidar Uzunluk (m)	Bilinen Uzunluk (m)	Fark (m)
1	0.083	0.080	0.003
2	0.090	0.130	-0.040
3	0.196	0.180	0.016
4	0.705	0.760	-0.055
5	0.706	0.745	-0.039
6	0.741	0.730	0.011
7	0.746	0.740	0.006
8	1.287	1.290	-0.003
9	1.288	1.290	-0.002
10	1.310	1.290	0.020
11	1.677	1.700	-0.023
12	1.680	1.700	-0.020
13	1.729	1.720	0.009
14	1.745	1.720	0.025
15	2.172	2.160	0.012
16	2.631	2.670	-0.039
17	2.711	2.770	-0.059
18	4.645	4.600	0.045
19	15.874	15.840	0.034
20	17.975	18.000	-0.025
<b>Standart Sapma (m)</b>			<b>0.030</b>

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında geliştirilen bir taşınabilir lazer tarama sisteminin farklı alanlarda doğruluğunu ve kullanılabilirliğini belirleyebilmek için ağaçlık alan, kapalı alan ve açık alandan oluşan 3 farklı bölgede test ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sistemin ağaçlık alanlardaki doğruluğunu belirleyebilmek için seçilen 20 adet farklı ağacın zeminden 1.30 m yükseklikteki çevre uzunlukları metre ile ölçülmüş ve bu veriden ağaç gövde yarıçapları hesaplanmıştır. Bununla birlikte sistem ile üretilen 3 boyutlu nokta bulutu verisi üzerinden de aynı ağaçların gövde yarıçapları hesaplanmıştır. Metre ile elde edilen gövde yarıçaplarının bilinen olarak alınması ile her bir ağaç için fark değerleri elde edilmiştir. 20 ağaç için hesaplanan fark değerlerinin standart sapması 2.1 cm olarak belirlenmiştir. Bu değer sistemin ağaçlık alanda doğruluğu olarak ele alınabilir. Toplam 2800m<sup>2</sup> lik alanın taşınabilir lazer tarama sistemi ile ölçümü ve nokta bulutunun elde edilmesi için harcanan süre toplam 10dk dır. Sistemin süre açısından sağlayacağı avantajı belirleyebilmek için aynı alanın yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için



harcanması gereken minimum süre 60 dk olarak hesaplanmıştır.

Sistemin kapalı alanların ölçümündeki doğruluğunu belirleyebilmek için ise kapalı alana ilişkin nokta bulutu verisi üzerinde farklı boyutlarda detaylar seçilerek sahada metre ile ölçülmüş ve bu verilerin bilinen olarak alınmasıyla kapalı alan için 20 farklı detay uzunluğunun farkları hesaplanarak Çizelge 2 de verilmiştir. Kapalı alanda 20 farklı detay için hesaplanan fark değerlerinin standart sapması 2.4 cm olarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistem ile söz konusu kapalı alanın ölçümü 5 dk sürmüştür. Aynı alanında yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için gereken minimum süre 20 dk olarak hesaplanmıştır.

Yine sistemin açık alanlardaki doğruluğunu belirleyebilmek için 20 farklı detay belirlenerek uzunlukları klasik yersel yöntemler ile belirlenmiş ve aynı detaylara ilişkin nokta bulutundan hesaplanan uzunlukları arasındaki farklar hesaplanarak Çizelge 3 de verilmiştir. Açık alanda 20 farklı detay için yapılan çalışma sonucunda farkların standart sapması 3.0cm olarak belirlenmiştir. Söz konusu alanın geliştirilen sistem ile ölçümü 15 dk sürmüştür. Aynı alanın yersel lazer tarayıcı ile ölçümü için gereken minimum süre 45dk olarak hesaplanmıştır.

Liang *et al.* (2014) de yapılan çalışmada mobil lazer tarama sistemi ile 0.4ha lık ağaçlık alanda yapılan ölçümler sonucunda sistem ile elde edilen ağaç gövde yarıçaplarının doğruluğu 2.36cm olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Pierzchala *et al.* (2018) de yaklaşık 900m<sup>2</sup> lik alanda IMU ve GNSS donanımlarını da içeren bir mobil lidar sistemi ile yapılan ölçüm sonucunda belirlenen ağaç gövde yarıçaplarının doğruluğu 2.38cm olarak hesaplanmış ve sistemin ormanlık alanların haritalarının üretimi için gereken doğruluğu sağladığı ifade edilmiştir. Sepasgozar *et al.* (2014) de ise elde taşınabilir mobil lidar sistemi ile kapalı alanda yapılan çalışma sonrasında farklı boyutlarda detaylar için yapılan kontrollere göre sistemin doğruluğu 3.0cm olarak belirlenmiş ve bu doğruluk değerinin bina modellerinin hızlı bir şekilde çıkarılmasında yeterli olacağı ifade edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen doğruluk değerlerinin literatürdeki çalışmalar ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada geliştirilen sistemde GNSS ve IMU donanımları kullanılmamıştır. Sisteme GNSS in eklenmesi ile global anlamda geo-referanslanmış nokta bulutu verisinin elde edilebileceği öngörülmektedir. Yine ölçme sistemin üç eksendeki anlık dönüklüklerini ölçebilen IMU donanımı ile sistemin desteklenmesi durumunda SLAM algoritmalarındaki belirsizliklerin ortadan kalkacağı ve buna bağlı olarak elde edilen 3 boyutlu nokta bulutunun doğruluğunun artacağı değerlendirilmektedir.

Elde edilen doğruluk değerleri irdelendiğinde sistemin ormanlık alanlarda yapılacak ağaç rölövesi çalışmalarında kullanılabileceği, aynı zamanda süre ve buna bağlı olarak klasik yöntemlere göre maliyet avantajı sağlayacağı görülmektedir. Benzer şekilde kapalı alan ölçümleri sonucunda elde edilen doğruluk değerleri incelendiğinde de sistemin özellikle mimari plan ve kesit belirleme çalışmalarında kullanılabileceği, zaman olarak da klasik yöntemlere göre önemli avantaj sağlayacağı görülmektedir. Açık alanda yapılan test çalışmalarından elde edilen doğruluk değerlerine göre de sistemin halihazır harita üretim çalışmalarında, kadastro yenileme çalışmalarında, arazi modelleme çalışmalarında vb. çalışmalarda zaman açısından klasik yöntemlere sağladığı avantaj ile kullanılabileceği görülmektedir.

#### **Teşekkür**

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi aşamasında sağladığı donanım desteği için BeGeo Yazılım Teknolojileri A.Ş.' ne teşekkür ederiz.

#### **5. Kaynaklar**

- Arp, H. and Tranarg, C., 1982. Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR [Airborne Profile Recorder]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **48**.
- Bailey, T. Nieto, J. Guivant, J. Stevens, M. Nebot, E. 2006. Consistency of the EKF-SLAM Algorithm, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and*

- Systems*, 09-15 October 2006, Beijing, China, doi: 10.1109/IROS.2006.281644.
- Cabo, C. Del Pozo, S. Rodriuez-Gonzalvez, P. Ordonez, C. Gonzalez-Aguilera, D., 2018. Comparing terrestrial laser scanning (TLS) and wearable laser scanning (WLS) for individual tree modeling at plot level. *Remote Sensing*, **10(4)**, 1-16, doi: 10.3390/rs10040540.
- Glennie, C., 2009. Kinematic terrestrial light-detection and ranging system for scanning. *Transportation research record*, **2105(1)**, 135–141, doi: 10.3141/2105-17.
- Gollob, C. Ritter, T. Nothdurft, A., 2020. Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and simultaneous localization and mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, **12(9)**, 1-43, doi: 10.3390/rs12091509.
- Grisetti, G. Kümmerle, R. Stachniss, C. Burgard, W. A., 2010. Tutorial on Graph-Based SLAM. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **2**, 31–43, doi: 10.1109/MITS.2010.939925.
- Harding, D.J. Bufton, J.L. Frawley, J.J., 1994. Satellite laser altimetry of terrestrial topography: vertical accuracy as a function of surface slope, roughness, and cloud cover. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 329-339, doi: 10.1109/36.295048.
- Hickman, G.D. and Hogg, J.E., 1969. Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment*, **1**, 47-58, doi: 10.1016/S0034-4257(69)90088-1
- Koide, K. Miura, J. Menegatti, E., 2019. A portable three-dimensional LIDARbased system for long-term and widearea people behavior measurement. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, **16**, 1-16, doi: 10.1177/1729881419841532.
- Koide, K. Miura, J. Yokozuka, M. Oishi, S. Banno, A. 2020. Interactive 3D Graph SLAM for Map Correction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **6**, 40–47, doi:10.1109/LRA.2020.3028828.
- Lefsky, M.A. Harding, D.J. Keller, M. Cohen, W.B. Carabajal, C.C. Espirito-Santo, F.D.B. Hunter, M.O. Oliveira, R. 2005. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical research letters*, **32**, 1-4, doi: 0.1029/2005GL023971.
- Liang, X. Hyyppa, J. Kukko, A. Kaartinen, H. Jaakkola, A. Yu, X. 2014. The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11**, 1504-1508, doi: 10.1109/LGRS.2013.2297418.
- Mossmann, F. and Stiller, C., 2011. Velodyne SLAM. *In Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 5–9 June 2011, Baden-Baden, Germany.
- Nelson, R. Krabill, W. Tonelli, J., 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 247-267, doi: 10.1016/0034-4257(88)90028-4.
- Nüchter, A. Lingemaan, K. Hertzberg, J. Surmann, H., 2007. 6D SLAM—3D Mapping Outdoor Environments. *Journal of Field Robotics*, **24**, 699–722, doi: 10.1002/rob.20209.
- Pierzchala, M. Giguere, P. Astrup, R., 2018. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM, *Computers and Electronics in Agriculture*, **145**, 217-225, doi: 0.1016/j.compag.2017.12.034.
- Sepasgozar, S. Lim, S. Shirwzhan, S., 2014. Implementation of Rapid As-built Building Information Modeling Using Mobile LiDAR, *Construction Research Congress 2014*, Atlanta, USA, doi: 10.1061/9780784413517.022.
- Sobczak, L. Filus, K. Domanski, A. Domanska, J., 2021. LiDAR Point Cloud Generation for SLAM Algorithm Evaluation. *Sensors*, **21**, 1-21, doi: 10.3390/s21103313.
- Stefano, F.D. Chiappini, S. Gorreja, A. Balestra, M. Pierdicca, R., 2021. Mobile 3D scan LiDAR: a literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, **12(1)**, 2387-2429, doi: 10.1080/19475705.2021.1964617.
- Velodyne LiDAR. 2019. VLP-16 User Manual, <https://velodynelidar.com/wpcontent/uploads/2019/12/63-9243-Rev-E-VLP-16-User-Manual>. (Online, 2019).
- Wang, Z. Huang, S. Dissanayake, G., 2011. Simultaneous Localization and Mapping Exactly Sparse Information Filters, *New Frontiers in Robotics*; World Scientific: Singapore, **3**. ISBN: 978-981-4350-31-0, doi: 10.1142/8145.
- Wang, K. Zhou, J. Zhang, W. Zhang, B., 2021. Mobile LiDAR Scanning System Combined with Canopy Morphology Extracting Methods for Tree Crown Parameters Evaluation in Orchards. *Sensors*, **21**, 1-15, doi:10.3390/s21020339.
- Yang, J.C. Lin, C.J. You, B.Y. Yan, Y.L. Cheng, T.H., 2021. RTLIO: Real-Time LiDAR-Inertial Odometry and Mapping for UAVs. *Sensors*, **21**, 1-21, doi: 10.3390/s21123955.

Zhang, J. Singh, S., 2017. Low-drift and real-time lidar odometry and mapping. *Autonomous Robots*, **41**, 401–416, doi: 10.1007/s10514-016-9548-2.

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055503 (1087-1107)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055503 (1087-1107)

DOI: 10.35414/akufemubid.1178873

Araştırma Makalesi / Research Article

## Kamulaştırmaz El Atma Sorununun Çözülmesinde Düzenleme Ortaklık Payı Yöntemi ve Melikgazi Belediyesi Uygulamaları

H. Mustafa PALANCIOĞLU

Melikgazi Belediyesi, Kayseri

E-posta: palancioglu@hotmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5765-2953>

Geliş Tarihi: 22.09.2022

Kabul Tarihi: 24.10.2022

### Öz

#### Anahtar Kelimeler

Mülkiyet;  
Kamulaştırma;  
Kamulaştırmaz hukukî  
el atma;  
Kamulaştırmaz fiilî el  
atma; Düzenleme  
ortaklık payı

Ülkemizdeki birçok şehir ekonomik ve sosyal nedenlerden dolayı nüfusun kırsal alanlardan kentsel alanlara göç etmesi sebebi ile hızla büyümüştür. Bu nedenle belediyeler şehirlerin hızlı nüfus artışı ile birlikte 1985 yılında yürürlüğe giren 3194 sayılı İmar Kanunu çerçevesinde imar planları yapmıştır. Ancak geniş alanları kaplayan imar planlarının uygulama süreçlerinde belediyeler, kentsel nüfusun ihtiyaç duyduğu yol, park, okul, cami ve sosyal tesis gibi birçok hizmeti vatandaşlara kazandırmak gayesi ile özel mülkiyetteki taşınmazlara kamulaştırma yapmadan el atmak zorunda kalmıştır. Bu makalede günümüzde belediyeler açısından büyük bir malî soruna dönüşen kamulaştırmaz el atma uygulamalarına karşı alternatif bir çözüm aracı olarak 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi çerçevesinde Düzenleme Ortaklık Payı yöntemine ve Melikgazi (Kayseri) Belediyesinin bu bağlamda gerçekleştirdiği çalışmalara değinilmiştir. Makalede mülkiyet hakkı, kamulaştırma, kamulaştırmaz hukukî ve fiilî el atma ile Düzenleme Ortaklık Payı kavramları üzerinde durulduktan sonra Melikgazi Belediyesinin yaptığı Düzenleme Ortaklık Payı uygulamaları anlatılmış, bu uygulamalar sonucunda belediyenin sağladığı malî tasarruf resmî verilerle yansıtılmıştır.

## Development Readjustment Share Method to Solve The Problem of Confiscation Without Expropriation and The Practices of Melikgazi Municipality

### Abstract

#### Keywords

Ownership;  
Expropriation; Legal  
confiscation without  
expropriation; Actual  
confiscation without  
expropriation;  
Development  
readjustment share

Many cities in Turkey have grown rapidly due to the migration of population from rural areas to urban areas because of economic ve social reasons. For this reason, municipalities have made zoning plans within the framework of the Zoning Law No. 3194, which came into force in 1985 with the rapid population growth of the cities. However, in the implementation processes of the zoning plans covering large areas, municipalities had to take possession of privately owned real estate without expropriation in order to provide citizens with many services such as roads, parks, schools, mosques and social facilities needed by urban population. In this article, as an alternative solution tool against practices of confiscation without expropriation, which has turned into a big financial problem for municipalities today, the Development Readjustment Share method within the framework of Article 18 of the Zoning Law No. 3194 and the practices carried out by the Melikgazi (Kayseri) Municipality in this context are mentioned. In the article, after focusing on the concepts of property right, expropriation, legal and actual confiscation without expropriation, and Development Readjustment Share practices made by the Melikgazi Municipality are explained and the financial savings provided by the municipality in this context are reflected with official datas.

## 1. Giriş

Sınırsız bir aynî hak olan mülkiyet, malike (sahibe) o mülkü anayasa ve yasalar çerçevesinde dilediği gibi kullanma, yararlanma ve tasarrufta bulunma hakkını vermektedir. Mülkiyetin temel haklardan olması, mülkiyete yönelik hukuk dışı müdahaleleri kişi hak ve özgürlükleri bağlamında önemli bir sorun haline getirmektedir. Söz gelimi Türkiye’de kamu hizmetlerinin yürütülmesi amacıyla belediyeler de dâhil olmak üzere yetkili kamu kurum ve kuruluşlarınca özel mülkiyette olan taşınmazların kamulaştırılması yüzyıllardır uygulanan hukukî bir yöntem olmakla birlikte idarelerin zaman zaman hukuk dışı yöntemlere de başvurduğu görülmektedir.

İlgili terminolojide ve literatürde “kamulaştırmaz el atma” veya “kamulaştırmaz el koyma” şeklinde adlandırılan bu tür işlemler, mülkiyet hakkının kullanılması açısından önemli sorunlara ve sınırlamalara neden olmaktadır. Bu bağlamda kamu kurum ve kuruluşlarının çeşitli nedenlerle kamulaştırma işlemlerini tamamlamadan veya kamulaştırma sürecini başlatmadan özel mülkiyette olan taşınmazların zilyetliğini elde etme veya irtifak hakkı kurma yoluna gitmesi ya da imar düzenlemeleri ile mülkiyet hakkının kullanılmasına müdahale etmeleri, mülkiyet hakkının süreli veya süresiz olarak kısıtlanması ya da tamamen ortadan kaldırılması gibi durumlara yol açmaktadır.

İdarenin, taşınmaz mülkiyetine el atma şeklindeki müdahalesi, Türk Hukuku’nda “fiilî el atma” ve “hukukî el atma” şeklinde adlandırılmakta ve her bir el atma modeli, farklı yargı kolları tarafından farklı hukukî rejimlere tabi tutulmaktadır. Her iki durumda da idare, hukukun öngördüğü usul ve esasları kullanmaksızın, kanunun verdiği mülkiyetten yoksun bırakabilme yetkisini kötüye kullanarak hukuka aykırı hareket etmek suretiyle mülkiyetten doğan yetkilerin kullanımını imkansızlaştırarak veya aşırı ölçüde güçleştirerek maliki mülkiyetinden yoksun bırakmaktadır (Bakırcı 2021).

Yargıtay Hukuk Genel Kurulu tarafından 1956 yılında alınan bir kararda idarenin gerçekleştirdiği kamulaştırmaz el atma işlemleri hukuka aykırı bulunmuştur. Aynı yıl 6830 sayılı İstimlak Kanunu yürürlüğe sokularak kamulaştırma süreci yasal güvenceye kavuşturulmaya çalışılmışsa da 1961

yılında çıkarılan 221 sayılı Amme Hükmi Şahısları veya Müesseseleri Tarafından Fiilen Amme Hizmetlerine Tahsis Edilmiş Gayrimenkuller Hakkında Kanun ile 6830 sayılı Kanun’dan önce kamulaştırmaz el atma yöntemi ile kamunun mülkiyetine geçen taşınmazlar “kamulaştırılmış” sayılmıştır.

Mülkiyet hakkının kullanılmasını bu kapsamda kısıtlayan 6830 sayılı Kanun’un uygulanması sürecinde yaşanan diğer birçok sorunun da etkisiyle yeni bir kamulaştırma kanunu hazırlanarak yürürlüğe sokulmuştur. Bu kapsamda 1983 yılında yürürlüğe giren 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu ile kamulaştırmaz el atmalara karşı hukukî hak arama süresinin yirmi yıl ile sınırlandırılması ise mülkiyet hakkının kullanılmasını engelleyici nitelikte olmuştur. Bu nedenle söz konusu hükmün Anayasa Mahkemesince 2003 yılında iptal edilmesi, 1956 yılından itibaren yapılan kamulaştırmaz el atma işlemlerinin dava edilmesine imkân vermiştir.

Mülk sahipleri bu bağlamda “kamulaştırmaz el atmanın önlenmesi davası”, “kamulaştırmaz el atılan taşınmaz bedelinin tespiti davası”, “kamulaştırmaz el atılan taşınmaz bedelinin tahsili davası”, “tazminat davası” ve “ecrimisil davası” açabilmekte, sonraki yıllarda yapılan anayasa değişikliği ile Anayasa Mahkemesine bireysel başvuru yapılabilmekte, ayrıca Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi gereği Avrupa İnsan Hakları Mahkemesine bireysel başvuruda da bulunulabilmektedir (Göktepe 2010, Mamal 2019, Karaca 2018, Coşkun 2019, Çetintaş 2019, Yıldırım 2017).

Mülkiyet sahiplerinin hak arama yollarının önünde hukukî engel kalmaması, geçmiş yıllarda yapılan kamulaştırmaz el atmalar dolayısıyla diğer birçok kamu kurumu gibi belediyelerin ve bağlı kuruluşlarının da çok sayıda dava ile karşı karşıya kalmalarına neden olmuştur. Sözgelimi 2007 yılında İstanbul Su Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (İSKİ) aleyhine bu yönde açılan bir davada Anayasa Mahkemesi, 1974 yılında kamulaştırma işlemi tamamlanmadan el atılan bir taşınmaz hakkında Yargıtay Hukuk Genel Kurulundan farklı olarak “kamulaştırmaz el atma” kararı alarak mülkiyet hakkının ihlal edildiğine hükmetmiştir (Anayasa Mahkemesi 2014a).

Benzer bir durumla bu defa kamulaştırmaz hukukî el atma olarak Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) Havza Koruma Yönetmeliği'nin uygulanmasında karşılaşmıştır. Sapanca Gölü kenarında yer alan ve özel hukuk kişilerine ait olan birçok gayrimenkul, Sapanca Gölü mutlak koruma ve kısa mesafeli koruma kuşaklarının içine dâhil edilmiştir. Alınan bu kararların gereği olan kamulaştırma işlemlerinin yasal süresi içinde yapılmaması dolayısıyla mağdur olan mülk sahipleri SASKİ aleyhine kamulaştırmaz el atma davası açmıştır (Duran 2020).

Bir diğer davada ise davacı kişiler Anayasa Mahkemesine başvurarak kamulaştırmaz el atılan taşınmaz bedelinin ödenmesi davası sonunda yetkili mahkemece hükmedilen bedelin kendilerine ödenmediğini, belediye aleyhine yaptıkları icra takiplerinin sonuçsuz kaldığını belirtmiş, mülkiyet ve adil yargılanma haklarının ihlal edildiğini ileri sürerek tazminat talep etmişlerdir. Anayasa Mahkemesi konuya ilişkin aldığı kararda başvuruya konu yargılama sonunda verilen kararların icra edilmediği ve bu hususun başvuruçuların mülkiyet ve adil yargılanma haklarını ihlal ettiği gözetilerek, hukuka, adalete ve mahkemeye güven ilkesinin gördüğü zararın devam etmesinin önlenmesi amacıyla, mahkeme kararlarının mümkün olan en kısa sürede yerine getirilmesine hükmetmiştir (Anayasa Mahkemesi 2014).

Yine kamulaştırmaz el atma dolayısıyla Anayasa Mahkemesine yapılan bireysel bir başvuruda davacı kişi, maliki olduğu taşınmaza belediye tarafından 2005 yılında kamulaştırmaz fiilen el atılarak yol ve kaldırım yapılması ve açtığı tazminat davasında lehine hükmedilen tazminatın büyük kısmının kendisine ödenmemesi nedenleriyle mülkiyet ve adil yargılanma haklarının ihlal edildiğini ileri sürmüştür. Anayasa Mahkemesi bu konuda aldığı kararda başvuruçunun Anayasa'nın 35. ve 36. maddelerinde güvence altına alınan mülkiyet ve adil yargılanma hakkının ihlal edildiğine ve başvuruçuya tazminat ödenmesine hükmetmiştir (Anayasa Mahkemesi 2014b). Örnekleri çoğaltmak mümkündür.

Mülk sahiplerince açılan davaların idareleri ağır malî yük altına sokması, belediyeleri ve bağlı kuruluşlarını alternatif çözüm yolları geliştirmeye yöneltmiştir.

Kayseri'nin hem demografik hem de ekonomik açıdan en büyük ilçe belediyesi olan Melikgazi Belediyesi de geçmiş dönemlerde yapılan kamulaştırmaz fiilî el atmaların neden olduğu sorunlara karşı 3194 sayılı İmar Kanunu'nda yer alan Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasını etkili bir araç olarak kullanarak belediyeyi büyük bir malî yükten kurtarmıştır. Belediyelerin İmar Kanunu çerçevesinde yaptığı bir imar uygulaması olan Düzenleme Ortaklık Payı ile kamulaştırmaz fiilî el atmaların önüne geçilerek hem mülk sahiplerinin mağdur duruma düşmesi engellenebilmekte hem de belediyeler ağır malî yüklerden kurtulabilmektedir. Dolayısıyla bu makalede "kamulaştırmaz el atma" sorununun çözülmesinde alternatif bir yöntem olarak Düzenleme Ortaklık Payı yöntemi incelenmiş ve Melikgazi Belediyesi'nin bu kapsamda gerçekleştirdiği uygulamalar ele alınmıştır.

Toplam beş bölümden oluşan makalenin birinci bölümünde mülkiyet hakkının kavramının tanımı, kapsamı ve hukukî boyutu üzerinde durulmuştur. İkinci bölümde kamulaştırma kavramının tanımı, kamulaştırmanın dayandığı ilkeler ve kamulaştırma süreci açıklanmıştır. Üçüncü bölümde kamulaştırmaz el atma kavramının tanımı ve kamulaştırmaz el atma türleri, kamulaştırmaz el atmanın hukukî ve yargısal boyutu ile kamulaştırmaz el atma davalarında idareler açısından yaşanan sorunlara değinilmiştir. Dördüncü bölümde Düzenleme Ortaklık Payı yönteminin tanımı ve ilgili kavramlar, Düzenleme Ortaklık

Payı'na konu olan hizmetlerin öncelik sırası, Düzenleme Ortaklık Payı'nın uygulanması süreci ve bu süreçte yaşanan sorunlar hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde Melikgazi ilçesi kısaca tanıtılmış ve Melikgazi Belediyesinde yürütülen Düzenleme Ortaklık Payı uygulamaları resmî sayısal veriler üzerinden ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

## **2. Materyal ve Metot**

Yürürlükteki mevzuat düzenlemeleri ve yargı kararları ile bu alanlarda yapılmış olan akademik çalışmalar ve Melikgazi Belediyesinin resmî verileri materyal olarak kullanılmıştır. Yöntem olarak literatür taraması yapılarak teorik çerçeve

oluşturulmuş, yasal ve yargısal düzenlemeler incelenerek hukukî boyut somutlaştırılmış ve Melikgazi Belediyesi uygulamaları resmî verilere dayalı olarak incelenmiştir.

### **3. Bulgular ve Tartışma**

#### **3.1. Mülkiyet Hakkının Tanımı ve Kapsamı**

Mülkiyet kavramı *“bir şeye sahip olmak, bir nesne üzerinde tek başına ve doğrudan hâkimiyet kurmak; birinin tasarrufu altında bulunan şey, gelir getiren taşınmaz”* gibi anlamlara sahiptir. Bir mülk edinmek için emek harcıyıp tasarrufta bulunmak gerektiğinden mülkiyet kavramı, sahip olmanın da ötesinde kuvvet ve hâkimiyet kavramlarının doğal bir sonucu olarak *“hak”* kavramını doğurur. (Güriz 2019, Develioğlu 2006, Etgü 2009)

Hak kavramı, kişilere hukuk düzeni tarafından tanınan ve korunan menfaatler (Gözler 2019) şeklinde tanımlanmaktadır. Kişiler bu menfaatlere dayanarak bir mal veya hizmeti ya da edimi talep etme yetkisini de haizdir. Bir haktan bahsedebilmek için her şeyden önce ortada bu hakkın sahibi olabilecek bir *“kişi”*nin bulunması gerekir ki mülkiyet hakkında bu kişiden kast edilen maliktir. Hakkın özü bir menfaatten oluştuğu için mülkiyet hakkının, malike tasarruflarda bulunma imkânını vermesi gerekir. Hukuk düzeni içinde kullanılabilen mutlak ve aynî bir hak olan mülkiyet hakkının son unsuru ise onun hukuk düzeni tarafından tanınması ve korunmasıdır. (Yılmaz 2020, Avcı 2014).

#### **3.2. Mülkiyet Hakkının Hukukî Boyutu**

Mülkiyet hakkı uluslararası hukukî belgelerde, anayasada ve ulusal kanunlarda tanımlanarak güvence altına alınmıştır. Söz gelimi Birleşmiş Milletler İnsan Hakları Evrensel Beyannamesi'ne göre (Md. 17); *“Her şahıs ... mülk sahibi olma hakkını haizdir. Hiç kimse keyfi olarak ... mülkünden mahrum edilemez.”* (Birleşmiş Milletler 1948) Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesi'nin 1 No'lu Protokolü'ne göre (Md. 1); *“Her gerçek ve tüzel kişinin, mal ve mülk dokunulmazlığına saygı gösterilmesini isteme hakkı vardır. Bir kimse, ancak kamu yararı sebebiyle ve yasada öngörülen koşullara ve uluslararası hukukun genel ilkelerine uygun olarak mal ve mülkünden yoksun bırakılabilir.”* (Avrupa Konseyi 1952)

1982 Anayasası'na göre (Md. 35); *“Herkes mülkiyet ve miras haklarına sahiptir.”* (Türkiye Cumhuriyeti Anayasası 1982). Türk Medenî Kanunu'na göre (Md. 683); *“Bir şeye malik olan kimse, hukuk düzeninin sınırları içinde, o şey üzerinde dilediği gibi kullanma, yararlanma ve tasarrufta bulunma yetkisine sahiptir.”* (Türk Medenî Kanunu 2001).

Hem uluslararası hem de ulusal hukukta her bireye mülkiyet hakkı tanınmış, mülkün dokunulmazlığı kural olarak teyit edilmiş, ancak bu dokunulmazlığın kamu yararının sağlanması amacıyla kanunlara ve uluslararası hukuka uygun olarak sınırlandırılabilceği hükme bağlanmıştır. (Cars-Frisk 2019, Gemalmaz 2018) Ulusal ve uluslararası hukukî düzenlemelerin öngördüğü sınırlama araçlarından biri ise kamulaştırmadır.

#### **3.3. Kamulaştırma Kavramının Tanımı ve Kamulaştırmanın Dayandığı İlkeler**

Mülkiyet hakkının bir bedel karşılığında ortadan kaldırılması sonucu doğuran kamulaştırma işlemi; devlet ve kamu tüzel kişilerinin, kamu yararının gerektirdiği hallerde gerçek karşılıklarını peşin ödemek şartıyla özel mülkiyette bulunan taşınmazların tamamının veya bir kısmının mülkiyetini, hukuka uygun yöntemler kullanarak devralmasıdır. (Gözler ve Kaplan 2020; Uysal 2015; Çoruhlu, Uzun ve Yıldız 2019)

1982 Anayasası'na göre (Md. 46); *“Devlet ve kamu tüzel kişileri; kamu yararının gerektirdiği hallerde, gerçek karşılıklarını peşin ödemek şartıyla, özel mülkiyette bulunan taşınmaz malların tamamını veya bir kısmını, kanunla gösterilen esas ve usullere göre, kamulaştırmaya ve bunlar üzerinde idarî irtifaklar kurmaya yetkilidir.”* (Türkiye Cumhuriyeti Anayasası 1982)

Türkiye'de yetkili kamu tüzel kişilerinca gerçekleştirilen kamulaştırma işlemlerinin dayandığı temel ilkeler şöyle sıralanabilir: (Gözler ve Kaplan 2020)

1. Kamulaştırma, sadece yetkili kamu tüzel kişileri tarafından yapılabilir.
2. Yetkili kamu tüzel kişileri istisnaî haller hariç olmak üzere sadece kendi coğrafi yetki sahaları içinde ve mevzuatla verilen görevleri yerine getirmek için kamulaştırma yapabilir.

3. Kamu tüzel kişileri, ilgili kanunlarda yetki verilmişse kamu hizmeti imtiyazına sahip olan özel hukuk gerçek ve tüzel kişileri lehine kamulaştırma yapabilir.

4. Kamulaştırma, kamu yararı amacıyla yapılır.

5. Kamulaştırma, ancak özel mülkiyette bulunan taşınmazlar, kaynaklar ve irtifak haklarına yönelik yapılabilir.

6. Kamu yararı, taşınmazın bir bölümünün kamulaştırılmasıyla sağlanabiliyorsa taşınmazın tamamının kamulaştırılması hukuka aykırıdır.

7. Kamulaştırma, malın gerçek karşılığının peşin (nakit) olarak ödenmesiyle yapılır.

8. Kamulaştırma, kanunda gösterilen esas ve usullere göre yapılır.

9. Yeterli ödenek temin edilmeden kamulaştırma işlemine başlanamaz.

Taşınmazın bir bölümünün kamulaştırılması, terminolojide *"kısımî kamulaştırma"* olarak adlandırılmaktadır. Kısımî kamulaştırma dolayısıyla kamulaştırılan kısmın değeri düşmüş ise kamulaştırma bedeline bu değer düşüşünü karşılayacak bir bedel ilave edilir. Değeri artmış ise kamulaştırılan kısmın kamulaştırma bedeli üzerinden indirim yapılır. Kısımî kamulaştırmadan dolayı taşınmazın diğer kısmı yararlanılamaz veya kullanılamaz hale gelmişse mal sahibi bu kısmın da kamulaştırılmasını talep etme hakkına sahiptir. Bu durumda idare, kamulaştırılmayan kısmı da kamulaştırmak mecburiyetindedir. (Gözler ve Kaplan 2020)

Kamulaştırma Kanunu'nda *"acele kamulaştırma"* işlemi de düzenlenmiştir. Buna göre (Md. 27); *"... aceleliğine Cumhurbaşkanınca karar alınacak hallerde veya özel kanunlarla öngörülen olağanüstü durumlarda gerekli olan taşınmaz malların kamulaştırılmasında kıymet takdiri dışındaki işlemler sonradan tamamlanmak üzere ilgili idarenin istemi ile mahkemece yedi gün içinde o taşınmaz ... mala el konulabilir."* (Kamulaştırma Kanunu 1983).

### **3.4. Kamulaştırma Süreci**

Kamulaştırma Kanunu'na göre (Md. 3-8); kamulaştırma esas itibarıyla yedi aşamadan oluşur: (Kamulaştırma Kanunu 1983)

1. Kamulaştırma ödeneğinin temin edilmesi.

2. Kamulaştırılacak taşınmazın tespit edilerek kamulaştırma kararının alınması.

3. Kamu yararı kararının alınması.

4. İdarenin, tapu siciline şerh düşülmesini tapu müdürlüğünden talep etmesi.

5. İdarenin ve malikin kamulaştırma bedeli üzerinde anlaşması.

6. Malikin, taşınmazı idareye satmasıyla mülkiyetin idareye geçmesi.

7. Kamulaştırma bedelinin hak sahibine (eski malike) ödenmesi.

Kamulaştırma Kanunu'na göre (Md. 10-19); kamulaştırma bedeli üzerinde anlaşamaması halinde, idare adlî yargıya başvurur. Bu durumda süreç şöyle işler (Kamulaştırma Kanunu 1983):

1. İdarenin, asliye hukuk mahkemesinde bedel tespiti ve tescili davası açması.

2. Mahkemenin, taşınmazın bedeli konusunda tarafları anlaşmaya davet etmesi.

3. Tarafların anlaşması.

4. İdarenin, taşınmazın bedelini malikin banka hesabına yatırarak banka dekontunu mahkemeye teslim etmesi.

5. Mahkemenin, taşınmazın idare adına tescil edilmesi kararını alması.

6. Taşınmazın, tapu müdürlüğünce idare adına tescil edilmesi.

Yine Kamulaştırma Kanunu'na göre (Md. 15,18); malikin idarî yargıda iptal davası açması halinde asliye hukuk mahkemesi idarî yargı kararının kesinleşmesini bekler. Kararın malik lehine olması halinde asliye hukuk mahkemesi bedel tespit ve tescil davasını reddeder ve böylece kamulaştırma işlemi iptal olur. İdarî yargıdan idarenin lehine karar çıkması halinde asliye hukuk mahkemesindeki süreç devam eder. Tarafların kamulaştırma bedeli üzerinde anlaşamaması halinde mahkeme kararı ile bilirkişi tayin edilir, keşif yaptırılır ve kamulaştırma bedeli hâkim tarafından belirlenir. (Kamulaştırma Kanunu 1983)

Malikin kabul etmesi halinde idare kendine ait olan fakat kamu hizmetine tahsisli olmayan taşınmazların mülkiyetini, kamulaştırma bedelinin kısmen veya tamamen karşılanması amacıyla malike devredebilir. Bu durumda Kamulaştırma Kanunu'na göre (Md. 26); *"Kamulaştırma bedelinin yerine verilecek taşınmaz malın değeri, idarenin ihale"*



*komisyonunca, yoksa bu amaçla kuracağı bir komisyonca tespit edilir. Taşınmaz mal bedelleri arasındaki fark taraflarca nakit olarak karşılır. Ancak, idarenin vereceği taşınmaz malın değeri, kamulaştırma bedelinin yüzde yüz yirmisini aşamaz.” (Kamulaştırma Kanunu 1983)*

Kamulaştırma Kanunu’na göre (Md. 21); *“İdare kamulaştırmanın her safhasında kamulaştırmadan tek taraflı olarak kısmen veya tamamen vazgeçebilir. Dava sırasında vazgeçme halinde dava giderleri ile harç, harcanan emek ve işin önemi gözetilerek mahkemece maktuen takdir olunacak avukatlık ücreti idareye yükletilir. ... Taşınmaz malı geri almayı kabul etmeyen mal sahibi veya mirasçılarının 23 üncü maddeye göre geri alma hakları da düşer. ... Bu madde hükümleri, kamulaştırmanın kesinleşmesi tarihinden itibaren beş yıl geçmiş olması halinde uygulanmaz.” (Kamulaştırma Kanunu 1983)* Fakat idare, kamulaştırma işlemi tamamlanana kadar kamulaştırmadan tek taraflı vazgeçebilir. Nitekim Yargıtay İkinci Hukuk Dairesi *“idare de istemediği halde mülk edinmeye zorlanamaz.” (Yargıtay İkinci Hukuk Dairesi 1975)* yönünde karar almıştır. Kamulaştırma işlemi tamamlandıktan sonra ise ancak malik ile anlaşarak kamulaştırmadan vazgeçilebilir (Bayram 2018).

### **3.5. Kamulaştırmaz El Atma Kavramının Tanımı ve Kamulaştırmaz El Atma Türleri**

Yasalarda herhangi bir tanımı bulunmayan kamulaştırmaz el atma kavramı, Yargıtay’ın 1956 yılında aldığı içtihadı birleştirme kararı ile Türk hukukuna girmiştir. Özel mülkiyette olan bir taşınmazın zilyetliğine; kamulaştırma işlemi yapılmadan veya kamulaştırma işlemi tamamlanmadan ya da imar planı, arazi ve arsa düzenlemesi yapılarak yahut hukuken “yok” hükmündeki bir idarî işleme dayanarak veya mülkiyetten kaynaklanan haklar, mağduriyet doğuracak şekilde daimî ya da uzun süreli sınırlandırılarak yetkili idare tarafından bir bedel ödenmeksizin kasıtlı olarak el konulması şeklinde tanımlanabilir. Bu durumda kamulaştırmaz el atmanın beş farklı türde ortaya çıktığı söylenebilir: (Kamulaştırma Kanunu 1983, Anayasa Mahkemesi

2013, Çabri 2011, Gözler ve Kaplan 2020, Şahinaz 2010, Böke 2006, Yalçınduran 2015, Tural 2016, Uysal 2015).

1. Kamulaştırma işlemi yapılmadan fiilen el atma.
2. Kamulaştırma işlemi tamamlanmadan fiilen el atma.
3. Hukuken “yok” hükmündeki bir idarî işleme dayanarak fiilen el atma.
4. İmar Kanunu’nun 18’inci maddesine dayanarak taşınmazın yüzde 45’ine kadar “Düzenleme Ortaklık Payı” alınması yoluyla hukuken el atma.
5. Özel mülkiyetteki taşınmazı imar planında ulaşım, yeşil alan, okul, sağlık tesisi, ibadethane gibi bir kamu hizmetine tahsis etmekle birlikte gerekli kamulaştırma işleminin beş yıl içinde yapılmaması dolayısıyla mülkiyet hakkını mağduriyet doğuracak şekilde sınırlandırarak hukuken el atma.

Görüldüğü üzere kamulaştırmaz el atma fiilî ve hukukî olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. El atma; kamulaştırmaya yetkili idare tarafından kamulaştırma işlemi yapılmadan veya kamulaştırma işlemi tamamlanmadan ya da hukuken “yok” hükmündeki bir idarî işleme dayanarak gerçekleştirilmişse bu durumda *“kamulaştırmaz fiilî el atma”* işlemi söz konusudur. El atma işlemi, İmar Kanunu’na dayanarak yapılan imar plan ve düzenlemeleri ile 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu ve diğer bazı kanunlara dayanarak yapılan işlemler sonucunda mülkiyet hakkının, mağduriyet doğuracak şekilde sınırlandırılmasıyla gerçekleşmişse bu durumda da *“kamulaştırmaz hukukî el atma”* işlemi söz konusudur. Fiilî el atma, idarenin fiilî müdahalesi iken hukukî el atma, idarenin hukuka uygun bir şekilde almış olduğu bir kararın doğrudan veya dolaylı bir sonucudur. Hukukî el atma, kamu tarafından yapılması gereken eylemlerin kanunlarda öngörülen süreler içinde gerçekleştirilememesinin bir sonucu olarak mülkiyet hakkında ortaya çıkan kısıtlılık durumunun uzun yıllar netleştirilememesi ile oluşmaktadır. Mülkiyet hakkından yoksun bırakma biçimindeki bu kısıtlamalar, hedeflenen kamu yararı ile malikin bireysel yararı arasında gözetilmesi gereken adil dengelyi bozmaktadır. Aslında hukukî el atmanın oluşmasının temel nedeni, imar planlarının uzun yıllar gerçekleştirilememesidir (Günday 2011, Karaca

2018, Bayram 2018, Yalçınduran 2017, Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu 1983).

Bilindiği gibi 3194 sayılı İmar Kanunu'na göre (Md. 10), *"Belediyeler; imar planlarının yürürlüğe girmesinden en geç 3 ay içinde, bu planı tatbik etmek üzere 5 yıllık imar programlarını hazırlar. ... Beş yıllık imar programları sınırları içinde kalan alanlardaki kamu hizmet tesislerine tahsis edilmiş olan yerleri, ilgili kamu kuruluşları bu program süresi içinde kamulaştırırlar."* (İmar Kanunu 1985) Ancak, imar programlarının uygulanmaması veya uzun yıllara yayılarak uygulanması halinde, kamu hizmet tesisleri için tahsis edilen taşınmazların sahiplerinin mülkiyet hakkı, mağduriyet doğuracak şekilde kısıtlanmış olmaktadır. Mülkiyet hakkından yoksun bırakma şeklindeki bu kısıtlamalar, hedeflenen kamu yararı ile malikin bireysel yararı arasında gözetilmesi gereken adil dengeyi bozmaktadır. İmar planı ile kamu hizmetine ayrılmış ya da tasarruf hakkı kısıtlanmış taşınmazların uzun süre kamulaştırılmamasının yanı sıra imar hakkı ve takas gibi yollara da başvurulmaması nedeniyle *"kamulaştırmaz el atma"* durumu oluşmaktadır (Yılmaz 2020).

Yargıtay Hukuk Genel Kurulu'nun 2010 yılında aldığı bir kararda; *"uzun yıllar programa alınmayan imar planının fiilen hayata geçirilmemesi nedeniyle kamulaştırma ya da takas cihetine gitmeyen idarece, pasif ve suskun kalınmak ve işlem tesis edilmemek suretiyle taşınmaza müdahale edildiği; bu haliyle idarenin eyleminin kamulaştırmaz el koyma niteliğinde olduğu, ... taşınmazın malikinin mülkiyet hakkının hukuksal bir nedene dayanılmadan idarece engellendiği ... ve 4721 sayılı Türk Medeni Kanunu'nun 683'üncü maddesinde malike, hukuka aykırı olarak müdahalenin önlenmesini isteme hakkı tanındığı"* hükmünde bulunulmuştur (Yargıtay Hukuk Genel Kurulu 2010). Mülkiyet hakkının hukuka aykırı bir şekilde engellenmesi gibi durumların ortaya çıkmasını önlemek amacıyla 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu'na eklenen bir madde ile (Ek Madde 1) beş yıllık süre içinde imar programları veya imar uygulamaları yapılmayan ve kamulaştırılmayan taşınmazlara dair mülkiyet hakkının kullanılmasına engel teşkil eden kısıtlılığın kaldırılması için imar

planının değiştirileceği hükme bağlanmıştır (Kamulaştırma Kanunu 1983).

Kamulaştırmaz el atmadan söz edilebilmesi için bazı şartların oluşması gerekir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Tutal 2016).

1. El atılan taşınmaz özel hukuk kişisine ait olmalıdır.
2. Taşınmaza el atan idare, kamulaştırma yetkisine sahip olmalıdır.
3. El atma işleme, ilgili idarenin görev alanına giren bir konuda olmalıdır.
4. El atma işlemi kamu yararı gerekçesi ile yapılmış olmalıdır.
5. El atma işleminin sonucunda mülkiyet hakkı uzun süreli veya daimî olarak kısıtlanmış veya engellenmiş olmalıdır.
6. Taşınmazın bedeli kamulaştırmaya yetkili idare tarafından özel hukuk kişisine ödenmiş olmamalıdır. Özetlemek gerekirse kamulaştırmaz el atmanın oluşabilmesi için el atma veya mülkiyeti kısıtlama işleminin, kamulaştırma yetkisine sahip olan bir idare tarafından, görev alanına giren bir konuda, kamu yararını sağlamak amacıyla ve daimî veya uzun süreli olarak yapılması gerekir. Dolayısıyla bir taşınmaza herhangi bir kamu yatırımının yapılması esnasında komşu taşınmazın idare tarafından geçici olarak kullanılması gibi kısa süreli ve geçici durumlar kamulaştırmaz el atma kapsamına girmemektedir. Ayrıca, taşınmazın tapu kaydına konulan kamulaştırma şerhi, özel parselasyon sonunda malikin muvafakati ile kamu hizmetleri için ayrılmış olan kısmı, malikin taşınmazın bir bölümünü yapı izni karşılığında bedelsiz terk etmesi ve acele kamulaştırma uygulaması da kamulaştırmaz el atma kapsamına girmemektedir (Karadağ t.b., Karaca 2018).

Anayasa Mahkemesi'ne göre kamulaştırmaz el atma işleminin, özel kişilerin haksız fiil teşkil eden eylemlerinden hiçbir farkı bulunmamakta, bu nedenle bu tip eylemlerden doğan zararlar özel kişilerin haksız fiilinden doğan zararlarda olduğu gibi adlî yargıda dava konusu edilmelidir (Anayasa Mahkemesi 2013). Ancak, Uyuşmazlık Mahkemesi, kamulaştırmaz hukukî el atmanın 3194 sayılı İmar Kanunu uyarınca kamu gücü kullanılarak yapılan imar planına istinaden gerçekleştiğine ve dolayısıyla kamulaştırmaz hukukî el atma davalarının idarî

yargıda görülmesi gerektiğine hükmetmiştir (Uyuşmazlık Mahkemesi, 2021).

### **3.6. Kamulaştırmaz El Atmanın Hukukî ve Yargısal Boyutu**

Yargıtay söz konusu kararda “usulüne uygun olarak kamulaştırma işlemi yapılmaksızın gayrimenkulü yola katılan şahsın kamu tüzel kişisi aleyhine men’i müdahale davası açmaya ve bu konuda zaman aşımı olmadığına, ancak dilerse bu fiilî duruma razı olarak mülkiyet hakkının kamu tüzel kişisine devrine karşılık gayrimenkulün bedelinin tahsilini dava etmeye hakkının olduğuna hükmetmiştir. (Yargıtay İçtihadı Birleştirme Genel Kurulu 1956) Yargıtay’ın söz konusu kararı, kamu mallarının korunması ve kamu hizmetlerinin sürekliliği ilkelerini zayıflattığı gerekçesiyle eleştirilmiştir (Kaplan 2021). Muhtemelen bu eleştirilerinde etkisiyle Cumhuriyet Dönemi’nin ilk müstakil kamulaştırma kanunu olan 6830 sayılı İstimlak Kanunu 9 Ekim 1956 tarihinde yürürlüğe girmiştir. 221 sayılı Amme Hükûmî Şahısları veya Müesseseleri Tarafından Fiilen Amme Hizmetlerine Tahsis Edilmiş Gayrimenkuller Hakkında Kanun 12 Ocak 1961 tarihinde yürürlüğe girerek 6830 sayılı Kanun’dan önce kamulaştırmaz el atma ile kamu hizmetlerine tahsis edilen taşınmazları “kamulaştırılmış” saymış (Md. 1), taşınmazın bedelini dava etme hakkını, 221 sayılı Kanun’un yürürlüğe girdiği tarihten itibaren iki sene ile sınırlandırmış (Md. 4) ve el atmanın tazminat davasına konu edilemeyeceğini hükme bağlamıştır (Md. 3).

1983 yılında çıkarılan 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu’nun 38’inci maddesinde yer alan “Kamulaştırma yapılmış, ancak işlemleri tamamlanmamış veya kamulaştırma hiç yapılmamış iken kamu hizmetine ayrılarak veya kamu yararına yönelik bir ihtiyaca tahsis edilerek üzerinde tesis yapılan taşınmaz ... mal ile ilgili her türlü dava hakkı yirmi yıl geçmekle düşer. Bu süre taşınmaz mala el koyma tarihinden başlar.” hükmü Anayasa Mahkemesi’nce 2003 yılında, 221 sayılı Kanun’un 3’üncü maddesinde yer alan ve söz konusu taşınmazlar hakkında tazminat davası açılmayacağına dair hüküm ise 2004 yılında iptal edilmiştir (Anayasa Mahkemesi 2002, 2004). Ancak,

söz konusu dönemde kamulaştırmaz el atılan taşınmazlar, 221 sayılı Kanun’la “kamulaştırılmış” sayıldığı ve bu hüküm 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu’nca da (Geçici Madde 4) benimsendiği için bu tür taşınmazlara yönelik olarak el atmanın önlenmesi davası açılmamaktadır.

2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu’na göre; 6830 sayılı Kanun’un yürürlüğe girdiği 9.10.1956 tarihi ile 2942 sayılı Kanun’un yürürlüğe girdiği 4.11.1983 tarihi arasında gerçekleştirilen kamulaştırmaz fiilî el atmalara karşı el atmanın önlenmesi (müdahalenin men’i), bedel, ecrimisil veya tazminat davaları; hukukî el atmalara karşı ise tazminat veya bedel talep davaları açılabilir. Bunlardan el atmanın önlenmesi (müdahalenin men’i), bedel, ecrimisil ve tazminat davaları adlî yargıda, imar planının iptali ve tam yargı davaları idarî yargıda açılabilir. El atmanın önlenmesi ve bedel davalarında dava açma süresinde herhangi bir sınır bulunmazken tazminat davasında Türk Borçlar Kanunu’nun 72’nci maddesindeki “Tazminat istemi, zarar görenin zararı ve tazminat yükümlüsünü öğrendiği tarihten başlayarak iki yılın ve her halde fiilin işlendiği tarihten başlayarak on yılın geçmesiyle zamanaşımına uğrar.” (Türk Borçlar Kanunu 2011) hükmüne istinaden iki ve on yıl ile sınırlıdır. Ecrimisil davalarında ise beş yıl ile sınırlıdır. (Karaca 2018, Uysal 2015)

İdarenin kamulaştırmaz el atma uygulamasından vazgeçmesi halinde taşınmaz mevzuata uygun olarak malike iade edilir. Eğer taşınmaz üzerinde bir kamu hizmet tesisi varsa veya yol gibi bir yatırım varsa bunlar tamamen kaldırılır ve taşınmaz eski haline dönüştürülerek malike iade edilir. Tesisin veya yatırımın kaldırılması halinde bile taşınmaz eski haline dönemiyorsa veya malik tarafından eskisi gibi kullanılacak duruma gelemiyorsa bu durumda kamulaştırmaz el atmanın devam ettiği kabul edilmektedir (Böke 2006).

### **3.7. Kamulaştırmaz El Atma Davalarında İdareler Açısından Yaşanan Sorunlar**

Kamulaştırmaz el atma davalarında şu tür sorunların varlığından söz edilebilir: (Marmara Belediyeler Birliği 2018, Bayram 2018)

1. Bilirkişi olarak atanan bazı kişilerin imar mevzuatı, şehir planlaması, arsa / arazi rayiçleri ve kamulaştırma mevzuatına dair bilgilerinin ve meslekî tecrübelerinin yeterliliği konusunda sorunlar yaşanmaktadır. Dolayısıyla söz konusu kişiler tarafından hazırlanan raporlarda da önemli sorunlar bulunmaktadır.
2. Gayrimenkul değerlendirme uzmanlarının raporları teknik verilerden uzak ve değer odaklı olabilmektedir.
3. Bedel tespiti ve artırımı davaları için kanunda belirlenmiş olan 4 aylık süre çok kısadır. Bedel tespiti için açılan davanın 4 ay içinde bitirilememesi halinde dördüncü aydan karar tarihine kadar faiz işletilmektedir. Davalar 4 ay süresince bitirilemediğinden idareler faiz yükü altına girmektedir.
4. Bedel tespit ve tescil davaları ile kamulaştırmaz el atma davaları açıldığı anda mahkemeye bildirilen tapu kaydında dava sürecinde değişiklikler olabilmektedir. Örneğin, davacının bu süreçte taşınmazı satması halinde mülkiyet el değiştirmekte ve ilgili mahkemeler bazen zamanında bilgilendirilmemektedir. Ayrıca, tapu ve kadastro müdürlüklerince taşınmazın tapu bilgilerinde yapılan çeşitli düzeltmeler de mahkemeye bazen vaktinde bildirilmemektedir. Sonuçta ilamda yazılı bilgilerle örtüşmeyen tapu bilgileri nedeniyle tescilin mümkün olmadığı durumlar ortaya çıkmaktadır.
5. Dava esnasında davaya konu olan taşınmazın satışına engel bir hükmün Kamulaştırma Kanunu'nda bulunmaması dolayısıyla söz konusu taşınmazın dava devam ederken satılması mümkün olabilmektedir.
6. Kamulaştırma Kanunu ile getirilen haciz yasağı hakkındaki uygulamalarda 1983 yılı öncesi ve sonrası arasında ayırım yapılmaktadır. Dolayısıyla 1983 sonrası el atmalarda haciz yasağı dikkate alınmamaktadır.
7. İcra işlemleri mahkeme kararı kesinleşmeden başlatıldığında belediyeler büyük icra cezaları ile karşılaşmaktadır. İcra işlemi uygulanırken belediye mallarının haczedilmesi halinde haczin kaldırılması 4 ile 8 aylık süreyi bulmaktadır. Bu durum belediyeyi malî anlamda sıkıntıya sokmaktadır.
8. İmar planlarında ibadethane, eğitim ve sağlık tesisi gibi başka kamu kurumlarının yetkisine

birakılan parseller için bile belediye aleyhine kamulaştırmaz el atma davaları açılmakta ve mahkemeler imar uygulamasının zamanında yapılmadığı gerekçesi ile belediyeleri sorumlu tutabilmektedir.

9. Arşiv planları gereğince kamulaştırma yazışma dosyalarının beş yıl boyunca birim arşivinde, beş yıl boyunca da kurum arşivinde muhafaza edilmesi gerekmektedir. Söz konusu sürelerin yetersizliği sonucunda, kamulaştırma evrakları tahribata uğramakta veya zayi olmaktadır.

10. Kamulaştırmaz el atma davaları sonucunda hükmedilen bedeller, belediye bütçesine önemli yükler getirmektedir.

11. İdare Mahkemeleri aldıkları kararlarda tazminata hükmetmekle birlikte parselin belediye adına tesciline hükmetmemektedir. Bu durum uygulamada taşınmazların belediyeye geçişini güçleştirmekte, parsel tescil edilene kadarki süreçte parsel sahipleri taşınmazı satabilmekte veya taşınmaza ipotek ya da haciz konabilmektedir.

12. Gelir İdaresi Başkanlığının görüşüne istinaden tapu müdürlükleri tescil aşamasında kamulaştırma bedelinin %2'si oranında alım satım harcını parsel sahiplerinden talep etmekte, harcın yatırılmaması halinde mahkeme kararına rağmen tescil işlemleri yapılmamaktadır. Dolayısıyla kamulaştırma bedeli belediye tarafından parsel sahiplerine ödenmiş olsa bile taşınmazın belediye lehine tescili yapılamamaktadır.

### **3.8. Düzenleme Ortaklık Payının Tanımı ve İlgili Kavramlar**

Kamulaştırmaz hukukî el atma yöntemlerinden biri olarak kabul edilen Düzenleme Ortaklık Payı, belediyelerin 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18'inci maddesi ile Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik'e dayanarak gerçekleştirdiği bir uygulamadır. Dolayısıyla belediyelerin kamulaştırma yapmaksızın ilgili mevzuata uygun olarak arsa ve arazi düzenlemesi yoluyla taşınmaz mal edinme yöntemlerinden biridir. (Günday 2011, Bayram 2018, Çabri 2011, Gözler ve Kaplan 2020, Şahiniz 2010, Böke 2006) Düzenleme Ortaklık Payı ile kamu hizmetine tahsis edilen arsa ve arazi parçaları, mevzuatta sayılan hizmetlerin dışında başka

amaçlar için kullanılmamaktadır (İmar Kanunu 1985).

Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik'te Düzenleme Ortaklık Payı; *"düzenleme alanında ve bölgede yaşayanların kentsel faaliyetlerini sürdürebilmeleri için gerekli olan umumî hizmet ve kamu hizmet alanlarını elde etmek ve/veya düzenleme dolayısıyla meydana gelen değer artışları karşılığında; düzenlemeye tâbi tutulan arazi ve arsaların, düzenlemeden önceki yüzölçümlerinden, imar planındaki kullanım kararlarına göre yüzde kırk beşe (%45) kadar düşülebilen miktar"* (Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik 2020) olarak tanımlanmıştır.

### **3.9. Düzenleme Ortaklık Payına Konu Olan Hizmetlerin Öncelik Sırası ve Düzenleme Ortaklık Payı Uygulama Süreci**

Düzenleme Ortaklık Payı uygulaması İmar Kanunu'nun 18'inci maddesi ile Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik çerçevesinde yapılmaktadır. İmar Kanunu'na göre *"İmar hududu içinde bulunan binalı veya binasız arsa ve arazileri; malikleri veya diğer hak sahiplerinin muvafakati aranmaksızın, birbirleri ile, yol fazlaları ile, kamu kurumlarına veya belediyelere ait bulunan yerlerle birleştirmeye, bunları yeniden imar planına uygun ada veya parsellere ayırmaya, müstakil, hisseli veya kat mülkiyeti esaslarına göre hak sahiplerine dağıtmaya ve re'sen tescil işlemlerini yaptırmaya belediyeler yetkilidir. ... Belediyeler ... düzenlemeye tabi tutulan arazi ve arsaların dağıtım sırasında bunların yüzölçümlerinden yeteri kadar saha, düzenleme alanındaki nüfusun kentsel faaliyetlerini sürdürebilmeleri için gerekli olan umumî hizmet alanlarının tesis edilmesi ve düzenleme dolayısıyla meydana gelen değer artışları karşılığında 'düzenleme ortaklık payı' olarak düşülebilir. Ancak, bu maddeye göre alınacak düzenleme ortaklık payları, düzenlemeye tabi tutulan arazi ve arsaların düzenlemeden önceki yüzölçümlerinin yüzde kırk beşini geçemez."*(İmar Kanunu 1985).

İmar Kanunu'na göre herhangi bir parselden ancak bir defa Düzenleme Ortaklık Payı alınabilmekteyse de imar planlarında getirilen yapılaşma koşullarında ve nüfusta artış olması halinde, artış olan

parsellerden, uygulama sonucunda oluşan değerinin önceki değerinden az olmaması kaydıyla, daha önceki imar uygulamalarında yapılan terk veya kesintiler dikkate alınmak suretiyle ilk uygulamadaki Düzenleme Ortaklık Payı oranını %45'e kadar tamamlamak üzere ilave Düzenleme Ortaklık Payı kesintisi yapılabilir. Umumî hizmet alanları için yapılan her türlü terk ve kesintinin, parselasyon planındaki Düzenleme Ortaklık Payı kesintisinden az olması halinde önceki terk ve kesintilerin oranını parselasyon planındaki Düzenleme Ortaklık Payı oranına tamamlayan fark kadar kesinti yapılabilir. Ancak toplam kesinti oranı hiçbir şekilde %45'i geçemez. (İmar Kanunu, 1985)

Düzenleme Ortaklık Payı'na konu olacak hizmetlerin öncelik sırası, Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik'te şöyle belirlenmiştir: (Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik 2020)

1. Yol, su yolu, meydan, park, otopark, çocuk bahçesi ve yeşil alan.
2. İbadet yeri, karakol ve Milli Eğitim Bakanlığına eğitim tesis alanları, kamuya ait kreş alanları.
3. Pazar yeri, semt spor alanı ve şehir içi toplu taşıma istasyonları ve durakları.
4. Sağlık Bakanlığına bağlı sağlık tesis alanları.
5. Otoyol hariç erişme kontrolünün uygulandığı yol.
6. Kent meydanı, kent parkı, spor alanı.
7. Belediye hizmet alanı, sosyal ve kültürel tesis alanı.
8. Teknik altyapı alanı, kamuya ait trafo alanı.
9. Rekreasyon alanı, mesire alanları ve özel tesis yapılmasına konu olmayan ağaçlandırılacak alan.
10. Resmî kurum alanı.
11. Diğer umumi ve kamu hizmet alanları.
12. Mezarlık, otogar alanı.

Düzenleme Ortaklık Payı uygulama süreci genel olarak şöyle işlemektedir:

1. Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasının yapılacağı parsellerin belirlenmesi.
2. Düzenleme sınırının tespit edilmesi.
3. Uygulamanın yapılacağı parsellere ait kadastro ve imar planı verilerinin birleştirilerek uygulama sınırının kesinleştirilmesi.
4. Encümen onayının alınması.
5. Onay yazısının Tapu Sicil Müdürlüğüne gönderilerek parsellere şerh konulması.

6. Düzenleme Ortaklık Payı hesabının yapılması.
7. Parselasyon planının hazırlanması (kadaströ parsellerinin imar parseline dönüştürülmesi).
8. Parselasyon planının bir ay süre ile askıda tutulması.
9. Parselasyon planına yönelik itirazların komisyonca incelenerek karara bağlanması.
10. Parseller sit alanında ise Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulundan onay alınması.
11. Parselasyon planı için encümen onayının alınması.
12. Parselasyon planının arazi aplikasyonunun yapılması.
13. Parselasyon planının ve gerekli diğer evrakların Kadastro Müdürlüğüne gönderilmesi ve kadastro personeli ile arazi kontrolünün yapılarak varsa gerekli düzeltmelerin yapılması.
14. Parselasyon planının ve gerekli diğer evrakların Tapu Sicil Müdürlüğüne gönderilmesi.
15. Tapu Sicil Müdürlüğüne hazırlanan yeni tapuların hak sahiplerine teslim edilmesi.

### **3.10. Düzenleme Ortaklık Payı Sürecinde Yaşanan Sorunlar**

Düzenleme Ortaklık Payı sürecinde çeşitli sorunlar yaşanmaktadır. Bunların bir kısmı mevcut planlama sistemi ile tapu ve kadastro sistemindeki uygulama farklılıklarından kaynaklanırken bir kısmı uygulayıcı kurumlardan bir kısmı ise mülk sahiplerinden ve yargı sisteminden kaynaklanmaktadır. Söz konusu sorunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Düzenlemeye konu olan bazı parsellerin tapu kayıtlarındaki verilerin eski yöntemlerle hesaplanmış olması, buna karşılık son yıllarda hazırlanan imar planlarında hassas ölçüm yapan teknolojilerin kullanılması dolayısıyla veriler arasında ortaya çıkan farklılıkların yanı sıra hâlihazır mülkiyet durumu ile kadastro paftalarının uyuşmamasının neden olduğu sorunların hukukî ve teknik açıdan giderilmesi; Düzenleme Ortaklık Payı uygulama sürecini uzatmaktadır.
2. Kadastro parsellerinin hisseli satışı sonrasında tapu sicilindeki hisselendirmelerde hata yapılması halinde parsel alanındaki hisselerin toplamından farklı sonuçlar ortaya çıkabilmektedir.

3. Düzenleyici idarî işlemlerin (yönetmelikler, genelgeler vb.) değişen şartlara ve yeni durumlara uygun çözümler sunmakta yetersiz kalması dolayısıyla sahada kontrol yapan teknik personelin bireysel kararlar almak mecburiyetinde kalması sübjektif durumların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.
4. Kadastro haritaları ile imar planları arasında ölçek ve koordinat farklılıklarının giderilmesi için yapılan dönüştürme hesaplarında zaman zaman hatalar yapılabilmektedir.
5. İmar planlarının kadastral durumu işlenmiş haritalara çizilmemesi teknik ve hukukî sorunlara neden olmaktadır.
6. Farklı yapılaşma koşullarının aynı bölgede iç içe olması, çözüm geliştirilmesini ve uygulanmasını zorlaştırmaktadır.
7. Bütün kadastral parsellerin birim değerinin kural olarak eşit kabul edilmesine karşılık plan sonrasında çok farklı değerlerde imar parselleri ortaya çıkmaktadır. Kadastral parsellerin değerlendirilmesi sürecinde genel olarak yüzölçümlerinin dikkate alınmasına karşılık plan sonrasında farklı yoğunluklarda ve fonksiyonlarda parseller ortaya çıkmaktadır. Çok farklı değerlerde, fonksiyonlarda ve yoğunluklarda parsellerin ortaya çıkması Düzenleme Ortaklık Payı uygulamalarında ciddi sorunlara neden olmaktadır.
8. İmar planlarının çok sık değişmesi, Düzenleme Ortaklık Payı uygulamalarının da sık sık yapılmasına neden olduğu için gereksiz iş yüküne yol açmaktadır.
9. İmar Kanunu'nun 15'inci ve 16'ncı maddelerine dayalı olarak ifraz ve tevhit işlemlerinin yoğun bir şekilde yapılması, özellikle bu yerlerde Düzenleme Ortaklık Payı uygulamalarında zorluklara neden olmaktadır. Ayrıca ifraz ve tevhit işlemlerinin yoğun yapıldığı yerlerde sosyal donatı alanlarının oluşması ve bunların Düzenleme Ortaklık Payı oranına dâhil olması, bu tür yerlerde Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasını imkânsızlaştırmaktadır.
10. Bazı belediyelerin malî gücünün zayıflığı veya teknik ve hukukî bilgiyi haiz yeterli sayı ve nitelikte elemana sahip olmaması da Düzenleme Ortaklık Payı uygulamalarını zorlaştırmaktadır.
11. Parselasyon planlarına yapılan itirazların giderilmesi sonrasında tekrar askıya çıkarılması ve

bu döngünün devam etmesi uygulama sürecini çok uzatabilmektedir.

12. Uygulama tamamlandıktan sonra mülk sahiplerinin yargıya müracaat etmesi bazen uygulamanın kısmen veya tamamen iptaline yol açarak sürecin yıllarca devam etmesine neden olabilmektedir.

13. İmar hukuku konusunda ihtisas mahkemelerinin bulunmaması tartışmalı kararların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

14. Mahkemelerce atanan bilirkişilerinden bazılarının yeterli bilgi ve tecrübeye sahip olmaması da bilirkişi raporlarından kaynaklanan sorunları artırmaktadır.

### **3.11. Melikgazi İlçesi**

Kayseri'nin metropol ilçelerinden biri olan Melikgazi, 7.12.1988 Tarihli ve 3508 sayılı Kanun'la kurulmuştur. Toplam 599 km<sup>2</sup> yüzölçümüne sahip olan Melikgazi ilçesinin nüfusu 2021 yılı itibarıyla 589.852 kişi (Türkiye İstatistik Kurumu 2022) olup aynı sayıma göre toplam nüfusu 1.434.357 olan Kayseri il nüfusunun %41'i Melikgazi ilçesinde yaşamaktadır. Melikgazi, yüzölçümü itibarı ile Türkiye'deki 922 ilçe arasında 511'inci sırada iken nüfus itibarı ile ülkenin en kalabalık 19'uncu ilçesi olup nüfus yoğunluğu 985 kişi/km<sup>2</sup>'dir.



**Resim 1.** Melikgazi İlçesinin Kayseri İlindeki Coğrafi Konumu

Toplam 58 mahalleden oluşan Melikgazi ilçesi, Erciyes Dağı'nın zirvesinden Kayseri Ovası'nın içlerine kadar uzanmakta, şehrin tarihî merkezinin büyük bölümü, tarihî çarşının tamamı, iç ve dış kale, Erciyes Kayak Merkezi'nin büyük bölümü, tarihî Koramaz Vadisi, Mimar Sinan Organize Sanayi Bölgesi ve Serbest Bölge'nin yanı sıra Erciyes

Üniversitesinin büyük bölümü ve Birinci Organize Sanayi Bölgesi'nin yarıdan fazlası yer almaktadır. Kayseri'nin sanayi, ticaret ve turizm merkezi konumunda olan Melikgazi, Türkiye'nin en gelişmiş ilçeleri 38'inci sıradadır (Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü 2019).

### 3.12. Melikgazi Belediyesince Yürütülen Düzenleme Ortaklık Payı Uygulamaları

Melikgazi Belediyesi tarafından geçmiş yıllarda çeşitli nedenlerle kamulaştırmaz fiilî ve hukukî el atma yöntemlerine başvurulmuş veya bu tür durumları ortaya çıkaracak uygulamalar yapılmıştır. Söz konusu uygulamalar dolayısıyla 2019-2022 yılları arasında belediye aleyhine açılan davalarda geçmiş yıllarda toplam 935.875 m<sup>2</sup> alana fiilen el atıldığı, 163.834 m<sup>2</sup> alana ise hukuken el atıldığı görülmektedir. Dolayısıyla fiilen ve hukuken el atılan toplam alan büyüklüğü 1.099.709 m<sup>2</sup> olup bunun

%85,1'i fiilen el atılan, %14,9'u hukuken el atılan parsellerdir. (Çizelge 1)

Geçmiş yıllarda el atılan toplam alan içinde en büyük paya 538.910 m<sup>2</sup> ile ulaşım (yol, kaldırım vb.) amaçlı olarak el atılan yerler sahip olup bunların %94,6'sını fiilen el atılanlar, %5,4'ünü hukuken el atılanlar oluşturmaktadır. Rekreatyonel amaçlarla el atılan yerlerin toplam büyüklüğü 525.483 m<sup>2</sup>dir ve bunun %74,4'ünü fiilen el atılanlar, %25,6'sını hukuken el atılanlar oluşturmaktadır. Ayrıca toplam 35.316 m<sup>2</sup> büyüklükte konut alanına da fiilen el atıldığı görülmektedir (Çizelge 1).

**Çizelge 1.** Melikgazi Belediyesinde 2019-2022 Yılları Arasında Açılan Davalara Konu Olan Geçmiş Dönemlerdeki Kamulaştırmaz El Atma Uygulamaları

	2019	2020	2021	2022*	Toplam
El Atılan Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	433.277	279.852	181.219	41.527	935.875
Fiilî El Atma					
Ulaşım Amaçlı El Atılan Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	286.878	118.062	91.084	13.831	509.855
Rekreatyon Amaçlı El Atılan Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	124.324	158.243	81.103	27.034	390.704
El Atılan Toplam Konut Alanı (m <sup>2</sup> )	22.075	3.547	9.032	662	35.316
Hukukî El Atma					
El Atılan Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	65.747	54.301	30.444	13.342	163.834
İmar Planında Yol veya Kaldırım Olarak Ayrılmış Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	2.803	13.719	10.662	1.871	29.055
İmar Planında Rekreatyon Amaçlı Ayrılmış Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	62.944	40.582	19.782	11.471	134.779
El Atılan Toplam Alan (m <sup>2</sup> )	499.024	334.153	211.663	54.869	1.099.709

(\*) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.

Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.

Geçmiş yıllarda gerçekleştirilen kamulaştırmaz fiilî ve hukukî el atmalar dolayısıyla Melikgazi Belediyesi aleyhine 2019-2022 yılları arasında toplam 941 adet idarî ve adlî dava açılmıştır. Toplam dava sayısı 2019'da 324 iken 2020'de 272'ye, 2021'de 250'ye düşmüş, 2022 yılının ilk yedi ayında (Ocak-Temmuz döneminde) ise belediye aleyhine 95 adet dava açılmıştır. Toplam 941 olan davaların 786 tanesi (%83,5) fiilî el atma, 155 tanesi (%16,5) hukukî el atma dolayısıyladır. Dava sayısının zaman içinde dikkate değer oranda azalmasının başlıca nedeni belediye tarafından hem kamulaştırmaz fiilî el

atma uygulamalarına gidilmemesi hem de hukukî el atma durumlarının oluşmaması konusunda gösterilen gayrettir (Çizelge 2).



**Çizelge 2.** Melikgazi Belediyesinde Kamulaştırmaz El Atma Davaları

		2019	2020	2021	2022*	Toplam
Fiilî El Atma	Dava Sayısı	268	223	216	79	786
	Davaya Konu Alanlar (m <sup>2</sup> )	1.117.861	650.973	764.343	183.034	2.716.211
	El Atılan Alanlar (m <sup>2</sup> )	433.277	279.852	181.219	41.527	935.875
	El Atılan Alanların Davaya Konu Alanlara Oranı (%)	%38,8	%43,0	%23,7	%22,7	%34,5
Hukukî El Atma	Dava Sayısı	56	49	34	16	155
	Davaya Konu Alanlar (m <sup>2</sup> )	305.983	239.599	91.299	43.568	680.449
	El Atılan Alanlar (m <sup>2</sup> )	65.747	54.301	30.444	13.342	163.834
	El Atılan Alanların Davaya Konu Alanlara Oranı (%)	%21,5	%22,7	%33,3	%30,6	%24,1
Toplam Dava	Davaya Konu Alanlar (m <sup>2</sup> )	1.423.844	890.572	855.642	226.602	3.396.660
	El Atılan Alanlar (m <sup>2</sup> )	499.024	334.153	211.663	54.869	1.099.709
	El Atılan Alanların Davaya Konu Alanlara Oranı (%)	%35,0	%37,5	%24,7	%24,2	%32,4
	Sayı	324	272	250	95	941
Toplam Dava	Fiilî El Atma Davalarının Oranı	%82,7	%82,0	%86,4	%83,2	%83,5
	Hukukî El Atma Davalarının Oranı	%17,3	%18,0	%15,6	%16,8	%16,5
	Büyükük (m <sup>2</sup> )	1.423.844	890.572	855.642	226.602	3.396.660
Davaya Konu Alanlar (m <sup>2</sup> )	Fiilî El Atma Davalarının Oranı	%78,5	%73,1	%89,3	%80,8	%80,0
	Hukukî El Atma Davalarının Oranı	%21,5	%26,9	%10,7	%19,2	%20,0
	Büyükük (m <sup>2</sup> )	499.024	334.153	211.663	54.869	1.099.709
El Atılan Alanlar (m <sup>2</sup> )	Fiilî El Atma Davalarının Oranı	%86,8	%83,7	%85,6	%75,7	%85,1
	Hukukî El Atma Davalarının Oranı	%13,2	%16,3	%14,4	%24,3	%14,9

(\* ) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.

Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.

Dava konusu olan toplam alan 3.396.660 m<sup>2</sup> olup fiilî el atma davalarına konu olan alanlar 2.716.211 m<sup>2</sup> (%80,0), hukukî el atma davalarına konu olan alanlar 680.449 m<sup>2</sup>dir (%20,0). Dolayısıyla dava konusu olan alanların beşte dördü fiilî el atma, beşte biri hukukî el atma kaynaklıdır. El atılan toplam 1.099.709 m<sup>2</sup> alanın 935.875 m<sup>2</sup>sini (%85,1) fiilen el atılanlar, 163.834 m<sup>2</sup>sini (%14,9) hukuken el atılanlar oluşturmaktadır. El atılan alanların davaya konu olan

alanlara oranı %32,4 iken fiilî el atılanların oranı %34,5, hukuken el atılanların oranı ise %24,1'dir (Çizelge 2).

Davalara konu olan alanların yalnızca üçte birinde fiilî veya hukukî el atma söz konusu iken ilgili parsellerin tamamının yargı sürecine dâhil olması belediye açısından önemli malî sorunlara neden olmuştur. Nitekim geçmiş dönemlerdeki el atmalar dolayısıyla 2019 yılında belediye aleyhine açılan 324

davada talep edilen malî tutar 92.867.183-TL, 2020 yılında 272 davada 87.732.058-TL, 2021 yılında 293 davada 85.969.421-TL ve 2022 yılı Ocak-Ağustos ayları arasında 15.020.612-TL'dir. 2019-2022 dönemi bir bütün olarak dikkate alındığında Melikgazi Belediyesinin toplam 281.589.274-TL

tutarında bir malî yük ile karşı karşıya kalması söz konusudur. (Çizelge 3) Bu durum, belediyenin yatırım ve hizmetlerini önemli ölçüde aksatacak finansal sorunlara neden olma potansiyeli taşımaktadır.

**Çizelge 3. Kamulaştırmaz El Atma Davalarının Sayısı ve Malî Boyutu**

	2019	2020	2021	2022*	Toplam
Dava Sayısı	324	272	293	52	941
Davalara Konu Olan Toplam Tutar	92.867.183	87.732.058	85.969.421	15.020.612	281.589.274

(\*) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.  
Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.

Melikgazi Belediyesi Düzenleme Ortaklık Payı uygulamaları dolayısıyla 2019 yılında belediye aleyhine açılan 324 davanın 16'sının düşmesini sağlamıştır. Düşen davaların oranı %4,9 gibi küçük bir değeri ifade etse de söz konusu davalardan sağlanan tasarruf 46.238.237-TL olup oransal değeri %49,8'dir. Diğer bir ifade ile davalarda talep edilen toplam meblağın yaklaşık yarısı, Düzenleme Ortaklık Payı uygulaması sayesinde tasarruf edilmiştir. 2020 yılında 272 davanın 14 tanesinin (%5,1) düşürülmesi sağlanmış ve 17.633.275-TL (%20,1) tasarruf

edilmiştir. 2021 yılında 293 davanın 16 tanesinin (%5,5) düşürülmesi sağlanmış ve 10.052.878-TL (%11,7) tasarruf edilmiştir. 2022 yılında ise 52 davanın 1 tanesinin (%1,9) düşürülmesi sağlanmış ve 957.528-TL (%6,4) tasarruf edilmiştir. 2019-2022 dönemi bir bütün olarak dikkate alındığında toplam 941 davanın 46 tanesinin (%4,9) düşürülmesiyle 74.881.918-TL (%26,6) tasarruf edilmiştir. Her ne kadar düşürülen dava sayısı oransal açıdan az görünmektense de sağlanan tasarruf oldukça yüksek miktardadır (Çizelge 4).

**Çizelge 4. Düzenleme Ortaklık Payı Uygulamalarıyla Davalardan Sağlanan Tasarruf**

	2019	2020	2021	2022*	Toplam
Dava Sayısı	324	272	293	52	941
Düşürülen Dava Sayısı	16	14	16	1	46
Düşürülen Davaların Sayısal Oranı	%4,9	%5,1	%5,5	%1,9	%4,9
Davalara Konu Olan Toplam Tutar (TL)	92.867.183	87.732.058	85.969.421	15.020.612	281.589.274
Düşürülen Davalardan Sağlanan Tasarruf (TL)	46.238.237	17.633.275	10.052.878	957.528	74.881.918
Düşürülen Davalardan Sağlanan Tasarrufun Davalara Konu Olan Toplam Tutara Oranı	%49,8	%20,1	%11,7	%6,4	%26,6
Uzlaşma Dolayısıyla Sağlanan Tasarruf (TL)	5.419.114	1.434.625	2.128.107	--	8.981.846
Davadan Feragat Dolayısıyla Sağlanan Tasarruf (TL)	1.836.654	204.534	462.662	--	2.503.850
Toplam Tasarruf (TL)	53.494.005	19.272.434	12.643.647	957.528	86.367.614

(\*) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.  
Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.

Düzenleme Ortaklık Payı uygulamaları bağlamında 2019-2022 yılları arasında 24 mahallede 100 adet dosya işleme konulmuş, bunlardan 72 tanesi tapu ve kadastro birimlerince tescil edilmiş olup toplam 7,1 milyon m<sup>2</sup>lik alanda Düzenleme Ortaklık Payı uygulaması gerçekleştirilmiştir. (Çizelge 5) Diğer taraftan 6 adet uygulama dosyası iptal edilmiş, 9

dosya için Kayseri Büyükşehir Belediyesi tarafından parselasyon onayı alınmış, 11 dosya kontrol edilmek üzere Kadaastro Müdürlüğüne gönderilmiş, 2 dosya ise Tapu Müdürlüğünde tescil aşamasındadır. Düzenleme Ortaklık Payı uygulamaları sayesinde toplam 3.1 milyon m<sup>2</sup> alanın mülkiyetinin özel kesimden kamu kesimine devri sağlanmıştır.

**Çizelge 5.** Tamamlanmış Düzenleme Ortaklık Payı Uygulamaları

	2019	2020	2021	2022*	Toplam
Tescilli Biten Düzenleme Ortaklık Payı Uygulaması (adet)	15	14	20	23	72
Düzenleme Ortaklık Payı Uygulaması Tamamlanmış Alan (m <sup>2</sup> )	976.074	1.503.373	1.814.736	2.831.528	7.125.711

(\* ) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.

Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.

2022 yılı sonuna kadar 1,8 milyon metrekare büyüklükte toplam 15 dosyanın daha tamamlanması programlanmıştır. Böylece 2019-2022 dönemini kapsayan dört yıl içinde 8,9 milyon metrekarelik alanda Düzenleme Ortaklık Payı uygulaması tamamlanmış olacaktır. 2024 yılı sonuna kadar ise 29 adet dosyanın daha işleme konulması planlanmış olup 16 milyon metrekarelik alanda Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasının tamamlanması hedeflenmektedir.

Melikgazi Belediyesi Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasının yanı sıra kamulaştırmaz el atmalardan olumsuz etkilenen bireylerle uzlaşma

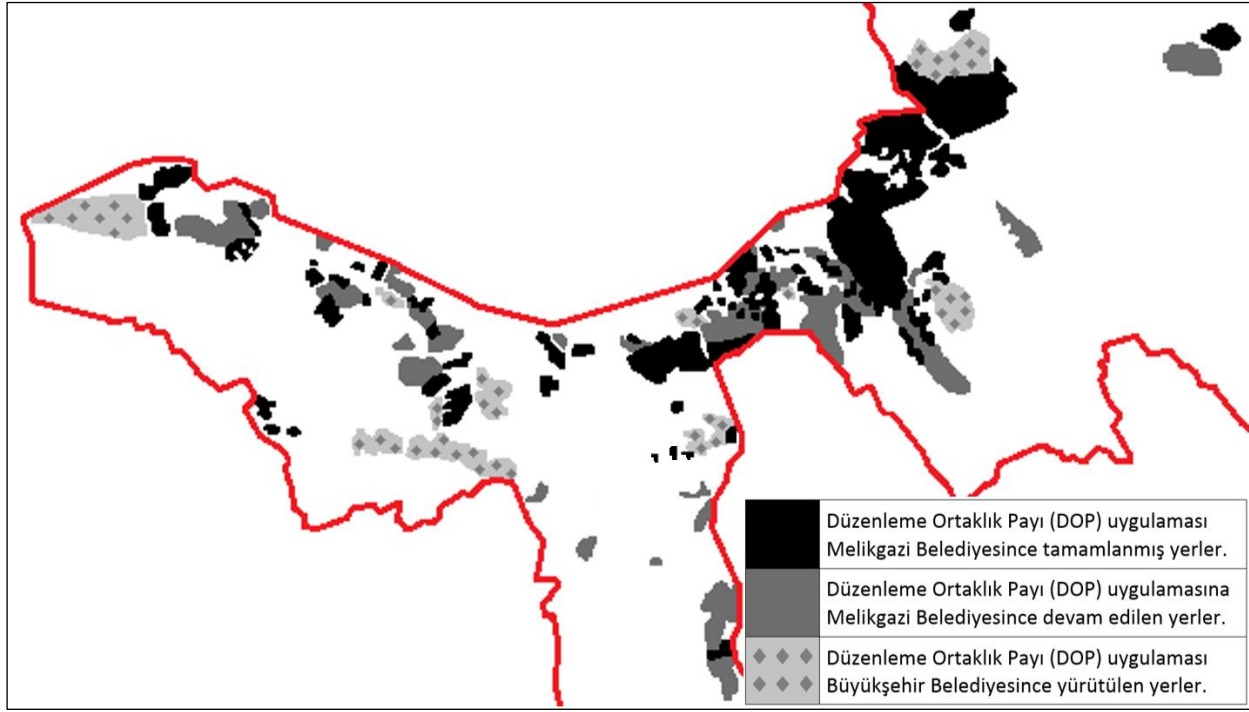
veya onların davalardan feragat etmesini sağlama gibi yöntemleri de aktif olarak kullanmaktadır. Söz gelimi uzlaşma yöntemi ile 2019 yılında 5.419.114-TL, 2020 yılında 1.434.625-TL ve 2021 yılında 2.128.107-TL olmak üzere 2019-2021 döneminde toplam 8.981.846-TL tasarruf sağlanmıştır. Aynı şekilde davadan feragat yöntemi ile 2019 yılında 1.836.654-TL, 2020 yılında 204.534-TL ve 2021 yılında 462.662-TL olmak üzere toplam 2.503.850-TL tasarruf sağlanmıştır. Her iki yöntem birlikte dikkate alındığında söz konusu dönemde belediyenin 11.485.696-TL tasarruf yaptığı görülmektedir. (Çizelge 6)

**Çizelge 6.** Uzlaşma ve Davadan Feragat Yöntemleriyle Sağlanan Tasarruf

	2019	2020	2021	2022*	Toplam
Uzlaşma Dolayısıyla Sağlanan Tasarruf (TL)	5.419.114	1.434.625	2.128.107	--	8.981.846
Davadan Feragat Dolayısıyla Sağlanan Tasarruf (TL)	1.836.654	204.534	462.662	--	2.503.850
Toplam Tasarruf (TL)	7.257.787	1.641.179	2.592.790	--	11.485.696

(\* ) 2022 yılı Ocak-Ağustos dönemi.

Kaynak: Melikgazi Belediyesi Hukuk İşleri Müdürlüğü, Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022 verileri.



Şekil 1. Melikgazi İlçesinde Gerçekleştirilen Düzenleme Ortaklık Payı Uygulamaları (Melikgazi Belediyesi Plan ve Proje Müdürlüğü 2019-2022)

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Kamulaştırma işlemleri 1956 yılında yürürlüğe giren 6830 sayılı Kanun ile güçlü bir yasal altyapıya ve sistematik bütünlüğe kavuşturulmaya çalışılmışsa da kamulaştırmaz el atmalara karşı yasal hak arama yollarını kullanma hakkını tanıyan 211 sayılı Kanun'un 1961 yılında yürürlüğe girmesiyle birlikte kamu kurum ve kuruluşları malî anlamda büyük bedel davaları ile karşılaşmıştır. 1983 yılında çıkarılan 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu'nun kamulaştırmaz el atmalara karşı hak arama yollarını kısıtlayan 38'inci maddesinin ve 211 sayılı Kanun'un benzer içerikteki 3'üncü maddesinin Anayasa Mahkemesince iptal edilmesi sonrasında belediyeler aleyhine çok sayıda bedel ve tazminat davaları açılmıştır. Belediyelerin yıllık bütçelerinin yaklaşık üçte birine denk gelen bedel ve tazminat talepleri karşısında birçok belediye alternatif çözüm yolları geliştirme yoluna gitmiştir.

Kayseri'nin demografik ve ekonomik açıdan en büyük ilçesi konumunda olan Melikgazi'de de belediye, 2022 yılı itibarı ile toplam değeri 281.589.274-TL olan 941 dava nedeniyle belediyenin uğrayacağı muhtemel kayıpları engellemek için 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18'inci maddesinde yer alan Düzenleme Ortaklık Payı uygulamasından etkin bir şekilde yararlanma yoluna gitmiştir. Nitekim bu yöntemle 2019-2022 yılları

arasında 46 davanın düşürülmesi sağlanarak toplam 74.881.918-TL tasarruf edilmiştir. Belediye ayrıca davacı taraflarla uzlaşarak ve davadan sulh yoluyla feragat etmelerini de sağlayarak aynı dönemde 11.485.969-TL tasarruf etmiştir. Her iki meblağ birlikte değerlendirildiğinde 86.367.887-TL tasarruf edildiği görülmektedir.

Belediyelerin geçmiş dönemlerde uygulanmış olan kamulaştırmaz el atma işlemlerinin neden olduğu malî kayıplardan kurtulabilmesinin yanı sıra bundan sonraki süreçte benzer durumların yaşanmaması için ilgili mevzuatta kapsamlı düzenlemeler yapılarak mevcut sorunların giderilmesi gerekmektedir. Çünkü Kamulaştırma Kanunu, İmar Kanunu, ilgili yönetmelikler, bilirkişilik sistemi ve mahkemelerin işleyişinden kaynaklanan birçok sorun söz konusudur. Söz gelimi bilirkişi olarak atanan bazı kişilerin mevzuat, rayiç değerler ve meslekî deneyim konusunda yetersizlikler göstermesi, bedel tespit ve artırımı davaları için kanunda belirtilen sürenin yetersizliği, ilgili taşınmazın dava sürecinde el değiştirebilmesi ve tapu kayıtlarında değişikliklerin yapılabilmesi, haciz yasağının bazı durumlarda dikkate alınmaması, mahkeme kararı kesinleşmeden icra ve haciz işlemlerine başlanması, diğer kurumların yetkisine bırakılan taşınmazlar konusunda bile belediye

aleyhine dava açılması, hâkimlerin sık sık değiştirilmesi ve dava sürelerinin uzunluğu bu tür sorunlardan bazılarıdır.

Hukukî el atma davalarının mülkiyet sahibi lehine sonuçlandığı durumda verilen yargı kararlarında, el atılan taşınmazın belediye tarafından kamulaştırması ve bedelinin mülkiyet sahibine ödenmesine karar verilmesine rağmen söz konusu taşınmazın belediye adına tescil edilmesine dair hüküm verilmemesi de önemli bir sorundur. Bu nedenle mahkeme kararı çerçevesinde taşınmazın bedelini belediyeden alan birçok mülkiyet sahibi, ilgili taşınmazın belediye adına tescil edilebilmesi için tapu dairesine yatırması gereken harç ücretini yatırmamakta ve bu nedenle taşınmazın belediye adına tescili yapılamamaktadır. Dolayısıyla dava sonucunda taşınmazın bedelini mülkiyet sahibine ödeyen belediye, taşınmazın tapu tescilini yaptıramamakta ve söz konusu gayrimenkul belediyenin uhdesine geçememektedir. Taşınmazın tapusu eski mülkiyet sahibinde kaldığı için de malik kişi, bankalardan kredi çekerek veya üçüncü şahıslara borçlanma yaparak ilgili taşınmaza ipotek koydurabilmektedir. Bu nedenle belediye, özel mülkiyet sahibinden tapu idaresine ödenmesi gereken harç bedelini düşerek mahkemenin belirlediği kamulaştırma bedelini kendisine ödeyebilmelidir. Bunun için mahkemece ilgili taşınmazın tescilinin belediye adına yapılması yönünde karar verilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde belediyeler, bedelini ödedikleri taşınmazların tapusunu alamama durumu ile karşı karşıya kalmaktadır.

Bir diğer tartışma konusu da 2981 sayılı Kanun'un uygulanması çerçevesinde geçmişte bir kısmı kamusal alan olarak ayrılan taşınmazlarda 18'inci madde uygulamasının mükerrer kesinti olarak sayılması yönünde alınan yargı kararlarıdır. Ayrıca, bazen kamulaştırmaz el atılan mülkiyet birden fazla kamu idaresinin sorumluluk alanına girebilmektedir. Bu tür kamulaştırmaz el atmalarda, yargı yerlerince farklı kamu idareleri yönünden farklı kararların alınabildiği de görülebilmektedir.

Kamulaştırmaz el atma uygulamasında karşılaşılan sorunları çözmek için geliştirilen alternatif bir model olan Düzenleme Ortaklık Payı uygulamalarında ise

tapu kayıt verileri ile imar planı verilerinin uyuşmaması, mevzuatın güncel ihtiyaçların gerisinde kalması, farklı yapılaşma koşullarının iç içe olması, imar planlarının sık sık değiştirilmesi, ifraz ve tevhit işlemlerinin yoğun bir şekilde yapılması, bazı belediyelerin teknik ve malî kapasitelerinin yetersizliği ve imar hukuku konusunda ihtisas mahkemelerinin bulunmaması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Bu sorunların çözüme kavuşturulmasının yanı sıra belediyelerin imar planı yapma yetkisinin şehirlerin gerçek ihtiyaçları doğrultusunda ve coğrafi anlamda kademeli olarak kullanılması büyük önem taşımaktadır. Şehirlerin plan dönemi içindeki ihtiyacından daha geniş alanların imara açılması kamulaştırmaz fiilî el atma uygulamalarına zemin hazırlayarak belediye aleyhine birçok davanın açılmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan imar planının yürürlüğe girdiği tarihten itibaren belediye veya ilgili kamu otoritesince beş yıl içinde kamulaştırılmayan fakat imar planında park, yol, sosyal tesis, okul ve sağlık alanı gibi kamuya ayrılan özel mülkiyete konu taşınmazlar, kamulaştırmaz hukukî el atma davalarına konu olmaktadır. Her iki durumda da belediyeler ve bağlı kuruluşları büyük malî yük altına girebilmektedir.

İdarelerin taraf olduğu çoğu kamulaştırmaz el atma davasının ana sorununun, yapıldığı dönem itibariyle kanunların öngördüğü usuller çerçevesinde yerine getirilmiş olmasına rağmen tebligatların usulüne uygun yapılamaması ve idarelerce taşınmaz sahipleri adına bankalarda bloke ettirilen bedellerin taşınmaz sahiplerinin özel hesabına aktarılamamasından kaynaklandığı dikkat çekmektedir. Bahsedilen bu durumlar nedeniyle idarelerin yaptıkları kamulaştırma işlemlerine ait bilgi, belge, ödemeye ilişkin dekont, tebligatın muhatabına yapıldığına ilişkin zabıt gibi önemli belgelerin sınırsız süreyle saklanması gereklidir. (Bayram 2018)

Kamulaştırma Kanunu'na "kamulaştırmaz el atma durumunda kamulaştırma hükümleri geçerlidir." biçiminde bir ibarenin eklenmesi de bu bağlamda düşünülebilir. Kamulaştırmaz el atmaya neden olan idarenin eylem ve işlemlerinden sorumlu kamu personelinin kişisel sorumluluğunun öngörülmesi ve idarenin kusur sorumluluğunun daha ağır

yaptırımlara tabi tutulması da gerekebilir. Ayrıca, kamu hizmeti alanında kalan taşınmazların, hazine arazilerinin yoğun olduğu yerlerde uydu kentler oluşturularak buradaki taşınmazlar ile trampa edilmesine olanak sağlayan yasal düzenlemeler de yapılabilir. Kamulaştırmaz el atmaya karşı mülkiyet hakkının korunabilmesi için idareler arası koordinasyonun daha iyi sağlanması ve imar programlarının süresi içinde uygulamaya geçirilmesinin gerektiği de önerilebilir. Diğer taraftan uygulamada hukukî ve fiilî el atma olgularının birlikte gerçekleştiğine ilişkin pek çok örneğin bulunması, bu tür durumlarda hak sahiplerinin aynı taşınmaz için adlî ve idarî yargı olmak üzere iki farklı yargı kolunda ve farklı hükümlere tabi tutulan yargılama süreçleri ile karşı karşıya kalabilmesine neden olmaktadır. Bu durumun giderilmesine yönelik yasal düzenlemeler yapılabilir. (Bakırcı 2021)

Kamulaştırmaz hukukî el atma davalarında idare mahkemelerinin tescile de karar verebilmesini sağlayacak düzenlemeler yapılmalıdır. Bu nedenle kamulaştırmaz el atma davalarının başta belediyeler olmak üzere kamu kurumlarına daha fazla zarar vermesini önlemek için hem kamulaştırma mevzuatında hem de imar mevzuatında kapsamlı değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca özellikle belediye yönetici ve personellerinin kamulaştırmaz fiilî ve hukukî el atmalar ve konunun yasal, teknik ve malî boyutları hakkında eğitime tabi tutulması da yararlı sonuçlar doğuracaktır. Belediyelerin geçmiş yıllarda kamulaştırmaz el atma yoluna gitmeleri dolayısıyla ortaya çıkan mağduriyetlerin, tarafların ortak çıkar ve yararını sağlayacak şekilde çözüme kavuşturulması için söz konusu sorunları giderici çalışmaların ivedilikle yapılması önerilir.

## 5. Kaynaklar

Amme Hükûmî Şahısları veya Müesseseleri Tarafından Fiilen Amme Hizmetlerine Tahsis Edilmiş Gayrimenkuller Hakkında Kanun 1961. Kanun No: 221. Kabul Tarihi: 05.01.1961. *Resmî Gazete*. Sayı: 10075. Tarih: 12.01.1961.

Anayasa Mahkemesi 2002. Esas Sayısı: 2002/112. Karar Sayısı 2003/33. Tarih: 10.04.2003.

Anayasa Mahkemesi 2004. Esas Sayısı: 2004/25. Karar Sayısı 2008/42. Tarih: 17.01.2008.

Anayasa Mahkemesi 2013. Esas Sayısı: 2013/93. Karar Sayısı 2013/101. Tarih: 25.09.2013.

Anayasa Mahkemesi 2014a. Başvuru No: 2013/2002. Karar Tarihi: 03.04.2014.

Anayasa Mahkemesi 2014b. Başvuru No: 2013/711. Karar Tarihi: 30.12.2014.

Anayasa Mahkemesi 2015. Başvuru No: 2013/3667. Karar Tarihi: 10.06.2015.

Arsa ve Arazi Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik 2020. *Resmî Gazete*. Tarih: 22.02.2020. Sayı: 31047.

Avcı, M. 2014. Türk Hukukunda Kamulaştırmaz El Atma Sorunu Üzerine Bir İnceleme, *International Conference on Eurasian Economies*. 1-7.

Avrupa Konseyi 1952. *İnsan Hakları ve Temel Özgürlüklerin Korunmasına İlişkin Sözleşmeye Ek Protokol*.

Bakırcı, M. K., 2021. Kamulaştırmaz El Atma, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Galatasaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 396.

Bayram, H. M., 2018. Kamulaştırmaz El Atmanın Hukukî ve Fiilî Ayrımı, Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara.

Birleşmiş Milletler 1948. *Birleşmiş Milletler İnsan Hakları Evrensel Beyannamesi*.

Böke, V. 2006. *Kamulaştırmaz El Atma Davaları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık. ISBN: 9789750203350.

Carrs-Frisk, M. 2019. *Mülkiyet hakkı*. İnsan hakları el kitapları. No: 4.

Coşkun, M., 2019. Avrupa İnsan Hakları Sözleşmesine Göre Kamulaştırmaz El Atma, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 96.

Çabri, S., 2011. Kamulaştırmaz El Atma Kavramının Yargıtay Hukuk Genel Kurulu'nun 15.12.2010 Tarihli Kararı Doğrultusunda Tanımlanması. *EBYÜ-HFD (Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi)*, 15/1-2. 77-104.

Çetintaş, Ö., 2019. Kamulaştırmaz El Atma, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gaziantep, 146.

- Çoruhlu, Y. E., Uzun, B., Yıldız, O., 2019. Kamulaştırmaz Hukukî El Atma Kavramının İncelenmesi ve Muhtemel Çözüm Yaklaşımlarının Geliştirilmesi, *TAAD-Türkiye Adalet Akademisi Dergisi*, **11(39)**, 1-27.
- Develioğlu, F., 2006. Mülkiyet, Osmanlıca-Türkçe Ansiklopedik Lûgat, 23. Baskı, Ankara: Aydın Kitabevi Yayınları, ISBN: 9757519022.
- Duran, N., 2020. Hukuki ve Fiili El Atma Davalarında Tazminat: Sapanca Gölü Örneği, Dönem Projesi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50.
- Etgü, M. A., 2009. Kamu Hukukunda Mülkiyet Hakkı ve Avrupa İnsan Hakları Mahkemesi'nin Mülkiyet Hakkına Bakışı, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, 256.
- Gemalmaz, H. B., 2018. Mülkiyet Hakkı, Anayasa Mahkemesine Bireysel Başvuru El Kitapları Serisi-6. Avrupa Konseyi Yayını, Ankara.
- Göktepe, H. S., 2010. Türk Hukukunda Kamulaştırma-Kamulaştırmaz El Atma ve Eşya Hukuku Yönünden Sorunları, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 157.
- Gözler, K., 2019. Hukuka Giriş, 16. Baskı, Bursa: Ekin Basım, Yayın, Dağıtım. ISBN: 9786053278924.
- Gözler, K., Kaplan, G., 2020. İdare Hukuku Dersleri. 22'nci Baskı, Bursa: Ekin Basım, Yayın, Dağıtım. ISBN: 9786257090285.
- Günday, M., 2011. İdare Hukuku, Ankara: İmaj Yayınevi, ISBN: 9789757852193.
- Güriz, A., 2019. Teorik Açından Mülkiyet Sorunu, 2. Baskı, Ankara: Siyasal Kitabevi, ISBN: 9786059221825.
- İmar Kanunu 1985. Kanun No: 3194. Kabul Tarihi: 05.03.1985. *Resmî Gazete*. Sayı: 18749. Tarih: 09.05.1985.
- İstisna Kanunu 1956. Kanun No: 6830. Kabul Tarihi: 31.08.1956. *Resmî Gazete*. Sayı: 9402, Tarih: 08.09.1956.
- Kalkınma Ajansları Genel Müdürlüğü 2019., İlçelerin Sosyo-Ekonomik Gelişmişlik Sıralaması Araştırması: SEGE-2017, Haz: Feyzullah Yılmaz, Salih Acar, Dr. Leyla Bilen Kazancık, Leventcan Gültekin, Mustafa Caner Meydan, Dr. Mehmet Emin Özsan, Mustafa Işık, ISBN: 9786057679017, Ankara.
- Kamulaştırma Kanunu 1983. Kanun No: 2942. Kabul Tarihi: 04.11.1983. *Resmî Gazete*. Sayı: 18215. Tarih: 08.11.1983.
- Kaplan, G., 2012. Yeni Yasal Düzenlemelere Göre Kamulaştırmaz El Koyma Sebebiyle Doğan Tazmin Hakkının Tabi Olduğu Usul ve Esaslar, *Türkiye Barolar Birliği Dergisi*, **2012(99)**, 125-150.
- Karaca, E., 2018. Kamulaştırmaz El Koyma Unsurları ve Kamulaştırmaz El Koymaya Karşı Yargısal Başvuru Yolları, *Türkiye Barolar Birliği Dergisi*. **1379**, 273-309.
- Karaca, İ., 2018. Kamulaştırmaz El Atma, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 151.
- Karadağ, E. (t.b.), *Kamulaştırmaz El Koyma Davaları ve Yargıtay İçtihatları*.
- Kayseri Büyükşehir Belediyesi 2021. *Coğrafi Bilgi Sistemi*.
- Kayseri İl Merkezinde Melikgazi ve Kocasinan Adıyla İki İlçe Kurulması Hakkında Kanun 1988. Kanun No: 3508. Kabul Tarihi: 07.12.1988. *Resmî Gazete*. Sayı: 20.019. Tarih: 14.12.1988.
- Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu 1983. Kanun No: 2863. Kabul Tarihi: 21.07.1983. *Resmî Gazete*. Sayı: 18113. Tarih: 23.07.1983.
- Mamal, M., 2019. Kamulaştırmaz El Atmada Tazminat ve Ecrimisil, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Samsun, 155.
- Marmara Belediyeler Birliği 2018. *Yerel Yönetimlerde Güncel Hukukî Sorunlar ve Çözüm Önerileri Çalıştay Raporu*.
- Millî Savunma Bakanlığı Harita Genel Müdürlüğü 2021. *İl ve İlçe Yüzölçümleri*.
- Şahiniz, C. S., 2010. *Teoride ve Uygulamada Kamulaştırmaz El Koyma*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, ISBN: 9789750201189.
- Tutal, E., 2016. Kamulaştırmaz El Atma Davalarında Yargılama Sürecindeki Son Gelişmeler, *Uyuşmazlık Mahkemesi Dergisi*, **0/7**, 1107-1132.
- Türk Borçlar Kanunu 2011. Kanun No: 6098. Kabul Tarihi: 11.01.2011. *Resmî Gazete*. Sayı: 27836. Tarih: 04.02.2011.
- Türkiye Cumhuriyeti Anayasası 1982. Kanun No: 2709. Kabul Tarihi: 18.10.1982. *Resmî Gazete*. Sayı: 17863. Tarih: 09.11.1982.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) 2022. *Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları*.

Türk Medenî Kanunu 2001. Kanun No: 4721. Kabul Tarihi: 22.11.2001. *Resmî Gazete*. Sayı: 24607. Tarih: 08.12.2001.

Uysal, A., 2015. Kamulaştırmaz El Atma Halinde Açılabilir Davalar, Taraf Ehliyetleri ve Nitelikleri, *Istanbul Medipol Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 2 (1), Bahar, 199-215.

Uyuşmazlık Mahkemesi 2021. Esas No:2021/136. Karar No: 2021/265. Tarih: 03.05.2021.

Yalçınduran, T., 2015. *Kamulaştırmaz El Koyma*. Ankara: Yetkin Yayınları. ISBN: 9789754649703.

Yalçınduran, T. 2017., 6745 Sayılı Kanun İle Hukuki El Koymalara Dair Yapılan Değişiklikler İle Hukuki ve Fiili El Koymalara Uygulanacak Hükümler, *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, **66(2)**, 491-515.

Yargıtay Hukuk Genel Kurulu 2010. Esas Sayısı: 2010/5-662. Karar Sayısı: 2010/651. Tarih: 15.12.2010.

Yargıtay İçtihadı Birleştirme Genel Kurulu 1956. Esas Sayısı: 1956/1. Karar Sayısı: 1956/6. Tarih: 16.05.1956.

Yargıtay İkinci Hukuk Dairesi 1975. Esas Sayısı: 1975/4280. Karar Sayısı: 1975/5598. Tarih: 19.06.1975.

Yıldırım, R. A., 2017. Mahkeme Kararları Işığında Türk Hukukunda Kamulaştırmaz El Atam Sorunu, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 144.

Yılmaz, A., 2020. Kamulaştırmaz el atma ve hukukî el atma kavramlarının tüzel gelişiminin incelenmesi, *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, **7/2**, DOI: 10.9733/JGG.2020R0010.T, 155-183.



AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055601 (1108-1121)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055601 (1108-1121)

DOI: 10.35414/akufemubid.1072464

## Araştırma Makalesi / Research Article

## Yağış ve Sıcaklık Anomali Hesaplanmasında Referans Veri Etkinliğinin Araştırılması

Hasan Törehan BABACAN<sup>1</sup>, Ömer YÜKSEK<sup>2</sup><sup>1</sup> Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Amasya.<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon.Sorumlu yazar e-posta: hasan.babacan@amasya.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9570-1966>  
yuksekok@ktu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3425-1890>

Geliş Tarihi: 12.02.2022

Kabul Tarihi: 18.10.2022

## Öz

İklimde yaşanan değişiklikler hissedilir etkilerini göstermeye başlamıştır. Bu etkiler bazı yerlerde sıcak hava dalgaları ve kuraklık olarak görülürken bazı yerlerde ise soğuk hava dalgaları, ani şiddetli yağışlar ve sel-taşkınlar ile kendini göstermektedir. Bu durumlar, iklim değişikliği konusunda yapılan araştırmaların önemini arttırmaktadır. İklim değişikliğinin etkilerini ve olası sonuçlarını tahmin edebilmek için istasyon ölçüm değerlerinin yanı sıra iklim projeksiyonları geliştirilmiştir. Tahmin edilen senaryolar yardımı ile gelecekte iklimde oluşabilecek değişiklikler öngörülerek iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini bertaraf etmek amaçlanmaktadır. Yapılan bu çalışmada, iklim değişikliğine bağlı olarak sıcaklık ve yağış parametrelerinde gelecek tahminlerini değerlendirmek üzere kullanılan referans verilerin etkinliği incelenmiştir. Araştırma bölgesi olarak belirlenen Doğu Karadeniz Havzası'nda farklı konumlarda bulunan 11 Meteoroloji Gözlem İstasyonu (MGİ)'nin gözlenmiş yağış ve sıcaklık verileri ile GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR Küresel Dolaşım Modeli (KDM)'lerinin yağış ve sıcaklık projeksiyon verileri kullanılmıştır. Çalışmada KDM'lerin geçmiş verileri tahminlemesi ile elde edilen 1971-2000 yılları arasındaki veriler ve aynı yıl aralığında kaydedilmiş veriler referans alınarak 2022-2040 (P1), 2041-2070 (P2) ve 2071-2099 (P3) yılları arasındaki dönemler için sıcaklık ve yağışta dönemsel ortalama anomaliler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, projeksiyon ve gözlenmiş olmak üzere referans veri seçimindeki farklılıkların anomali hesaplamalarını etkilediği belirlenmiştir. Çalışma kapsamında; doğal engebe durumu yüksek olan bölgelerde, farklı referans verilerden elde edilen anomali değerleri arasındaki rölatif farkın yüksek olması sebebiyle, doğal engebese fazla olan bölgeler için referans veri seçiminin daha büyük önem arz ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

## Anahtar kelimeler

İklim Değişikliği;  
Küresel Dolaşım  
Modeli; Referans Veri  
Etkinliği; Yağış ve  
Sıcaklık Anomalisi

## Investigation of the Efficiency of Reference Data Selection for the Precipitation and Temperature Anomaly Determination

## Abstract

Climate change has increased the importance in recent years. With the help of the developed scenarios, by predicting the future climate, it is aimed to eliminate the negative effects of climate change. In this study, the effectiveness of the reference data used to evaluate the future forecasts of climate change in temperature and precipitation parameters has been examined. Observed data of 11 Meteorology Stations (MS) located at different locations in the Eastern Black Sea Basin, which was determined as the research region, and precipitation and temperature projection data, obtained from GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES and MPI-ESM-MR Global Circulation Model(GCM), have been used. In the study, by taking the data between 1971-2000 years, obtained by running the GCMs backwards, and the observed data in the same years as a reference, the precipitation and temperature changes for the periods between 2022-2040(P1), 2041-2070(P2) and 2071-2099(P3) average anomalies have been evaluated. As a result, it has been determined that the differences in the reference data selection, projection data and observed data, have an effect on the anomaly calculations. It has been concluded that the selection of reference data in regions with high natural relief is of critical importance for the performance of the climate analyzes.

## Keywords

Climate Change; Global  
Circulation Model;  
Reference Data  
Effectiveness;  
Precipitation and  
Temperature Anomaly

## 1. Giriş

Yaşamın tüm gerekliliklerini barındıran yerküre içinde iklimsel değişkenlere bağlı hidrolojik ve meteorolojik döngüler, doğal denge durumunda gerçekleşmektedir. Bu doğal denge durumu çeşitli dış etkenler nedeniyle günümüzde sürekli olarak değişim göstermektedir. Uluslararası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan 5. değerlendirme raporunda hidrolojik ve meteorolojik prosesleri etkileyen en önemli dış etkenlerden olan iklim değişikliğinin esas kaynağı olarak insan aktiviteleri gösterilmektedir (IPCC 2013). Hızla artan nüfusla birlikte artan ihtiyaçların daha hızlı karşılanması için gün geçtikçe daha fazla üretim yapma ihtiyacı oluşmaktadır (Lübke 2022). Bu üretim ihtiyacının karşılanmasının temel yolu endüstriyel tesislerin geliştirilmesi ve arttırılması ile mümkün olmaktadır. Endüstriyel faaliyetlerin sürdürülmesi sırasında iklim değişikliğinin kaynağını oluşturan sera gazları açığa çıkmaktadır ve açığa çıkan bu gazlar atmosferde birikmekte, güneşten gelen yüksek enerjili ışınları geçirmekte ancak yeryüzünde kırılan bu ışınların tekrar çıkışına izin vermemektedir (Snyder *et al.* 2009). Bu etki nedeniyle yerküre ısınmakta ve iklimsel parametreler sürekli değişime uğramaktadır. İklimde yaşanan değişimlerin gelecek projeksiyonları küresel ölçekte geliştirilen Küresel Dolaşım Modeli (KDM) çıktılarından elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmektedir (Salman *et al.* 2020).

İklim, bir yerde etkili olan (30-40 yıl) hava durumunun uzun yıllık ortalamalarını ifade etmektedir (Pal *et al.* 2022). İklim değişikliği dünyanın varoluşundan itibaren belirli aralıklarla yaşanmaktadır. Ancak özellikle sanayi devrimi ile atmosferde artan karbondioksit miktarı, iklimin normal değişim sürecine etki ederek, iklimde büyük değişimlere sebep olmaktadır. İklim değişikliğinin küresel olarak atmosferik olayları direkt olarak etkilediği ve buna bağlı olarak canlı aktiviteleri üzerinde doğrudan etkisi olacağı öngörülmektedir (Stocker *et al.* 2014). Geçmişte yapılan uzun süreli gözlemler ve gelecek projeksiyonları ile yapılan kıyaslamalar neticesinde, buzul alanlarındaki

küçülmeler, deniz seviyelerinde yaşanan artışlar, taşkın ve kuraklık hadiseleri ve yağış rejimlerinde yaşanan değişimler iklim değişikliğinin en önemli ispatı niteliğindedir (WMO, 2021). Türkiye’de iklimsel değişimin etkileri küresel ölçekteki benzer olmaktadır. Son 25 yıllık gözlenmiş sıcaklık değerleri incelendiğinde, sıcaklıklarda son yıllarda hızlı bir artış olduğu göze çarpmaktadır. Bu durum neticesinde ortaya çıkan sıcaklık artışları; Türkiye’nin orta ve güney kesimlerinde son yıllarda yaşanan kuraklığın, kuzey kesimlerinde ise yaşanan ani ve şiddetli yağışların ve buna bağlı olan taşkınların ana etkeni olarak gösterilebilmektedir. Bu taşkınlara, son yıllarda Trabzon, Rize, Artvin ve Kastamonu’da yaşanan taşkın felaketleri örnek olarak gösterilebilir. IPCC bulgularına göre Türkiye’nin içinde bulunduğu kuzey yarımkürede sıcaklıkların 21. yüzyıl sonlarına doğru 1,5 ile 2°C civarında artış göstermesi beklenmektedir (IPCC 2013).

İklim değişikliği ile ilgili yapılan çalışmalar uzun yılları temsil edecek nitelikte gerçekleştirilmektedir. Elde edilen bulguların performans değerlendirmeleri için, referans olarak belirlenen geçmiş veriler kullanılmaktadır. (Swain ve Petra, 2019.) İklim değişikliğinin etkilediği atmosferik süreçlerin incelenmesi, tarımsal faaliyetler, taşkın ve kuraklık gibi felaketlere karşı erken önlem alınabilmesi ve içme ve kullanma suyu temini için oldukça önemli bir konudur (Swain ve Petra 2019, Kohnova *et al.* 2019, Khan *et al.* 2018, Meissl *et al.* 2017). Nüfusa paralel şekilde artan içme ve kullanma suyu ihtiyacı, suyun sürdürülebilirliğinin sağlanması konusundaki temel araştırma konuları arasına iklim değişikliğini getirmiştir. İklim birçok araştırmanın konusu olmuş ve araştırmacılar bölgesel faktörlere bağlı olarak iklim değişikliği etkilerinin akarsu sistemlerinde, taşkın ve kuraklık riskini beraberinde getirdiğini bildirmiştir. Bu durumun bazı bölgelerde gıda ve içme suyu temininin sürdürülebilirliği ve akarsuya bağlı flora ve faunanın tehdit altında olması gibi sorunlarla, bazı bölgelerde ise akarsularda yüksek debi değerlerinin gözlenme sıklığının artmasına bağlı olarak taşkın gözlenme sıklığının artışı kaynaklı sorunlara yol açabileceği öngörülmektedir (Valeriy

*et al. 2021, Yano et al. 2007, Toros et al. 2019, Khoi ve Phi, 2018).*

Geçmiş araştırmalar, iklim değişikliğinin günümüzde meydana getirdiği olumsuz etkilerin ortaya koyulması ve bu durumun gelecek etkilerinin araştırılması hakkında yapılan çalışmaların parametre bazlı olarak geleceğe yönelik sayısal modelleme ağırlıklı olduğunu göstermektedir (Apata 2011, Kay *et al.* 2021, Gaur *et al.* 2021). Yapılan modellemeler gelecekte özellikle hidrolojik proseslerin değişim yönünü ve miktarını belirlemek için yapıldığından, bu modellemelerde geçmiş referans değerlerin kullanılması gerekmektedir. Tahmin edilen değişimlere bakılarak gelecek planlamaları yapılacağından belirlenen referans değerler çalışma sonuçlarının uygulanabilirliği için önemli bir yere sahiptir. Referans değerlerin seçiminde literatürde önerilen bir yöntem olmamakla birlikte araştırmacılar projeksiyon verileri yorumlarken kaydedilmiş geçmiş verilerden yararlanmaktadır (Gaur *et al.* 2021, Lelieveld *et al.* 2012, Kay *et al.* 2021). Referans olarak seçilecek verilerin iklim değişikliğinden etkilenmemiş veya düşük mertebelerde etkilenmiş olması istenir. Bu sebeple anomali incelemesi yapılarak anomali değerlerinin en düşük olduğu yıllar seçilmeye çalışılır. Literatürde geçmiş yıl verilerinin, anomali hesaplanması ve buna bağlı yapılacak planlamalarda dikkate alınması hususunda kullanımı kabul görmektedir (Peterson ve Vose, 1997). Geçmiş çalışmalarda, iklim değişikliğinin parametre bazında modellenmesinde, referans veri olarak, KDM'lerin geçmişe yönelik tahminlerinden elde edilen projeksiyon verilerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma geçmiş projeksiyon verilerinin referans olarak kullanılması durumunda elde edilecek yağış ve sıcaklık anomalilerine alternatif olarak, kaydedilmiş gerçek verilerin referans alındığı durumun incelemesini içermektedir. Çalışma bu yönüyle, yapılan iklimsel modellemelerden elde edilen çıktıların farklı bir perspektifle

değerlendirilmesini olanaklı kılacaktır. Ayrıca çalışma kapsamında elde edilen anomali bulgularının gelecek çalışmalara katkıda bulunması beklenmektedir.

Bu çalışmada, IPCC 5. Değerlendirme raporunda önerilen RCP4.5 ve RCP8.5 konsantrasyon senaryosu etkisi altında GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM yağış ve sıcaklık anomalileri incelenmiştir. Referans periyot olarak 1971-2000 yılları aralığındaki gözlenmiş verilerin ve geçmiş projeksiyon verilerinin dönemsel ortalamaları kullanılmıştır. Geçmiş projeksiyon verilerine karşılık olarak gözlenmiş verilerin etkinliği hakkında değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada referans olarak seçilen projeksiyon veya gözlenmiş verilerin etkinlikleri hususunda geniş kapsamlı bulgular elde edilmiştir. Çalışmanın, kritik öneme sahip olan veri seçimi konusunda gelecek çalışmalar için referans oluşturması beklenmektedir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler**

Havza, yeryüzünün geniş alanlı çukurlukları olarak tanımlanmaktadır (İzberak 1992). Havzalar özelliklerine göre jeolojik, jeomorfolojik, hidrografik havza gibi tiplere ayrılmaktadır. Hidrografik havza herhangi bir yerde suların direne edildiği alanları kapsamaktadır. Bir bakıma, su kütlesinin yağış alanı ile eşleşmektedir. Hidrografik havzalar, bir akarsu havzası olabileceği gibi bazen bir göl veya deniz havzası da olabilir (Garipağaoğlu 2012). Türkiye'de belirlenmiş 26 ana akarsu havzası bulunmaktadır. Bunlar içerisinde Doğu Karadeniz Havzası Türkiye'de 2018 yılında 1149 mm yağış alarak Türkiye'nin en fazla yağış alan havzası konumundadır (MGM 2019). Bu özelliğiyle Çoruh Havzası, Akdeniz Havzası ve Fırat Havzası gibi diğer önemli havzaların önündedir.



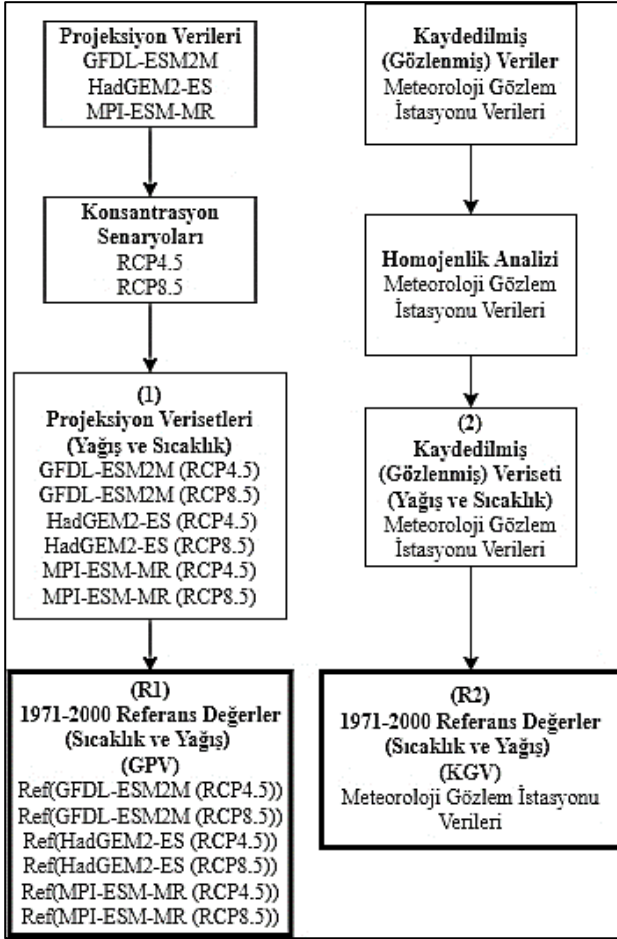
Şekil 1. Doğu Karadeniz Havza sınırları



Şekil 2. Doğu Karadeniz Havzası üzerinde çalışmada kullanılan MGİ'lerin konumu

2019 yılı verilerine göre; Doğu Karadeniz Havzası'nın ortalama yıllık akışı  $16,4 \text{ km}^3$  olup, havzanın Türkiye su potansiyeline iştirak oranı %8,9'dur ve Doğu Karadeniz Havzası Fırat-Dicle Havzası'nın ardından Türkiye'de en yüksek su potansiyeline iştirak oranına sahip ikinci havzadır (Int Kyn. 1). Türkiye su potansiyeli açısından önemli bir yeri olan Doğu Karadeniz Havzası'nda Trabzon, Rize illerinin tamamı, Ordu'nun çok büyük bir kısmı, Giresun ve Gümüşhane'nin büyük çoğunluğu ile Artvin ilinin merkezi ve karasal ilçeleri dışında Karadeniz kıyı kuşağında bulunan ilçeleri yer almaktadır (Şekil 1). Çalışmada referans veri olarak kullanılacak kaydedilmiş veriler, farklı özelliklere sahip 11 Meteoroloji Gözlem İstasyonu'ndan (MGİ) sağlanmıştır. Şekil 2'de Doğu Karadeniz Havzası'nda çalışmada kullanılan MGİ'ler gösterilmiştir. Seçilen bu 11 MGİ'de kaydedilmiş günlük sıcaklık ve yağış

verileri ham olarak alınmıştır. Alınan verilerin kalibrasyon kusurları, kayıt hataları gibi etkenlerden etkilenmesi durumuna karşılık tüm verilerin homojenliği incelenmiştir. Yapılan homojenlik incelemesine ait çıktılar Bölüm 3'te sunulmuştur. Geçmiş projeksiyon verileri, RCP4.5 ve RCP8.5 etkisi altında, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'lerin geriye doğru çalıştırılması ile elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan referans verilerin ve anomali hesaplamasında kullanılan verilerin hazırlanma aşamaları Şekil 3'te görülmektedir.



**Şekil 3.** Çalışmada kullanılan verilerin ve referans verilerin hazırlanması

## 2.2 Küresel Dolaşım Modelleri ve Konsantrasyon Senaryoları

KDM'ler küresel ölçekte, iklimsel parametreleri, okyanusları ve canlı aktivitelerini esas alarak geliştirilen iklimsel modellerdir. KDM'ler yüksek donanım gücü gerektirdiğinden geliştirilmesi ve geliştirilen modelin çalıştırılması yalnızca yüksek işlem gücü barındıran tesislerde yapılabilmektedir. Dünya'da Amerika, İngiltere, Almanya gibi ülkeler başta olmak üzere çeşitli ülkelerden enstitüler KDM geliştirmektedir. Gelişen teknoloji ile bilgisayar kaynaklarının artan işlem gücü, KDM gelişimini de olumlu yönde etkilemiştir. Sınırlı girdi parametresi kullanılarak çalıştırılan KDM'ler günümüzde deniz buzları, sülfat, aerosoller gibi gazlar ve bitki örtüsü çeşitliliği de dahil olmak üzere çok sayıda parametrenin eklenmesiyle geliştirilmiştir (Watanabe *et al.* 2008).

Çalışmada farklı iklimsel eğilimlerin değerlendirilebilmesi amacıyla, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR olmak üzere üç farklı KDM verisi kullanılmıştır. GFDL Amerikan Ulusal

Okyanus ve Atmosfer İdaresi tarafından geliştirilmiş bir modeldir. GFDL modelinde birleştirilmiş atmosfer ve okyanus çevrimi ve atmosfer kimyası parametreleri girdi olarak kullanılmaktadır. HadGEM2-ES KDM İngiltere Meteoroloji Servisi tarafından geliştirilen bir modeldir. Bu model GFDL model parametrelerine ek olarak dinamik vejetasyon parametrelerini de içermektedir. Çalışmada kullanılan diğer bir model Max Plank Enstitüsü tarafından geliştirilen MPI-ESM-MR su ve karbondioksit alışverişi neticesinde atmosfer-kara yüzeyi arasındaki enerji alışverişi de eklenerek diğer etkilerle ortak değerlendirme yapılması sağlanmıştır.

Konsantrasyon senaryoları, atmosferde birikerek iklimde değişikliklere neden olan sera gazı konsantrasyonlarının incelenmesi ve yerküredeki aktivitelerin gelecekteki durumuna göre 22. yüzyıla kadar erişileceği düşünülen seviyelere göre belirlenerek IPCC AR5 raporunda yer almıştır (Stocker *et al.* 2014). Konsantrasyon senaryoları radyatif zorlama ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) konsantrasyonuna göre sınıflandırılmaktadır. RCP8.5 olumsuz kategorideki konsantrasyon senaryosu olup, RCP4.5 olumsuz etkilerin belirli bir değerde sabit kalacağı öngörüsünü içerdiğinden iyimser kategoridedir. Çizelge 1'de çalışmada kullanılan RCP4.5 ve RCP8.5 konsantrasyon senaryolarının detayları görülmektedir.

**Çizelge 1.** RCP4.5 ve RCP8.5 konsantrasyon senaryolarının radyatif zorlama ve CO<sub>2</sub> eşdeğer konsantrasyon değerleri

RCP	Radyatif Zorlama (W/m <sup>2</sup> )	Z	Radyatif Zorlama Değişimi	2100'de Toplam Kons. (CO <sub>2</sub> eşdeğer)	Kons. (KYOTO Protokolü sera gazları)
8.5	>8,5	2100' de	Yükselme	~1370 ppm	2100'e kadar artış devam ediyor
4.5	~4,5	2100 önce si	Hedefi geçmeden stabilizasyon	~650 ppm	21. yüzyılın ortalarından itibaren düşüş

Z: Zaman; Kons.: Konsantrasyon

## 2.3 Homojenlik İncelemesinde Kullanılan Yöntemler

Hidrolojik ve meteorolojik gözlemlere dayanan veri toplama işlemleri modelleme çalışmalarından elde

edilecek bulguların doğruluğu açısından önemlidir. Atmosferik koşulların ani değişimi, istasyonun bulunduğu bölgelerdeki lokal değişimler, veri aktarma ve dijitalleştirme sırasında çıkabilecek problemler, istasyonların zarar görmesi, eksik verilerin sentetik olarak tamamlanması, ölçüm aletlerindeki kalibrasyon kusurları gibi nedenlerle istasyonlarda kaydedilen verilerin homojenliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Hidrolojik veri setlerinin homojenliğinin sınanmasında kullanımı literatürde önerilen (Che Ros *et al.* 2016, Toreti *et al.* 2011) sırasıyla; Buishand's Test (BT) (Buishand, 1982), Pettitt's Test (PT) (Pettitt, 1972), Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) (Alexandersson, 1986) ve von Neumann Ratio Test (VNRT) (Von Neumann, 1941) yöntemleri çalışmada gözlem verilerinin homojenliği olmak üzere kullanılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler

Çalışmada seçilen 11 MGİ'de kaydedilmiş günlük yağış ve sıcaklık verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'den temin edilmiştir. Günlük hassasiyette alınan veri setlerinde veri sayısının fazla olması kullanılacak homojenlik testlerini sınırlamaktadır. Bu duruma karşı literatürde önerilen çözüm, veri setlerinin daha küçük alt serilere ayrılması olmuştur (Kang ve Yusof 2012). Literatürde hidrolojik ve meteorolojik veri setlerinin homojenlik incelemelerinde kullanılan BT, PT, SNHT ve VNRT yöntemlerinin kullanılması için veri setleri aylık alt serilere ayrılmıştır. Her parametre için ana kütle temsil edecek şekilde sırasıyla, aylık ortalama, aylık medyan ve aylık maksimum değerlerinden oluşan üç alt seri elde edilmiştir. Alt seriler, BT, PT, SNHT ve VNRT analizleri ile değerlendirilerek her ana kütle için toplam 12 Performans Katsayısı (PK) elde edilmiştir. Homojenlik analizlerinin değerlendirilmesi için çok sayıda PK'nın birlikte yorumlanması gerekliliği oluşmuştur. PK'lar skor değerlendirmesi adı altında her bir alt serinin her bir yöntemdeki homojenliğine bakılarak değerlendirilmiştir. Skor değerlendirmesinde kullanılan sınır değerler

Çizelge 2'de gösterilmiştir. Homojenlik analizlerinden elde edilen PK'lar sıcaklık için Çizelge 3'te, yağış için Çizelge 4'te ve skor değerlendirmesi sonucunda sıcaklık ve yağış parametreleri için homojenlik durumu Çizelge 5'te gösterilmektedir.

Homojenlik analizlerinden elde edilen performans katsayılarına göre skor değerlendirmesi yapılmıştır. Skor değerlendirmesi sonuçlarına bakıldığında MGİ'lerde kaydedilmiş sıcaklık ve yağış verilerinin homojen olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sayede gözlenmiş sıcaklık ve yağış verilerinin anomali hesaplamasında gerçeğe uygun olmayan çıktı elde etmeyeceği düşünülmüştür.

**Çizelge 2.** Homojenlik skor değerlendirmesi kritik sınır değerleri

Önerme	Durum
$\sum S \geq 8$	Homojen
$5 \leq \sum S < 8$	Kullanılabilir
$\sum S < 5$	Şüpheli

$\sum S$ : alt serinin toplam skoru

#### 3.2 Anomali Hesaplamalarında Referans Veri Etkinliği Değerlendirmesi

Çalışmanın bu bölümünde yağış ve sıcaklık parametrelerinde anomaliler belirlenirken esas alınan referans verilerin etkinliği incelenmiştir. Çalışmada referans alınan dönem 1971-2000 aralığı olarak belirlenmiştir. 2022-2040 (P1), 2041-2070 (P2) ve 2071-2099 (P3) dönemlerinde, sıcaklık ve yağış verileri için GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'lerin RCP4.5 ve RCP8.5 projeksiyon verileri kullanılarak, dönemsel ortalama anomali değerleri hesaplanmıştır. Anomali incelemeleri ayrı ayrı iki kısımda yapılmış ve elde edilen bulgular kıyaslanarak değerlendirilmiştir. İlk kısımda Geçmiş Projeksiyon Verileri (GPV) referans alınmış, ikinci kısımda Kaydedilmiş Geçmiş Veriler (KGV) referans alınmış ve bu değerler gelecek projeksiyon verilerinin P1, P2 ve P3 dönemlerinde ortalama anomali hesaplamalarında kullanılmıştır. GPV'lerin P1, P2 ve P3 ortalamaları alınarak dönemsel ortalama referans veriler



oluşturulmuştur. Gelecek projeksiyon verilerinde de aynı dönemler için uzun yıllar ortalama değerler belirlenmiş, bu ortalama değerlerin referans verilerden farklılıkları tespit edilerek, sıcaklık ve yağış veri setlerinde anomaliler hesaplanmıştır. Sıcaklık ve yağış verileri için anomali çıktıları Çizelge 6a ve 6b'de gösterilmiştir.

KGV'lerde dönemsel ortalama değerler belirlenerek referans değerler oluşturulmuştur. Farklı KDM verilerinin anomalileri benzer şekilde P1, P2 ve P3 dönemleri için hesaplanmıştır. Hesaplanan sıcaklık ve yağış anomalileri Çizelge 7a ve 7b'de gösterilmiştir. Çalışmanın esas amacı olan referans verideki değişimin anomali değerleri üzerindeki etkinliği, KGV ve GPV referans değerlerinden hesaplanan anomalilerin birbirine göre rölatif farklılığı belirlenerek değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede negatif verilerin bulunması nedeniyle iki farklı verinin mutlak farkları kullanılmıştır. Mutlak farkların, GPV referans alınarak hesaplanmış anomali değerine göre yüzdesine bakılmıştır. Farklı referans verilerden hesaplanmış anomalilerin değerlendirilmesi Eşitlik 1'deki gibi yapılmıştır. Burada, RF rölatif fark,  $A_{KGV}$  KGV referans değerleri esas alınarak,  $A_{GPV}$  GPV referans değeri esas alınarak hesaplanan anomali değerini göstermektedir.

$$RF = \frac{|A_{KGV}| - |A_{GPV}|}{A_{GPV}} \quad (1)$$

Hesaplanan rölatif farklarda GPV referans alınarak elde edilen anomali değerleri esas alınmıştır. GPV KDM'lerin geriye doğru çalıştırılması ile elde edilmiş projeksiyon verileri olup literatürde benzer hesaplarda kullanımı yaygındır. Gerçek veriler kullanılarak referans oluşturulan durum, literatürde elde edilen bulguları değerlendirme imkanı sunmaktadır. Sıcaklık ve yağış anomalilerindeki rölatif farklar Çizelge 8a ve 8b'de görülmektedir.

KGV referans alındığında sıcaklık anomalilerinin istasyonların çoğunda negatif değer aldığı görülmektedir. Negatif bulunan bu değerler incelenen P1, P2 ve P3 dönemlerinde uzun yıllar ortalama sıcaklıkların, referans verilerden daha düşük olacağını göstermektedir. Bu durumda literatürdeki yaygın bulgulardan farklı olarak, incelenen bölgelerde iklim değişikliğinin, uzun

dönem sıcaklık ortalamalarında düşüş olarak kendini göstereceği belirlenmiştir. GPV referans alınarak belirlenen sıcaklık anomalileri literatürdeki bulgulara paralel olmuş ve istasyonların çoğunda pozitif değerler almıştır.

GPV referans alındığında sıcaklık anomalilerinin pozitif yönde olduğu ve havzada referans değerlere göre daha yüksek sıcaklıkların gerçekleşeceği görülmektedir. GPV referans durumunda sıcaklık anomalilerinin değişim yönü benzer olsa da P1'den P3 doğru gidildikçe artan yönde olduğu görülmektedir. Havza genelinde GPV referans alındığında sıcaklıklarda P3 dönemine kadar ortalama 2,5°C artış olacağı görülmektedir. Artan sıcaklıklara karşın yağışlarda ciddi farklılıkların yaşanmayacağı, istasyonlarda dönemsel yağışların referans değerlere yakın olacağı görülmektedir.

Elde edilen rölatif fark bulgularının negatif olması KGV'lerin referans alındığı durumdan elde edilen anomalilerin, GPV'lerin referans alındığı duruma göre daha küçük olduğunu göstermektedir. Çizelge 8a ve 8b'deki bulgulara göre gözlenmiş gerçek verilerin, projeksiyon verilerinin yerine referans veri olarak kullanılması anomalilerde literatüre göre büyük farklılıklar ortaya çıkarmıştır. KGV referans kullanımında sıcaklıklarda gelecek dönemde kritik düşüşler olacağı görülmüştür. Bu düşüşlerle birlikte yağışlarda 17040, 17089, 17628 ve 17033 istasyonlarında negatif anomali değerleri bulunmuştur. Bu durumda Rize, Bayburt ve Ordu illerinde bulunan bu istasyonlarda dönemsel ortalama yağışların ciddi oranda azalacağı görülmektedir. GPV'lerin referans kullanılması durumuna göre KGV'lerin referans kullanılmasından elde edilen anomali bulgularındaki rölatif farklılıklar konsantrasyon senaryoları ve KDM setlerine göre Çizelge 9'da gösterilmiştir. Çizelge 9'a göre KDM seti ve konsantrasyon senaryosu seçiminin, aynı zaman aralığında elde edilecek anomali değerlerinde farklılık oluşturduğu görülmektedir.

#### **4. Tartışma ve Sonuç**

Çalışmadan elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, KDM seti ve konsantrasyon senaryosu seçiminin sıcaklık ve yağış anomali bulgularını direkt etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Bunlara ek olarak çalışmadan elde edilen bulgular, anomalileri hesaplamalarını etkileyen en önemli parametreler arasında referans veri seçiminin olduğunu göstermiştir. Referans veri olarak KGV ve GPV'lerin incelendiği bu çalışmada, farklı referans veri grubu seçiminin sıcaklık anomalilerinde 3 kata, yağış anomalilerinde ise 34 kata kadar değişim gösterebileceği görülmüştür. KGV referans alınarak hesaplanan anomalilerde bölgelere göre büyük farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu farklılıkların esas kaynağı olarak, projeksiyon verileri elde edilirken yapılan istatistiki ön kabuller neticesinde bölgesel ortalama değerler elde edilmesi gösterilebilmektedir. Projeksiyon verileri büyük alanları (20\*20 km gibi) kapsayacak gridler için üretilmekte ve üretilen bu değerler daha küçük alanları kapsayacak şekilde çeşitli istatistiksel metotlar veya dinamik yöntemler kullanılarak iteratif olarak sürüklenmektedir. Verinin sürüklenmesi sırasında istasyonun bulunduğu bölgenin topografik yapısı, yakınında bulunan yükselteler, arazi kullanım durumu gibi pek çok dış faktör pratikte etkindir ancak istatistiksel sürüklemeye göz ardı edilebilmektedir. Bu sebeple projeksiyon verileri istatistiki ön kabuller içermektedir. Aynı projeksiyon verilerinin geçmiş yönde çalıştırılması sırasında da benzer ön kabuller yapıldığından anomali hesaplamalarında büyük farklılıklar oluşmamaktadır. KGV'lerde ise bölgeden ölçülen gerçek veriler kullanıldığından istatistiksel ön kabullerle bölgeye indirgenmiş verilere kıyasla büyük farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar özellikle topografik yapının etkin rol oynadığı yağış parametresi için hesaplanan anomali değerlerinde kendini göstermektedir.

Çalışmada en büyük negatif yağış anomali değerine erişen istasyonlar Rize ilindeki 17040 ve 17628 numaralı istasyonları olmuştur. Farklılıklar gerçek verilere kıyasla -1800 mm'ye ulaşan düzeyde belirlenmiştir. İncelenen P1, P2 ve P3 dönemleri için iki istasyonun ortalama yağış anomalisi ortalama -1450 mm civarında görülmektedir. Büyük negatif yağış anomali değeri elde edilen 17089 ve 17033 istasyonları için de toplu yapılan değerlendirme neticesinde, bu istasyonlar dışında kalan istasyonlarda yağış anomalilerinin referans değerden benzer şekilde değişim göstermiş olması

ve ekstrem farklı değerler almamış olması, gelecek projeksiyon verilerinin bölgeye uygunluğu açısından detaylı olarak irdelenmesi gereken bir konudur.

Bu durumda özellikle yağış anomalilerinde eğim ve engebeli topoğrafyanın büyük alanlar kapladığı Doğu Karadeniz Havzası gibi yerlerde KDM'lerin mevcut çözünürlükleri yeterli kalmamakta ve lokal alanların projeksiyonlarını zorlaştırmaktadır. Bu sebeple özellikle eğimli, engebeli ve yükseltinin fazla olduğu alanlarda yapılan iklim projeksiyonlarında topografik engeller, yükselti durumu ve çevre arazilerinin kullanım biçimi de veri indirgeme esnasında parametre olarak dikkate alınmalıdır. Ülkemizin en dağlık engebeli topoğrafyalarından olan Doğu Karadeniz Havzasında ancak yükselti ve eğim gibi parametreler dikkate alındığında projeksiyon verileriyle daha gerçekçi sonuçlara erişileceği ve iklim değişikliğinin olası olumsuz sonuçları ile mücadele için yapılan planlama çalışmalarının da daha başarılı olabileceği söylenebilmektedir. Ayrıca bu durum iklim projeksiyonları üzerinde lokal faktörlerin de genel koşullar kadar etkili olduğunu göstermektedir ve yapılacak çalışmalarda dikkate alınmalıdır. Kullanılacak projeksiyon ilk geliştirildiği haliyle kullanılmamalıdır. Yörenin lokal doğal ortam özelliklerini dikkate alarak ölçek küçültme yapılmalıdır. Gelecek çalışmalarda bölge için farklı KDM setlerinin incelenmesi ve geliştirilmesi literatüre ve bölgede yapılacak planlamalara katkı sağlayacaktır.



**Çizelge 3.** İstasyonlara göre sıcaklık verileri için aylık ortalama, aylık medyan ve aylık maksimum alt serilerin homojenlik analizi performans katsayıları

İstasyon	HA <sup>a</sup>	Ort <sup>b</sup>	Med <sup>c</sup>	Mak <sup>d</sup>	İstasyon	HA <sup>a</sup>	Ort <sup>b</sup>	Med <sup>c</sup>	Mak <sup>d</sup>
<b>17034</b>	BT	13,705	14,370	15,783	<b>17626</b>	BT	12,527	13,594	17,442
	PT	1954	1870	1965		PT	2286	2070	2625
	SNHT	2,978	3,068	2,179		SNHT	2,687	2,883	3,583
	VNRT	<b>0,338</b>	<b>0,340</b>	<b>0,854</b>		VNRT	<b>0,354</b>	<b>0,355</b>	<b>0,806</b>
<b>17037</b>	BT	8,269	8,248	8,419	<b>17628</b>	BT	9,118	9,625	7,866
	PT	278	275	217		PT	368	364	447
	SNHT	6,177	6,53	2,799		SNHT	2,791	3,054	3,727
	VNRT	<b>0,345</b>	<b>0,357</b>	<b>0,775</b>		VNRT	<b>0,353</b>	<b>0,355</b>	<b>0,61</b>
<b>17040</b>	BT	8,15	8,481	7,568	<b>17682</b>	BT	11,942	11,745	15,183
	PT	351	336	387		PT	1855	<b>1740</b>	2832
	SNHT	2,958	3,201	4,33		SNHT	2,158	2,156	2,346
	VNRT	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	<b>0,502</b>		VNRT	<b>0,363</b>	<b>0,394</b>	<b>0,414</b>
<b>17088</b>	BT	7,421	7,555	7,243	<b>17033</b>	BT	12,896	12,168	16,333
	PT	<b>249</b>	<b>251</b>	<b>233</b>		PT	2556	2316	3078
	SNHT	5,59	5,915	5,243		SNHT	3,144	3,29	4,017
	VNRT	<b>0,344</b>	<b>0,361</b>	<b>0,402</b>		VNRT	<b>0,332</b>	<b>0,334</b>	<b>0,714</b>
<b>17089</b>	BT	12,525	12,187	10,063	<b>17624</b>	BT	12,551	13,527	17,774
	PT	1982	1846	<b>1668</b>		PT	2222	1969	2735
	SNHT	2,392	2,210	3,310		SNHT	5,966	6,116	4,144
	VNRT	<b>0,339</b>	<b>0,358</b>	<b>0,378</b>		VNRT	<b>0,344</b>	<b>0,345</b>	<b>0,801</b>
<b>17042</b>	BT	11,588	12,25	9,273					
	PT	3,686	442	407					
	SNHT	6,027	4,529	1,861					
	VNRT	<b>0,372</b>	<b>0,371</b>	<b>0,862</b>					

<sup>a</sup>Homojenlik Analizi Yöntemi, <sup>b</sup>Aylık Ortalama Alt Seri, <sup>c</sup>Aylık Medyan Alt Seri, <sup>d</sup>Aylık Maksimum Alt Seri

Koyu punto ile yazılmış performans katsayıları homojenlik için referans dışı birim olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4.** İstasyonlara göre yağış verileri için aylık ortalama, aylık medyan ve aylık maksimum alt serilerin homojenlik analizi performans katsayıları

İstasyon	HA <sup>a</sup>	Ort <sup>b</sup>	Med <sup>c</sup>	Mak <sup>d</sup>	İstasyon	HA <sup>a</sup>	Ort <sup>b</sup>	Med <sup>c</sup>	Mak <sup>d</sup>
<b>17034</b>	BT	19,243	16,118	21,337	<b>17626</b>	BT	24,545	28,917	23,036
	PT	1981	<b>5751</b>	2345		PT	4251	3917	3769
	SNHT	3,702	6,098	2,508		SNHT	4,435	5,482	2,459
	VNRT	<b>1,669</b>	1,917	1,840		VNRT	<b>1,581</b>	<b>1,333</b>	<b>1,761</b>
<b>17037</b>	BT	7,588	10,804	10,251	<b>17628</b>	BT	10,72	12,888	12,217
	PT	216	373	329		PT	503	1035	423
	SNHT	4,223	<b>17,367</b>	3,307		SNHT	2,442	2,507	2,856
	VNRT	<b>1,576</b>	<b>1,558</b>	1,725		VNRT	<b>1,492</b>	1,876	<b>1,389</b>
<b>17040</b>	BT	11,606	8,562	10,217	<b>17682</b>	BT	13,317	24,398	23,210
	PT	689	346	436		PT	<b>1713</b>	2598	4442
	SNHT	2,8	1,877	2,372		SNHT	2,772	5,662	5,325
	VNRT	<b>1,301</b>	<b>1,931</b>	<b>1,455</b>		VNRT	<b>1,462</b>	2,036	<b>1,744</b>
<b>17088</b>	BT	14,511	9,729	14,198	<b>17033</b>	BT	8,025	<b>25,531</b>	16,463
	PT	432	383	637		PT	2566	2316	3078
	SNHT	3,734	4,147	6,336		SNHT	3,581	7,659	3,053
	VNRT	<b>1,319</b>	1,954	1,847		VNRT	<b>1,778</b>	<b>1,720</b>	1,953
<b>17089</b>	BT	25,342	16,145	28,746	<b>17624</b>	BT	15,373	27,482	27,340
	PT	5416	2223	5042		PT	3007	4275	2418
	SNHT	4,426	4,426	7,829		SNHT	3,013	7,911	4,803
	VNRT	<b>1,549</b>	1,872	<b>1,802</b>		VNRT	1,842	<b>1,754</b>	1,886
<b>17042</b>	BT	8,715	8,117	14,72					
	PT	615	576	506					
	SNHT	6,225	1,536	5,908					
	VNRT	<b>1,368</b>	1,964	<b>1,161</b>					

<sup>a</sup>Homojenlik Analizi Yöntemi, <sup>b</sup>Aylık Ortalama Alt Seri, <sup>c</sup>Aylık Medyan Alt Seri, <sup>d</sup>Aylık Maksimum Alt Seri

Koyu punto ile yazılmış performans katsayıları homojenlik için referans dışı birim olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 5.** BT, PT, SNHT ve VNRT homojenlik analizleri performans katsayılarından elde edilen skor değerleri

İstasyon	P	Sonuç	T	Sonuç	İstasyon	P	Sonuç	T	Sonuç
17034	10	Homojen	9	Homojen	17626	9	Homojen	9	Homojen
17037	9	Homojen	9	Homojen	17628	10	Homojen	9	Homojen
17040	9	Homojen	9	Homojen	17682	9	Homojen	8	Homojen
17088	11	Homojen	6	Kullanılabilir	17033	9	Homojen	9	Homojen
17089	10	Homojen	8	Homojen	17624	11	Homojen	9	Homojen
17042	10	Homojen	9	Homojen					

**Çizelge 6a.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında GPV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan sıcaklık anomali tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (°C)			HadGEM2-ES (°C)			MPI-ESM-MR (°C)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	S45	0,9	1,5	1,4	1,8	2,5	2,9	0,9	1,4	1,6
	S85	1,3	2,1	3,0	1,9	3,2	4,8	0,9	2,0	3,6
17037	S45	0,9	1,4	1,3	1,8	2,4	2,9	0,9	1,4	1,7
	S85	1,2	2,0	2,9	1,9	3,1	4,7	0,9	2,1	3,6
17040	S45	1,0	1,5	1,3	1,9	2,5	3,0	0,8	1,3	1,6
	S85	1,3	2,1	2,9	2,1	3,3	5,0	0,8	2,0	3,6
17042	S45	1,0	1,5	1,4	1,8	2,4	2,9	1,0	1,4	1,7
	S85	1,3	2,1	3,1	2,0	3,2	4,9	0,9	2,1	3,8
17088	S45	0,9	1,7	1,6	1,9	2,6	3,1	1,0	1,6	1,9
	S85	1,4	2,3	3,4	2,1	3,5	5,3	1,0	2,4	4,1
17089	S45	1,1	1,8	1,8	1,8	2,6	3,2	1,1	1,7	2,1
	S85	1,5	2,5	3,6	2,1	3,5	5,4	1,2	2,6	4,3
17626	S45	0,9	1,4	1,4	1,8	2,4	2,9	0,9	1,4	1,7
	S85	1,2	2,1	3,0	1,9	3,2	4,8	1,0	2,1	3,8
17628	S45	0,9	1,4	1,3	1,8	2,4	2,8	0,9	1,3	1,6
	S85	1,2	2,0	2,9	1,9	3,1	4,8	0,8	2,0	3,7
17682	S45	1,0	1,8	1,7	1,8	2,6	3,1	1,0	1,6	2,0
	S85	1,5	2,5	3,5	2,1	3,4	5,3	1,1	2,5	4,2
17624	S45	1,0	1,5	1,4	1,9	2,5	3,0	0,9	1,5	1,7
	S85	1,3	2,1	3,0	1,9	3,2	4,9	1,0	2,1	3,6
17033	S45	0,9	1,4	1,3	1,9	2,4	2,9	0,8	1,4	1,6
	S85	1,2	2,0	3,0	1,9	3,2	4,8	0,9	2,1	3,6

\*S45: RCP4.5 etkisi altında sıcaklık veri seti, S85:RCP8.5 etkisi altında sıcaklık veri seti

**Çizelge 6b.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında GPV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan yağış anomali tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (mm)			HadGEM2-ES (mm)			MPI-ESM-MR (mm)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	Y45	-167,6	-85,6	-21,2	-185,7	-160,9	-44,1	38,0	18,0	-40,2
	Y85	-8,6	-66,4	-130,9	-51,3	-145,5	-126,2	-20,0	-103,5	-266,5
17037	Y45	-5,8	2,6	13,1	-97,7	-35,8	44,5	9,2	-41,7	-65,9
	Y85	59,9	57,5	41,6	74,7	-55,0	-52,2	-54,9	-92,5	-219,7
17040	Y45	-12,8	39,9	69,2	-7,5	-20,6	61,7	64,2	49,3	25,3
	Y85	36,9	93,5	100,2	-37,3	27,7	12,4	89,7	17,9	-38,8
17042	Y45	-36,7	63,3	119,9	-11,2	-11,4	160,2	31,1	44,3	34,8
	Y85	58,3	145,6	128,1	53,1	31,3	27,1	80,3	13,0	-15,2
17088	Y45	-23,3	9,0	15,0	-36,0	-29,4	38,4	27,8	-0,5	-13,5
	Y85	45,6	21,9	-13,0	-23,8	-21,1	-23,5	31,5	-32,5	-31,9
17089	Y45	-38,5	-24,6	-10,1	20,1	-26,9	50,8	20,3	18,7	-3,5
	Y85	26,4	-9,5	-29,8	-5,0	6,3	-2,2	26,9	-33,1	15,3
17626	Y45	3,3	46,4	38,2	-56,3	-25,8	50,7	34,0	7,5	-31,3
	Y85	56,6	69,2	47,4	34,8	-56,1	-17,5	-15,4	-65,0	-135,2
17628	Y45	7,5	71,3	134,5	91,3	79,2	244,8	54,5	88,6	40,5
	Y85	59,7	130,7	154,3	49,6	145,2	91,1	111,2	11,8	-6,5
17682	Y45	-45,1	-31,9	-15,9	-19,8	-24,9	22,1	9,8	-8,6	-5,6
	Y85	12,4	-30,6	-53,1	6,0	-5,8	-11,4	22,2	-29,3	-10,6
17624	Y45	-7,5	8,1	11,7	-3,7	-6,6	4,6	6,7	2,0	1,8
	Y85	-2,5	5,6	4,2	2,8	3,3	19,3	1,1	-1,1	-3,6
17033	Y45	-110,0	-93,1	14,2	-112,9	-56,4	-9,7	37,1	8,0	-1,1
	Y85	1,4	-37,8	-97,1	-20,1	-65,4	-44,4	-17,0	-73,3	-138,1

\*Y45: RCP4.5 etkisi altında yağış veri seti, Y85:RCP8.5 etkisi altında yağış veri seti

**Çizelge 7a.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında KGV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan sıcaklık anomali tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (°C)			HadGEM2-ES (°C)			MPI-ESM-MR (°C)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	S45	-5,0	-4,5	-4,6	-2,3	-1,6	-1,1	-3,1	-2,6	-2,3
	S85	-4,8	-3,9	-2,9	-2,1	-0,9	0,8	-3,1	-2,0	-0,3
17037	S45	-5,2	-4,7	-4,7	-2,4	-1,7	-1,2	-3,1	-2,6	-2,3
	S85	-4,9	-4,1	-3,1	-2,2	-1,1	0,7	-3,1	-2,0	-0,3
17040	S45	-3,2	-2,7	-2,8	-0,6	0,1	0,6	-1,5	-1,0	-0,6
	S85	-3,0	-2,1	-1,2	-0,4	0,7	2,6	-1,5	-0,3	1,4
17042	S45	-5,0	-4,2	-4,2	-2,1	-1,3	-0,8	-3,1	-2,5	-2,1
	S85	-4,5	-3,5	-2,4	-1,8	-0,5	1,5	-3,1	-1,7	0,1
17088	S45	-3,6	-2,8	-2,8	-0,6	0,3	0,8	-1,6	-1,0	-0,5
	S85	-3,1	-2,1	-0,9	-0,3	1,1	3,1	-1,5	-0,1	1,7
17089	S45	-5,4	-4,8	-4,9	-2,6	-1,9	-1,3	-3,3	-2,8	-2,5
	S85	-5,0	-4,2	-3,2	-2,3	-1,2	0,6	-3,3	-2,1	-0,4
17626	S45	-4,8	-4,2	-4,3	-1,9	-1,3	-0,7	-2,8	-2,2	-1,9
	S85	-4,5	-3,6	-2,6	-1,8	-0,6	1,2	-2,7	-1,5	0,1
17628	S45	-2,4	-2,0	-2,1	-0,1	0,6	1,1	-0,6	-0,1	0,2
	S85	-2,2	-1,4	-0,4	0,2	1,3	3,2	-0,6	0,6	2,2
17682	S45	-3,4	-2,6	-2,7	-0,6	0,3	0,8	-1,5	-0,9	-0,5
	S85	-3,0	-2,0	-0,8	-0,3	1,0	3,0	-1,4	0,0	1,8
17624	S45	-4,1	-3,6	-3,6	-1,4	-0,7	-0,2	-2,2	-1,6	-1,3
	S85	-3,8	-3,0	-2,0	-1,3	-0,1	1,7	-2,1	-0,9	0,7
17033	S45	-4,0	-3,5	-3,5	-1,3	-0,6	-0,1	-2,1	-1,5	-1,2
	S85	-3,7	-2,9	-1,9	-1,2	0,0	1,8	-2,1	-0,9	0,8

\*S45: RCP4.5 etkisi altında sıcaklık veri seti, S85:RCP8.5 etkisi altında sıcaklık veri seti

**Çizelge 7b.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında KGV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan yağış anomali tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (mm)			HadGEM2-ES (mm)			MPI-ESM-MR (mm)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	Y45	345	355	400	332	122	279	-31	-51	-128
	Y85	521	375	294	438	192	188	-89	-173	-350
17037	Y45	620	555	554	649	512	627	217	166	128
	Y85	679	611	582	788	541	520	153	116	-24
17040	Y45	-1741	-1719	-1692	-1682	-1744	-1659	-1651	-1665	-1694
	Y85	-1706	-1666	-1661	-1714	-1702	-1715	-1625	-1697	-1757
17042	Y45	342	338	338	342	245	324	250	222	203
	Y85	410	351	311	342	268	256	254	190	184
17088	Y45	450	426	436	385	253	338	217	215	185
	Y85	524	441	412	360	300	275	223	163	203
17089	Y45	-1082	-1042	-1003	-840	-990	-793	-1297	-1284	-1305
	Y85	-990	-959	-983	-777	-915	-946	-1248	-1315	-1356
17626	Y45	567	543	520	601	452	565	184	157	107
	Y85	605	566	533	669	464	477	134	85	1
17628	Y45	-1386	-1358	-1303	-930	-1065	-889	-1240	-1206	-1263
	Y85	-1344	-1298	-1281	-989	-1000	-1051	-1183	-1283	-1305
17682	Y45	9	-3	11	-25	-110	-51	-108	-126	-130
	Y85	73	-1	-29	-13	-73	-90	-95	-147	-136
17624	Y45	-91	-120	-26	-129	-211	-129	-317	-347	-366
	Y85	30	-65	-135	-44	-186	-169	-372	-428	-502
17033	Y45	-204	-233	-139	-242	-324	-242	-430	-460	-479
	Y85	-83	-178	-248	-157	-299	-282	-485	-541	-615

\*Y45: RCP4.5 etkisi altında yağış veri seti, Y85:RCP8.5 etkisi altında yağış veri seti

**Çizelge 8a.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında GPV-KGV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan sıcaklık anomalisi rölatif fark tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (RF*)			HadGEM2-ES (RF*)			MPI-ESM-MR (RF*)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	S45	4,4	2,1	2,3	0,3	-0,3	-0,6	2,6	0,9	0,4
	S85	2,8	0,9	0,0	0,1	-0,7	-0,8	2,7	0,0	-0,9
17037	S45	4,7	2,3	2,5	0,4	-0,3	-0,6	2,5	0,9	0,4
	S85	2,9	1,0	0,1	0,2	-0,7	-0,9	2,5	0,0	-0,9
17040	S45	2,3	0,9	1,1	-0,7	-1,0	-0,8	0,8	-0,3	-0,6
	S85	1,4	0,0	-0,6	-0,8	-0,8	-0,5	0,9	-0,9	-0,6
17042	S45	4,1	1,8	1,9	0,2	-0,5	-0,7	2,2	0,7	0,2
	S85	2,4	0,7	-0,2	-0,1	-0,8	-0,7	2,3	-0,2	-1,0
17088	S45	2,9	0,7	0,7	-0,7	-0,9	-0,7	0,6	-0,4	-0,7
	S85	1,3	-0,1	-0,7	-0,9	-0,7	-0,4	0,5	-1,0	-0,6
17089	S45	4,1	1,7	1,7	0,4	-0,3	-0,6	1,9	0,6	0,2
	S85	2,3	0,7	-0,1	0,1	-0,7	-0,9	1,8	-0,2	-0,9
17626	S45	4,4	1,9	2,1	0,1	-0,5	-0,8	2,0	0,6	0,1
	S85	2,6	0,8	-0,1	-0,1	-0,8	-0,7	1,9	-0,3	-1,0
17628	S45	1,6	0,4	0,6	-1,0	-0,7	-0,6	-0,3	-0,9	-0,9
	S85	0,7	-0,3	-0,9	-0,9	-0,6	-0,3	-0,2	-0,7	-0,4
17682	S45	2,3	0,5	0,6	-0,7	-0,9	-0,7	0,4	-0,5	-0,7
	S85	1,0	-0,2	-0,8	-0,9	-0,7	-0,4	0,3	-1,0	-0,6
17624	S45	3,0	1,4	1,6	-0,3	-0,7	-0,9	1,3	0,1	-0,2
	S85	2,0	0,4	-0,3	-0,4	-1,0	-0,6	1,2	-0,5	-0,8
17033	S45	3,4	1,4	1,7	-0,3	-0,7	-1,0	1,5	0,1	-0,2
	S85	2,1	0,4	-0,4	-0,4	-1,0	-0,6	1,4	-0,6	-0,8

\*S45: RCP4.5 etkisi altında sıcaklık veri seti, S85:RCP8.5 etkisi altında sıcaklık veri seti, RF: Rölatif fark.

**Çizelge 8b.** İstasyonlara göre GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR KDM'leri için farklı konsantrasyon senaryosu etkisi altında GPV-KGV referans alınarak (1971-2000) oluşturulan yağış anomalisi rölatif fark tablosu

İstasyon	Veri Türü*	GFDL-ESM2M (°C, mm)			HadGEM2-ES (°C, mm)			MPI-ESM-MR (°C, mm)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
17034	Y45	-1,1	-3,2	-17,9	-0,8	0,2	-5,3	-0,2	1,8	-2,2
	Y85	-59,4	-4,6	-1,2	-7,5	-0,3	-0,5	-3,5	-0,7	-0,3
17037	Y45	-105,3	213,4	41,4	-5,6	-13,3	13,1	22,5	-3,0	-0,9
	Y85	10,3	9,6	13,0	9,5	-8,8	-9,0	-1,8	-0,2	0,9
17040	Y45	-134,7	42,1	23,5	-223,7	-83,8	25,9	24,7	32,8	66,0
	Y85	45,2	16,8	15,6	-44,9	60,5	137,0	17,1	93,9	-44,2
17042	Y45	-8,3	4,3	1,8	-29,5	-20,5	1,0	7,1	4,0	4,8
	Y85	6,0	1,4	1,4	5,4	7,5	8,4	2,2	13,6	-11,2
17088	Y45	-18,3	46,5	28,0	-9,7	-7,6	7,8	6,8	-429,5	-12,7
	Y85	10,5	19,1	-30,7	-14,1	-13,2	-10,7	6,1	-4,0	-5,4
17089	Y45	-27,1	-41,3	-98,0	40,8	-35,7	14,6	62,9	67,5	-374,5
	Y85	36,6	-100,4	-32,0	-153,5	144,0	-421,3	45,5	-38,7	87,6
17626	Y45	171,7	10,7	12,6	-9,7	-16,5	10,2	4,4	19,8	-2,4
	Y85	9,7	7,2	10,2	18,2	-7,3	-26,2	-7,7	-0,3	1,0
17628	Y45	184,2	18,0	8,7	9,2	12,4	2,6	21,8	12,6	30,2
	Y85	21,5	8,9	7,3	19,0	5,9	10,5	9,6	108,1	-201,2
17682	Y45	0,8	0,9	0,3	-0,3	-3,4	1,3	9,9	-13,7	-22,2
	Y85	4,9	1,0	0,5	1,2	-11,6	-6,9	3,3	-4,0	-11,8
17624	Y45	-11,2	13,7	1,2	-33,6	-30,9	27,1	46,1	168,6	201,0
	Y85	-11,3	10,6	31,2	14,8	55,2	7,8	324,9	-386,8	-139,4
17033	Y45	-0,9	-1,5	8,8	-1,1	-4,7	-24,0	10,6	56,4	-423,9
	Y85	59,1	-3,7	-1,6	-6,8	-3,6	-5,4	-27,5	-6,4	-3,5

Y45: RCP4.5 etkisi altında yağış veri seti, Y85:RCP8.5 etkisi altında yağış veri seti, RF: Rölatif fark.

**Çizelge 9.** KGV ve GPV referans değerlerine göre hesaplanan anomalilerin Doğu Karadeniz Havzası genelinde ortalama RF değişim bulguları

Veri Türü	Konsantrasyon Senaryosu	GFDL-ESM2M (RF*)			HadGEM2-ES (RF*)			MPI-ESM-MR (RF*)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Sıcaklık	RCP4.5	3,4	1,4	1,5	-0,2	-0,6	-0,7	1,4	0,2	-0,2
	RCP8.5	2,0	0,4	-0,4	-0,4	-0,8	-0,6	1,4	-0,5	-0,8
Yağış	RCP4.5	4,5	27,6	0,9	-24,0	-18,5	6,8	19,7	-7,5	4,5
	RCP8.5	12,1	-3,1	1,3	-14,4	20,7	-28,7	33,5	-20,5	12,1

\*Rölatif Fark

## 5. Kaynaklar

- Alexandersson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, **6**, 661-675.
- Apata, T. G., 2011. Effects of global climate change on Nigerian agriculture: An empirical analysis. *CBN Journal of Applied Statistics*, **2**(1), 31-50.
- Buishand, T. A., 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, **58**, 11-27.
- Che Ros, F., Tosaka, H., Sidek, L. M. ve Basri, H., 2016. Homogeneity and trends in long-term rainfall data, Kelantan River Basin, Malaysia. *International Journal of River Basin Management*, **14**, 151-163.
- Garipağaoğlu, N., 2012. Havza planlamalarında coğrafyanın rolü ve Türkiye’de havza planlamacılığı. *Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, **16**, 303-336.
- Gaur, S., Bandyopadhyay, A., ve Singh, R. 2021. Modelling potential impact of climate change and uncertainty on streamflow projections: a case study. *Journal of Water and Climate Change*, **12**, 384-400.
- IPCC, 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 1245-1535.
- İzıbrak, R. 1992. Coğrafya terimleri sözlüğü. İstanbul: Milli Eğitim Basımevi.
- Kang, H. M. ve Yusof, F., 2012. Homogeneity tests on daily rainfall series. *International Journal of Contemporary Mathematical Sciences*, **7**, 9-22.
- Kay, A. L., Rudd, A. C., Fry, M., Nash, G., ve Allen, S. 2021. Climate change impacts on peak river flows: combining national-scale hydrological modelling and probabilistic projections. *Climate Risk Management*, **31**, 1-10.
- Kay, A. L., Rudd, A. C., Fry, M., Nash, G., ve Allen, S. 2021. Climate change impacts on peak river flows: combining national-scale hydrological modelling and probabilistic projections. *Climate Risk Management*, **31**, 1-9.
- Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Nawaz, N. ve Son, M., 2018. Performance assessment of general circulation model in simulating daily precipitation and temperature using multiple gridded datasets. *Water*, **10**, 1-18.
- Khoi, D. N. ve Phi, H. L., 2018. Impact of climate change on streamflow and water quality in the upper Dong Nai River Basin, Vietnam. *La Houille Blanche*, **1**, 70-79.
- Kohnova, S., Roncak, P., Hlavcova, K., Szolgay, J. ve Rutkowska, A., 2019. Future impacts of land use and climate change on extreme runoff values in selected catchments of Slovakia. *Meteorology Hydrology and Water Management Research and Operational Applications*, **7**, 47-55.
- Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., ve Xoplaki, E. 2012. Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic Change*, **114**, 667-687.
- Lübke, C., 2022. Socioeconomic roots of climate change denial and uncertainty among the European population. *European Sociological Review*, **38**, 153-168.
- Meissl, G., Formayer, H., Klebinder, K., Kerl, F., Schoberl, F., Geitner, C. ve Bronstert, A., 2017. Climate change effects on hydrological system conditions influencing generation of storm runoff in small Alpine Catchments. *Hydrological Processes*, **31**, 1314-1330.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), 2019. 2018 Yılı İklim Değerlendirmesi, Yayın No: 2019, Ankara.
- Pal, S. C., Chowdhuri, I., Das, B., Chakraborty, R., Roy, P., Saha, A., ve Shit, M., 2022. Threats of climate change and land use patterns enhance the susceptibility of future floods in India. *Journal of Environmental Management*, **305**, 1-10.

- Peterson, T. C., ve Vose, R. S., 1997. An overview of the global historical climatology network temperature database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**, 2837-2850.
- Pettitt, A. N., 1972. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, **28**, 126-135.
- Salman, S. A., Nashwan, M. S., Ismail, T., ve Shahid, S. 2020. Selection of CMIP5 general circulation model outputs of precipitation for peninsular Malaysia. *Hydrology Research*, **51**, 781-798.
- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L. ve Fixen, P. E., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **133**, 247-266.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J. ve Midgley, P. M., 2014. Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge.
- Swain, J. B. ve Patra, K. C., 2019. Impact assessment of land use/land cover and climate change on streamflow regionalization in an ungauged catchment. *Journal of Water and Climate Change*, **10**, 554-568.
- Toreti, A., Kuglitsch, F. G., Xoplaki, E., Della-Marta, P. M., Aguilar, E., Prohom, M. ve Luterbacher, J., 2011. A note on the use of the standard normal homogeneity test to detect inhomogeneities in climatic time series. *International Journal of Climatology*, **31**, 630-632.
- Toros, H., Mokari, M. ve Abbasnia, M., 2019. Regional variability of temperature extremes in the maritime climate of Turkey: A case study to develop agricultural adaptation strategies under climate change. *Modeling Earth Systems and Environment*, **5**, 857-865.
- Valeriy, O., Anastasiia, C., Nataliia, O., Svitlana, K. ve Volodymyr, O., 2021. Water resources of the Desna River Basin under future climate. *Journal of Water and Climate Change*, **12**, 1-18.
- Von Neumann, J., 1941. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*, **12**, 367-395.
- Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., Takahashi, M., ve Sato, K. 2008. General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, 1-11.
- World Meteorological Organization (WMO)., 2021. State of the Global Climate 2020, Yayın No: 1264, Geneva.
- Yano, T., Aydin, M. ve Haraguchi, T., 2007. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean Environment of Turkey. *Sensors*, **7**, 2297-2315.

#### **İnternet Kaynakları**

- 1- <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1344>. (24 Ekim 2021)

# Elvaloy ve Polifosforik Asitle Modifiye Edilmiş Bitümün Fiziksel ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Hakan AYDIN<sup>1</sup>, Erkut YALÇIN<sup>2\*</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>3</sup>, Taner ALATAŞ<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ.

e-posta: <sup>1</sup>ce.aydinhakan@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-1446>

\*Sorumlu Yazar e-posta: <sup>2</sup>erkutyalcin@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6389-4211>

e-posta: <sup>3</sup>mehmetyilmaz@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2761-2598>

e-posta: <sup>4</sup>talatas@firat.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2762-0440>

Geliş Tarihi: 27.05.2022

Kabul Tarihi: 24.10.2022

## Öz

### Anahtar kelimeler

Elvaloy; PPA; Bitüm Modifikasyonu; Reolojik Özellikler

Kompleks ortamlarda asfalt kaplamaların performansını garanti etmek için stiren-bütadien-stiren (SBS), stiren bütadien kauçuğu (SBR), öğütülmüş araç lastiği (CR), ve polifosforik asit (PPA) gibi bazı malzemelerin bitüm modifikasyonunda kullanımına rastlanmaktadır. Bu çalışmada, Elvaloy ve PPA modifikasyonunun bitümlü bağlayıcının reolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Belirlenen üç farklı oran kombinasyonunda Elvaloy/PPA kullanılarak modifiye bitümler hazırlanmış, saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine geleneksel ve Superpave bağlayıcı deneyleri uygulanmıştır. Sonuç olarak, çalışmada kullanılan 3 farklı bağlayıcının geleneksel (penetrasyon, yumuşama noktası ve viskozite deneyleri) ve Superpave bağlayıcı deney (dinamik kayma reometre deneyi) sonuçları incelendiğinde kullanılan bu katkıların saf bağlayıcının performansını arttırdığı belirlenmiştir.

## Investigation of Physical and Rheological Properties of Elvaloy and Polyphosphoric Acid Modified Bitumen

### Abstract

### Keywords

Elvaloy; PPA; Modification; Rheological Properties

In order to guarantee the performance of asphalt coatings in complex environments, some materials such as styrene-butadiene-styrene (SBS), styrene butadiene rubber (SBR), crumb rubber (CR), and polyphosphoric acid (PPA) have been used in bitumen modification. During the modification methods, alternative additives have been used to enhance or supplement the conventional asphalt binder. In this study, the effects of Elvaloy PPA modification on the rheological and physical properties of the bitumen binder were investigated. In addition, the effect of the bituminous binder on the rheological and physical properties was also investigated. Modified bitumen was prepared by using Elvaloy/PPA additives prepared under the specified conditions, and traditional and Superpave binder tests were applied on pure and modified binders. As a result, when the traditional (penetration, softening point and viscosity tests) and Superpave binder test (dynamic shear rheometer experiment) results of 3 different binders used in the study were examined, it was determined that these binders increased the performance of the pure binder.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Genel olarak asfalt, karmaşık bir içyapıya sahip bir inşaat malzemesidir. Asfaltın kimyası ve içyapısının araştırılmasında (Lesueur *et al.* 1997, Turner ve Branthaver 1997, Bodan *et al.* 1982, Yen *et al.* 1992) yeni yöntemler ve teknolojiler kullanılmış olsa da içyapının tam olarak anlaşılması hala zor olmuştur. Genel olarak, asfaltın, asfaltlar ve maltenlerle

temsil edildiği gibi farklı seviyelerde polariteye ve molar kütlelere sahip karmaşık bileşiklerden oluşan bir koloidal sistem olduğu kabul edilmiştir (Anderson 1988). Asfaltın maltenlerde dağılımı derecesi ve hidrokarbonların karakteri, asfaltın yorulma çatlama, tekerlek izine direnç, düşük sıcaklıklarda çatlama karşı direnç ve oksidasyona direnç gibi fiziksel özelliklerini etkilemiştir. Asfalt

karışımlarda oksidasyon olayı bitümün sertleşmesine neden olarak, asfalt karışımları kırılğan ve çatlamaya karşı savunmasız hale getirmektedir (Baginska *et al.* 2004).

Mühendislik özelliklerini iyileştirmek için asfalt genellikle polimerler tarafından modifiye edilmektedir. Polacco ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, asfaltın termomekanik özelliklerini büyük ölçüde geliştirdiğini belirlemişlerdir (Polacco *et al.* 2005). Polimer içeriği genellikle ağırlıkça %2 ile %5 aralığındadır; daha yüksek bir polimer içeriği ekonomik bir dezavantaj olarak kabul edilmiştir.

Asfalt endüstrisinde kullanılan en başarılı polimer grubu termoplastik elastomerlerdir. Termoplastik elastomerlerin asfalta ilavesi durumunda, kopolimerin bütadien fazı, yağ fraksiyonlarının (yani, maltenlerin) emilmesiyle şişmiştir. Sonuç olarak, polimerin orijinal hacmi yaklaşık 4 ile 10 kat artmıştır. Bu olgu, bir asfalt karışımında üç boyutlu (3D) bir polimerik ağı geliştirmesinin anahtarı olarak belirlenmiştir; SBS elastomerik özellikleri tüm karışıma geçirmiş ve erime kabiliyetini yüksek sıcaklıklarda korumuştur (Drobny 2005). Polimerler ısı ve basınç etkisine veya bir katalizörün etkisine maruz kaldığında çapraz bağlanma gerçekleşmiştir. Bu koşullar altında, polimerin molekülleri arasındaki kovalent bağlarla dahili bir 3 boyutlu ağ oluşturulmuş ve bu da erime veya çözünme yeteneğinin kaybına neden olmuştur. Maleik anhidrit ile modifiye edilmiş termoplastik elastomerler, epoksi halkaları içeren etilen bazlı kopolimerler ve son zamanlarda piyasada bulunan etilen terpolimerleri, glisidimetakrilat ve bir ester grubu (genellikle metil, etil veya butilakrilat) hepsi asfalt modifikasyonu için kullanılan RET'e ait bir sınıfa girmiştir (Drobny 2005).

RET modifikasyonu asfalt ile uyumluluğunu artırsa da, erime kabiliyeti olmayan bir polimer asfalt jeli ile sonuçlanan kimyasal bağlar oluştuğunda böyle bir sistemin kürlenmesine dikkat edilmelidir (Yu *et al.* 2009, Perez-Lepe *et al.* 2007). Sonuç olarak, asfaltın modifikasyonu için daha düşük miktarlarda RET kullanılması gerekmiştir (Guo *et al.* 2001). Bu nedenle RET, PMA karışımlarının uygulanmasını sınırlandırmıştır. Bununla birlikte, laboratuvar testleri deformasyonlara ve yorulma çatlağına karşı üstün direnç göstermiştir.

ABD'de PPA 1970'den beri asfalt karışımlarının mühendislik özelliklerini geliştirmek için kullanılmıştır (Baumgardner *et al.* 2005). Bununla birlikte, bu asfalt modifikasyonunun mekanizması, literatürde ifade edilen çeşitli görüşler Orange *et al.* (2004) ve Edward *et al.* (2006) ile hala tam olarak anlaşılmamıştır. Genel bir kural olarak, az miktarda PPA (ağırlıkça% 0,5) eklenmesi, termal işlemler sırasında oluşan kararsızlaştırıcı bileşenlerle reaksiyona girerek düz çalışan asfaltların sıcaklığını ve yaşlanma dirençlerini değiştirebilme olasılığı belirlemişlerdir. Aynı yazarlar, PPA ilavesinin, mum ilavesinden daha az bir ölçüde olsa da düşük sıcaklıklarda asfaltı sertleştirdiğini gözlemlemişlerdir. Daha yüksek sıcaklıklarda sertliği artırarak tekerlek izi parametreleri üzerindeki olumlu etki de tartışılmıştır. Yaşlanmaya karşı direnç (Daranda *et al.* 2009), PPA ile modifiye edilmiş asfalt bağlayıcının avantajları arasında olduğunu belirlemişlerdir. PPA, asfaltın yüksek servis sıcaklıklarını değiştirirken, bu tür bağlayıcıların düşük servis sıcaklıkları çoğunlukla değişmeden kalmıştır. Asfaltın PPA ile modifikasyonunun ana nedeni, iyileştirilmiş işleme koşulları, yüksek sıcaklıkta viskozite ve depolama stabilitesi için gereken polimer miktarının sınırlandırılması olarak belirlenmiştir (Trakarnpruk *et al.* 2005).

Bu katkılar, yollarda yaygın olarak görülen tekerlek izlerine ve düşük/yüksek sıcaklık hassasiyetlerine karşı olağanüstü bir dirence ve performansa sahip oluşu ve yorulma çatlaklarının oluşmasına karşı muazzam ölçüde koruma sağladığından dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. Ekonomik açıdan bu katkılar SBS elastomerine göre daha avantajlıdır. Bununla birlikte, bu tür bir modifikasyon, asfalt bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarını artırabilmektedir. Bu çalışmada, Elvaloy ve polifosforik asitin birlikte kullanılmasının bitümlü bağlayıcının reolojik ve fiziksel özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır (Çizelge 1). Saf bağlayıcı Elvaloy ve PPA



katkıları ile modifiye edilmiştir. Elvaloyun özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Bu çalışmada Elvaloy ve PPA üç farklı oranda (0,8%+%2, %0,9+%1 ve %1+%0) karıştırılarak saf bitüme ilave edilerek hedef bağlayıcılar hazırlanmıştır. Elvaloy içeren bitümler, 5 saat boyunca 800 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra bu karışıma PPA eklenerek 30 dakika daha karıştırılarak modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve Elvaloy/PPA içeren bağlayıcıların çalışmada kullanılan kısaltmaları Çizelge 3’te verilmiştir.

**Çizelge 1.** Bitümün özellikleri

Özellikler	Birim	Standart	Sonuçlar
Penetrasyon	mm <sup>-1</sup>	EN 1426	62
Yumuşama noktası	°C	EN 1427	53,3
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	0,119
Parlama noktası	°C	EN ISO 2719	245
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D70 - 18a	1,044
Karıştırma sıcaklığı	°C	-	167,5–173,3
Sıkıştırma sıcaklığı	°C	-	155,2–160,6

**Çizelge 2.** Elvaloy RET polimerinin genel özellikleri

Özellikler	Deney standardı	Sonuçlar
Moleküler yapısı		Doğrusal
Özgül ağırlık	ASTM D-792	0,94
Hacim özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )		0,557
Erime noktası (°C)	ASTM D-3418	72

**Çizelge 3.** Bitümlü bağlayıcılar için kullanılan kısaltmalar

Kullanılan katkı	Bağlayıcı ağırlığınca kullanılan katkı oranı (%)			
Elvaloy	0,8	0,9	1	0
PPA	0,2	0,1	0	0
Gösterim	E1	E2	E3	Saf

### 2.1 Geleneksel Bağlayıcı Deneyleri

25°C’de penetrasyon deneyi (ASTM D5) ve yumuşama noktası deneyi (ASTM D36) 5°C’de yapılmıştır. Bu deneyler sayesinde bağlayıcıların fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bitümün ısıya karşı duyarlılığını belirlemek amacıyla yumuşama noktası ve penetrasyon deneylerinin değerleri kullanılarak

bulunan indekse Penetrasyon İndeksi (PI) değerleri belirlenmiştir. Denklem 1’deki Pen25 Bitümün 25°C’deki penetrasyon değerini; YN ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir (Whiteoak *et al.* 2004).

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(\text{Pen}25) - 20 \times \text{YN}}{50 \times \log(\text{Pen}25) - \text{YN} - 120} \quad (1)$$

### 2.2 Dönel Viskozimetre (RV) Deneyi

Modifiye edilmiş ve saf bitüm örnekleri, 135°C ve 165°C’lik sıcaklıklarda viskozite testine tabi tutulmuştur. Bu amaçla AASHTO T316 standardına uygun olarak “Brookfield Viskozimetresi” kullanılmaktadır (AASHTO, 2008). Bağlayıcıların viskozi değerleri işlenebilirlik sınırı şartı olan 3 Pa.s’yi aşmaması istenmektedir (Airey 2004, Airey 2003, Vlachovicova *et al.* 2007).

### 2.3 Dinamik Kayma Reometresi (DSR) Deneyi

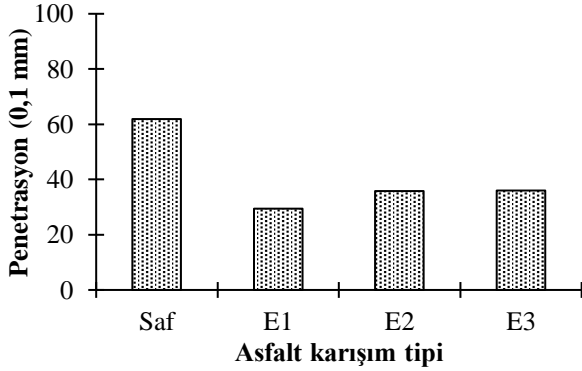
Sıcaklık kontrollü ve bitümlü bağlayıcı numunelerinin bulunduğu deney düzeneğine belirli bir salınımlı kayma gerilmesi uygulanır. Gerilmeye bağlı bağlayıcının şekil değiştirmesi tayin edilir. Alternatif olarak deney numunesine belirli bir salınımlı kesme gerilimi uygulanır ve son kayma gerilmesi ölçülür. Bu deney lineer viskoelastik davranış bölgesinde uygulanır. Dinamik kayma reometresi (DSR) ve paralel deney geometresi kullanılarak bitümlü bağlayıcıların kompleks kesme modülü ve faz açısının belirlenmesini içermektedir. Faz açısı değeri azaldıkça bağlayıcıların elastikiyetlik özelliğinde artma meydana gelmektedir. Tekerlek izi parametresi yaşlandırılmamış saf bağlayıcılar için için 1,0 kPa’dan daha büyük değerde olması gerekmektedir. DSR deneyi 25 mm çapında plak ve 1 mm plak açıklığı ile 1,59 Hz frekans değerinde 52-88°C’de yapılmıştır (Zaniewski *et al.* 2004).

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1 Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 1’de verilmiştir. Elvaloy+PPA modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Saf bağlayıcıya göre

penetrasyon değerinde en fazla azalma E1 bağlayıcısında görülmektedir. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı penetrasyon değerinde önemli ölçüde azalma meydana getirmiştir. Fakat Elvaloyun tek başına kullanılması penetrasyon değerini azaltsa da ikili kullanım kadar azaltmamaktadır. E1, E2 ve E3 modifikasyonun penetrasyon değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %52,2; %41,9 ve %41,6 azaltmıştır.

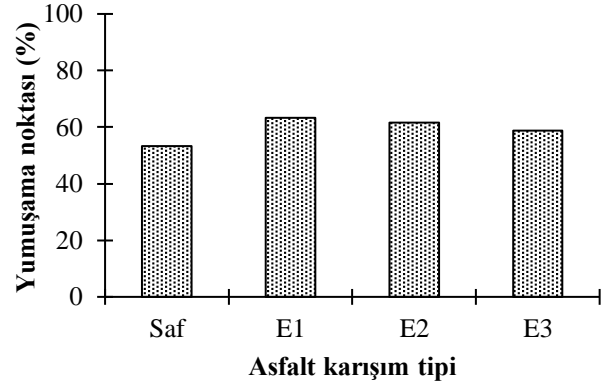


Şekil 1. Penetrasyon değerlerindeki değişiklik

Geçkil ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Elvaloy RET katkısının bağlayıcı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elvaloy RET katkılı bağlayıcılarda, katkısız bağlayıcılara göre penetrasyon değerlerinde azalma olduğunu belirlemişlerdir (Geçkil *et al.* 2019). Yapılan bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### 3.2 Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

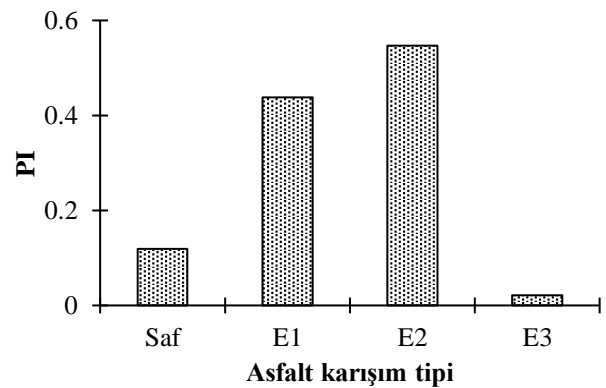
Şekil 2'de tüm bağlayıcıların yumuşama noktası deney sonuçları verilmiştir. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı yumuşama noktası değerini artırmıştır. En yüksek yumuşama noktası değerini E1 bağlayıcısı vermektedir. E1, E2 ve E3 bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %16,67; %15,48 ve %10,23 artırmıştır. Her iki katkı maddesi de bitümlü sıcak karışımların yüksek sıcaklık direncini artırmaktadır.



Şekil 2. Yumuşama noktası değerlerindeki değişiklik

Geçkil ve arkadaşları yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak Elvaloy kullanmışlardır. Saf bağlayıcıya Elvaloy ilavesi yumuşama noktası değerlerinde artış meydana getirmektedir (Geçkil *et al.* 2019). Benzer sonuçlar bu çalışmada da elde edilmiştir.

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, bağlayıcının yumuşaklığını ifade etmektedir. Bitümlü bağlayıcılar viskoelastik özellikte oldukları için soğukta sert, sıcakta ise akışkan hale gelebilmektedirler. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır. Penetrasyon İndeks değerinin -2'den küçük olması bitümün ısıya çok duyarlı olduğunu, +2'den büyük olması ise ısıya karşı az duyarlı olduğunu göstermektedir. Bağlayıcıların PI değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



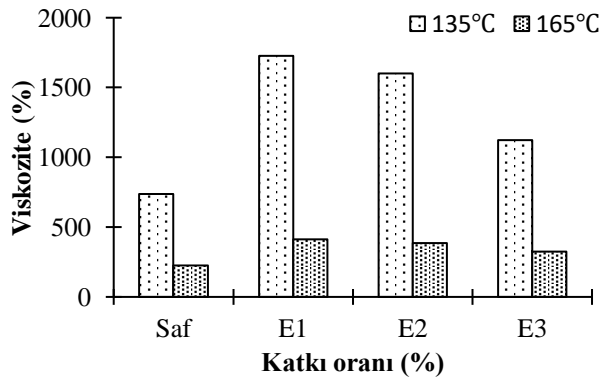
Şekil 3. Bağlayıcıların PI değerleri

E2 modifiye bitüm en yüksek PI değerini vermektedir. E1 ve E2 modifiye bitüm, saf bağlayıcıdan yüksek PI değerlerine sahiptir. E1 ve E2 modifiye bağlayıcıları, saf bitüm ile

karşılaştırıldığında sırasıyla yaklaşık 3,7 ve 4,6 kat daha yüksek PI değerine sahiptir.

### 3.3 Dönel viskozimetre deneyi

Şekil 4'te bağlayıcıların 135°C ve 165°C'deki viskoziteleri üzerindeki değişimi sırasıyla verilmektedir. 135°C'de bağlayıcıların viskozite değerleri Elvaloy+PPA katkıları ile hazırlanan modifiye bitümdeki Elvaloy oranı arttıkça hem 135°C hem de 165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinde azalış gözlenmektedir. 135°C'de en yüksek E1 içeriğinde bile sınır şartı olan 3 Pa.s viskozite değerini aşmamasından dolayı herhangi bir işlenebilirlik problemi teşkil etmez. En düşük viskozite değerini ise saf bağlayıcı vermektedir. Viskozite eğilimindeki değişim her iki sıcaklık içinde benzerdir. E1, E2 ve E3 bağlayıcıların, 135°C'deki viskozite değerleri saf bitüm ile karşılaştırıldığında sırasıyla 2,34; 2,17 ve 1,53 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. 165°C'de ise sırasıyla 1,83; 1,72 ve 1,44 kat daha fazla viskozite değeri vermektedir (Şekil 5). Tek başına Elvaloy katkısının kullanımı Elvaloy ve PPA birlikte kullanıldığı bağlayıcılara göre daha fazla viskozite değeri verdiği belirlenmiştir. Modifiye bağlayıcıların içerisindeki PPA miktarı arttıkça, modifiye bağlayıcıların viskozite değerlerinde artış meydana gelmektedir.

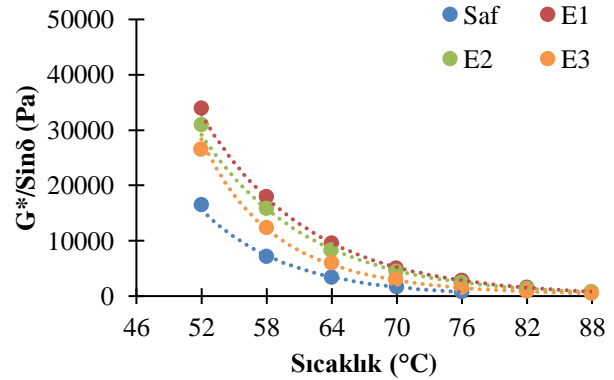


Şekil 4. 135°C ve 165 °C'deki bağlayıcıların viskozite değerleri

Bu sonuçların penetrasyon ve yumuşama noktası değerleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuçların literatürde yer alan sonuçlarla da uyumlu olduğu belirlenmiştir (Geçkil *et al.* 2019).

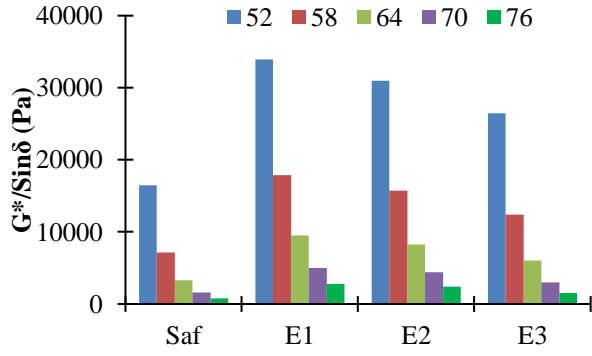
### 3.4 DSR Deney Sonuçları

Şekil 5'te bütün bağlayıcılar için tekerlek izi parametreleri ile sıcaklık arasındaki ilişki verilmiştir. Bağlayıcıya uygulanan sıcaklık arttığında, bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinde azalma meydana gelmektedir. Kalıcı deformasyon, tekerlek izi parametresini ( $G^*/\sin\delta$ ), yaşlanmamış orijinal bağlayıcılar için 1,0 kPa'dan daha büyük değerlerle sınırlandırarak kontrol edilir. DSR deneyinde, her bir 6°C'lik sıcaklık artışında bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerinde yaklaşık %50 azalma meydana gelmektedir. Saf bağlayıcının  $G^*/\sin\delta$  sınır değerini 64°C'de sağlarken, E1, E2 ve E3 bağlayıcıları 76 °C'de sırası ile 2757 Pa, 2404 Pa ve 1518 Pa  $G^*/\sin\delta$  değeri vermektedir. E1 ve E2 bağlayıcısı 82°C'de sınır şartını sağlarken, E3 bağlayıcısı 1000 Pa limit değerini sağlamadığı belirlenmiştir. E1 ve E2 bağlayıcıların tekerlek izi parametrelerindeki değişim birbirlerine benzerdir.



Şekil 5.  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 6'da  $G^*/\sin\delta$  değerlerinin Elvaloy/PPA katkı içeriği ile değişimi verilmiştir. İki şekilde de görüldüğü üzere PPA içeriği arttıkça  $G^*/\sin\delta$  değerleri de artmaktadır. Elvaloy içeren bağlayıcı Elvaloy+PPA içeren bağlayıcılara göre daha düşük  $G^*/\sin\delta$  değerleri vermektedir. Sıcaklık değeri arttıkça tüm bağlayıcıların  $G^*/\sin\delta$  değerleri azalmaktadır. Tüm sıcaklıklarda en yüksek  $G^*/\sin\delta$  değerlerini E1 bağlayıcısı verirken en düşük  $G^*/\sin\delta$  değerlerini ise saf bağlayıcı vermektedir.  $G^*/\sin\delta$  değerleri literatürde yer alan sonuçlarla da uyumlu olduğu belirlenmiştir (Geçkil *et al.* 2019).



Şekil 6. Elvaloy/PPA içeriği ile G\*/sinδ değişimi

#### 4. Sonuçlar

Çalışmasında Elvaloy ve PPA katkılarının, bitümlü bağlayıcı performanslarına etkileri araştırılmış ve saf bağlayıcı ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada reolojik özelliklerini belirlemek için 3 farklı oranda Elvaloy+PPA kullanılmıştır.

- Elvaloy+PPA modifiyeli bitümün penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. E1 bağlayıcısının penetrasyon değeri saf bağlayıcının penetrasyon değerine göre düşüktür. Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı penetrasyon değerinde önemli ölçüde azalma meydana getirmiştir.
- Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı yumuşama noktası değerini artırmıştır. En yüksek yumuşama noktası değerini E1 bağlayıcısı vermektedir. Penetrasyon deney sonuçlarında olduğu gibi Elvaloy ve PPA'nın birlikte kullanımı tek Elvaloy kullanımına göre daha iyi sonuç vermektedir.
- E2 modifiye bitüm en yüksek PI değerini vermektedir. E1 ve E2 modifiye bitüm, saf bağlayıcıdan yüksek PI değerlerine sahiptir. Elvaloy ve PPA katkılarının kullanılması sıcaklık duyarlılığı üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir.
- Elvaloy+PPA katkıları ile hazırlanan modifiye bitüm içerisindeki Elvaloy oranı arttıkça hem 135°C hem de 165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinde azalış meydana gelmektedir. Bununla birlikte, 135°C'de tüm bağlayıcılar sınır şartı olan 3 Pa.s viskozite değerini aşmamaktadır. Buda işlenebilirlik açısından sorun teşkil etmediğini göstermektedir. En

düşük viskozite değerini ise saf bağlayıcı vermektedir. Her iki sıcaklıkta da viskozite sonuçlarında benzer değişim görülmektedir.

- Bağlayıcılara uygulanan sıcaklık değeri arttıkça G\*/sinδ değeri azalmaktadır. Bütün bağlayıcılarda bu azalış meydana gelmektedir. Ayrıca bağlayıcıya sadece Elvaloy ilavesi G\*/sinδ değerlerini her sıcaklıkta yaklaşık olarak sırasıyla 1,5 veya 2 kat artırmaktadır.
- Katkı maddeleri saf bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini düşürmüştür. Elvaloy ve PPA ilavesi saf bağlayıcının bağlayıcı sınıfını değiştirmektedir. Bu sebeple kaplamalarda meydana gelen tekerlek izi oluşumlarını önlemek veya azaltabilmek için Elvaloy/PPA bir katkı maddesi olarak kullanılması durumunda faydalı olabileceği ve iyi bir performans göstereceği söylenebilmektedir.

#### 5. Kaynaklar

- Airey, G.D., 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, **82(14)**, 1709–1719.
- Airey, G.D., 2004. Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumens. *Journal Material Science*, **39**, 951–959.
- Anderson, J.L., 1988. *Advanced in Chemical Engineering*, Academic Press, 98–134.
- Baginska, K. and Gawel, I., 2004. Effect of origin and technology on the chemical composition and colloidal stability of bitumen. *Fuel Processing Technology*, **85**, 1453–1462.
- Baumgardner, G.L., Masson, J.F., Hardee, J.R., Menapace, J.R. and Williams, A.G., 2005. Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms. *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, **74**, 283–305.
- Bodan, A.N., 1982. Polyquasispherical structure of petroleum asphalts. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, **18**, 614–618.
- Daranga, C., Clopotel, C., Mofolasayo, A. and Bahia, H., 2009. Storage stability and effect of mineral surface on polyphosphoric acid (ppa) modified asphalt binders, presented during poster session. *88th Annual*

- Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2–11.
- Drobny, J.G., 2007. Handbook of Thermoplastic Elastomers, William Andrew Inc., 161–175.
- Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacson, U., 2006. Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 — low temperature performance. *Fuel*, **85(8)**, 989–997.
- Geçkil, T. and Seloğlu, M., 2019. Reaktif Terpolimerin Bitümün Kıvamına ve Sıcaklık Duyarlılığına Etkisi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **31(1)**, 203–213.
- Guo, Q., Figueiredo, P., Thomann, R. and Gronski, W., 2001. Phase behavior, morphology and interfacial structure in thermoset/thermoplastic elastomer blends of poly(propyleneglycol)-type epoxy resin and polystyrene-b-polybutadiene. *Polymer*, **42**, 10101–10110.
- Lesueur, D., Gérard, J.F., Claudy, P., Létoffé, J.M., Planche, J.P. and Martin, D., 1997. Relationships between the structure and the mechanical properties of paving grade asphalt cements. *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, 486–507.
- Orange, G., Dupuis, D., Marin, J.V., Farcas, F., Such, C. and Marcant, B., 2004. Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties–microstructure relationship. *3rd Euraphalt & Eurobitume Congress*, Vienna, 733–745.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J. and Gallegos, C., 2007. High temperature stability of different polymer-modified bitumens: a rheological evaluation. *Journal of Applied Polymer Science*, **103**, 1166–1174
- Polacco, G., Berlincioni, S., Biondi, D., Stastna, J. and Zanzotto, L., 2005. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *European Polymer Journal*, **41(12)**, 2831–2844.
- Trakarnpruk, W. and Chanathup, R., 2005. Physical and rheological properties of asphalts modified with polyethylene-co-methylacrylate and acids. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, **15**, 79–87.
- Turner, T.F. and Branthaver, J.F. D.S.C., Studies of asphalts and asphalts components, in: A.M. Usmani (Ed.), *Asphalt Science and Technology*, 59–101.
- Vlachovicova, Z., Wekumbura, C., Stastna, J. and Zanzotto, L., 2007. Creep characteristics of asphalt modified by radial styrene–butadiene–styrene copolymer. *Construction and Building Materials*, **21(3)**, 567–577.
- Yen, T.F., 1992. The colloidal aspect of a macrostructure of petroleum asphalt. *Fuel Science-Technology International*, **10**, 723–733.
- Yu, J., Cong, P. and Wu, S., 2009. laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, **113**, 3557–3563.
- Zaniewski, J.P. and Pumphrey, M.E., 2004. Evaluation of performance graded asphalt binder equipment and testing protocol. *Asphalt Technology Program*.
- Whiteoak, D., 2004. Shell Bitüm El Kitabı, Prof. Dr. Abdullah Hilmi Lav ve Prof. Dr. Ayşen Lav (çeviri editörü), İsfalt Bilimsel Yayınları, İstanbul.

# Hidrojel Esaslı Kompozit Kullanılarak Naftol Yeşili B İçeren Atıksuların Arıtımında Ortam Parametrelerinin Etkisi

Mehtap TANYOL<sup>1</sup>, Güzin PIHTILI<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Munzur Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Tunceli

<sup>2</sup>Munzur Üniversitesi Pertek Sakine Genç MYO Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Tunceli

e-posta: mtanyol@munzur.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3848-2581>

Sorumlu yazar e-posta: gpihtili@yahoo.com.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2261-6810>

Geliş Tarihi: 08.07.2022

Kabul Tarihi: 12.09.2022

## Öz

Bu çalışmada,  $\text{EuCl}_3$  ile katkılanmış poli (4-vinilpiridin-ko-akrilamid)  $\{\text{P}(4\text{-VP-ko-AAm})/\text{EuCl}_3\}$  hidrojel kompozit adsorbent olarak kullanılarak atıksulardan naftol yeşili B boyasının giderim verimliliği araştırılmıştır. Naftol yeşili B adsorpsiyon verimliliğinin pH, adsorbent madde miktarı, başlangıç naftol yeşili B boya konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresi gibi değişkenlere bağımlılığı kesikli sistemde incelenmiştir. En yüksek giderim verimi 30 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonu, 0,05 g/100 mL  $\text{P}(4\text{-VP-ko-AAm})/\text{EuCl}_3$  dozajı, pH=5,42 ve 25 °C sıcaklıkta %98,40 olarak elde edilmiştir. Deneysel denge verileri Langmuir izoterm modeli ile daha iyi uyum sağlamıştır. Kinetik sonuçlar, adsorpsiyon prosesinin hız belirleme basamaklarından biri olarak iç difüzyon ile yalancı ikinci derece kinetiği ile tanımlanabileceğini göstermiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, adsorbent olarak  $\text{P}(4\text{-VP-ko-AAm})/\text{EuCl}_3$  hidrojelini kullanarak naftol yeşili B boyasının başarılı bir şekilde atıksulardan giderilebileceğini göstermiştir.

### Anahtar kelimeler

Polimerik adsorbent;  
Adsorpsiyon; Naftol  
yeşili B; Kinetik  
parametre

## The Effect of Environmental Parameters on the Treatment of Naphthol Green B Containing Wastewater Using Hydrogel Based Composite

### Abstract

In this study, the removal efficiency of naphthol green B dye from wastewater was investigated by using poly(4-vinylpyridine-co-acrylamide)  $\{\text{P}(4\text{-VP-co-AAm})/\text{EuCl}_3\}$  hydrogel composite adsorbent doped with  $\text{EuCl}_3$ . The dependence of naphthol green B adsorption efficiency on variables such as pH, amount of adsorbent substance, initial naphthol green B dye concentration, temperature and contact time were investigated in batch system. The highest removal efficiency was found as 30 mg/L initial naphthol green B concentration, 0.05 g/100 mL  $\text{P}(4\text{-VP-co-AAm})/\text{EuCl}_3$  dosage, pH=5.42 and 98.40% at 25 °C. has been obtained. Experimental equilibrium data were in better agreement with the Langmuir isotherm model. The kinetic results showed that the adsorption process can be described by pseudo-second-order kinetics with internal diffusion as one of the rate-determining steps. Obtained experimental results showed that naphthol green B dye can be successfully removed from wastewater by using  $\text{P}(4\text{-VP-co-AAm})/\text{EuCl}_3$  hydrogel as adsorbent.

### Keywords

Polymeric adsorbent;  
Adsorption; Naphthol  
green B; Kinetik  
parameter

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Son yıllarda sanayileşmedeki hızlı gelişme, kirlenmelerin çevreye deşarjını artırmıştır (Das and Dey 2020). Evsel ve diğler endüstriyel atıkların su kütlelerine atılması su kirliliğine neden olmaktadır (Varjani and Upasani 2017). Su kirliliğine yol açan boyalar tekstil ve deri endüstrisi başta olmak üzere

kauçuk ve plastik endüstrisi, kağıt baskı, gıda işleme, kozmetik ve ilaç endüstrisinde kullanılmaktadır. Boyarmaddelerin yaygın bir şekilde kullanılması,  $7 \times 10^5$  ton olduğu tahmin edilen büyük bir yıllık üretime yol açmaktadır. Üretimde yaklaşık %1-2 kullanımda ise %1-10 kayıp olduğu varsayılmaktadır. İstenmeyen rengin yanı sıra, kirlenmiş sular güneş ışığının akarsulara geçişini azaltır, bu da canlı

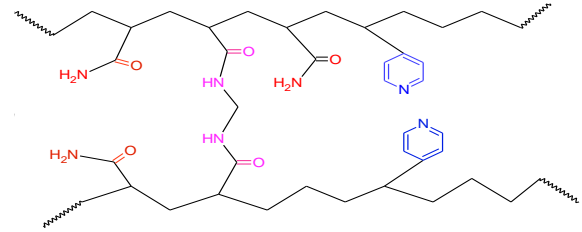
organizmaların fotosentetik aktivitesinin azalmasına yol açar. Aynı zamanda boyalar benzen, ksanten ve aromatik aminler gibi toksik bileşikler içerir ve canlı organizmalar için potansiyel olarak tehlikelidir (Bartoňová *et al.* 2017). Naftol yeşili B, nitrozo boya grubuna ait olan ve naftoik asidin bir türevi olan suda çözünürlüğü yüksek anyonik boyalardan biridir. Bu boya esas olarak tekstil endüstrilerinde yün, naylon ve ipek kumaş boyama ve baskı için ve deri boyamada kullanılır. Naftol yeşili B redoks özelliklerine sahiptir ve sabit aktif katmanlar üretmek için elektro-polimerizasyon reaksiyonunu içerebilir. Bu nedenle, düşük maliyeti ve elektron transfer verimliliği sayesinde naftol yeşili B, özellikle dopamin ve ürik asit için elektrokataliz işleminde aracı görevi görür ve ayrıca çeşitli spektrofotometrik cihazlarda kullanılabilir. Bu boya biyo-bozunur değildir ve sudaki varlığı istenmeyen bir durumdur (Zhang *et al.* 2009).

Hidrojeller, suda çözünemeyen ancak sulu ortamda kendi şekillerini muhafaza ederek, suyu adsorplayabilen maddelerdir (Taşar *vd.* 2015, Öz 2005, Üzüm 2008). Başka bir şekilde tanımlanacak olursa, çapraz olarak bağlanmış ağ yapısındaki üç boyutlu polimerler diyebiliriz (Boztepe *vd.* 2015). Hidrojelin yapısında iyon halinde monomerler var ise, adsorpsiyon özelliği gösteriler. Bu özelliklerinden dolayı, adsorbent olarak görev alırlar (Tosun *vd.* 2019, Saraydın *vd.* 2001, Duran *vd.* 1999). Bu polimerler birbirlerine hidrojen bağları, van der Waals güçleri, hidrofobik etkileşimler gibi diğer bağlanma kuvvetleri ile çapraz bağlanan hidrofilik polimer moleküllerinden oluşurlar. Polimerlerin hidrojel yapıda olabilmesi için polimerin ana zincirinde veya yan dallarında hidroksil, karbonil, karboksil, amin veya amid gibi hidrojen bağı oluşturabilecek hidrofil grupların olması gerekmektedir. Bu gruplar ne kadar fazla ise su tutma derecesi o kadar fazladır (Ödemiş 2014). Ağlar, homopolimerler veya kopolimerlerden oluşur ve fiziksel veya kimyasal çapraz bağlar nedeniyle çözünmezler. Güçlü su emicilikleri ve kauçuk yapıları, doğal dokulara benzerler ve iyi bir biyoyumluluk ve biyolojik inertliğe sahiptirler. Hidrojeller toksik olmayabilir, kimyasal olarak stabil olabilir ve sulu ortamlarda düşük bir ara yüzey

gerilimi sergileyebilir. Hidrojeller, kontakt lensler, yara sargısı, biyosensörler için membranlar ve yapay kalp için astarlar gibi biyomedikal malzemelerin hazırlanması için iyi adaylardır (Akkaya ve Ulusoy 2011, Budtova *et al.* 1993, Oztop *vd.* 1998). Polimerler ve polimer ile başka malzemeler kullanılarak hazırlanan kompozit malzemeler de boya giderimleri için kullanılmaktadır (Keskin 2016). Farklı süper adsorban hidrojeller (SAH'ler), özellikle bunların kompozitleri, nemli havadan su buharını yakalamak için katı kurutucular olarak kullanılmıştır (Mittal *et al.* 2020). Bu çalışmanın önemi polimerik bir adsorbent kullanarak, naftol yeşili B boyasının başarılı bir şekilde atıksulardan giderebilmektir.

## 2. Materyal ve Metot

Naftol Yeşil B ve NaOH, Sigma-Aldrich ve Fluka'dan temin edilmiştir. Adsorbent olarak kullanılan poli (4-vinilpridin-ko-akrilamid)/EuCl<sub>3</sub> hidrojel laboratuvar ortamında hazırlanmıştır (Pıhtılı *vd.* 2022).



Şekil 1. Poli (4-vinilpridin-ko-akrilamid) hidrojel kompoziti

### 2.1. Adsorpsiyon Deneyleri

Naftol yeşili B sulu çözeltilerden giderilmesi için P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> değerlendirilmesinde, tüm deneyler kesikli adsorpsiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları için deneysel çalışma aralıkları başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonu, temas süresi, P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> miktarı ve çözeltilerin pH'ı için sırasıyla 30-125 mg/L, 0-200 dk, 0,05-0,2 g/100 mL ve 4-10 olarak belirlenmiştir. Çözeltilerin pH'ı, 0,1 M NaOH ve 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kullanılarak ayarlanmıştır. Kesikli düzendeki adsorpsiyon çalışmaları 100 mL çalışma hacminde 250 mL' lik erlenler kullanılarak sıcaklık kontrollü çalkalayıcıda (Zhicheng, ZHWY-200B) sabit karıştırma hızında (250 rpm) gerçekleştirilmiştir. Her bir çalışmada zamana bağlı olarak alınan numuneler 5000 rpm'de 10 dakika santrifüjlenmiştir (Nüve, NF

200) ve sıvı kısım naftol yeşili B analizi için kullanılmıştır. Naftol yeşili B analizleri UV-spektrofotometre (Shimadzu, UV-1800) cihazı kullanılarak 714 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. Naftol yeşili B giderim verimi Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$\text{Giderim verimi, \%} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_t} \quad (1)$$

Adsorplanmış Naftol yeşili B miktarı ( $q$ ) mg/g olarak Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$q = \frac{(C_0 - C_t) V}{m} \quad (2)$$

Bu denklemlerde;

$C_0$  ve  $C_t$  sırasıyla  $t=0$  ve  $t=t'$  de çözeltildeki naftol yeşili B konsantrasyonu (mg/L),  $V$  çözeltilinin hacmi (L), ve  $m$  P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub>'ün kütlesidir (g).

## 2.2. Langmuir Adsorpsiyon İzoterm Modeli

Bu modele göre, adsorbanın yapısı homojendir, bu da tüm adsorpsiyon bölgelerinin eşit adsorpsiyon enerjilerine sahip olduğu anlamına gelmektedir. Adsorpsiyon sadece tek tabakada veya adsorbanın yüzeyinde bulunan sabit sayıda adsorpsiyon bölgesinde meydana gelir (Perez-Marin *et al.* 2007).

Bu izoterm doğrusal olmayan denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$q_{den} = \frac{q_m b C_{den}}{1 + b C_{den}} \quad (3)$$

Burada  $q_m$  doygunlukta veya tek tabaka kapasitesinde adsorbe edilen maksimum naftol yeşili B miktarı (mg/g) ve  $b$  adsorpsiyon enerjisiyle ilgili Langmuir sabitidir (L/mg). Denklem (3)'ün doğrusal hali aşağıdaki gibidir:

$$\frac{C_{den}}{q_{den}} = \frac{C_{den}}{q_m} + \frac{1}{b q_m} \quad (4)$$

## 2.3. Freundlich Adsorpsiyon İzoterm Modeli

Freundlich izotermi, heterojen yüzeyler üzerinde adsorpsiyon ısısının homojen olmayan dağılımı ile çok katmanlı adsorpsiyonu tanımlayan ilk bilinen ampirik modeldir. Bu modelde, boya molekülü miktarındaki artış, adsorpsiyon kapasitesini artırır,

diğer bir deyişle, boya molekülü bir adsorpsiyon bölgesinde adsorbe edildiğinde, adsorbent ve adsorbe edilen boya molekülleri arasındaki etkileşim, aynı adsorpsiyon bölgesinde diğer adsorbatların adsorpsiyonu için itici güç olarak hareket eder. Freundlich izotermi denklem (5)'de verildiği gibidir (Freundlich 1906):

$$q_{den} = K_F C_{den}^{1/n} \quad (5)$$

Freundlich sabitleri,  $K_F$  (mg/g) ve  $n$  (boyutsuz), sırasıyla adsorpsiyon kapasitesi ve adsorpsiyon yoğunluğu ile ilişkilidir. Denklem logaritmik şekli doğrusaldır ve denklem 6'da gösterildiği gibidir:

$$\ln q_{den} = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_{den} \quad (6)$$

## 2.4. Adsorpsiyon Kinetikleri

Kinetik çalışmalardan elde edilen bilgiler, adsorpsiyon reaksiyonunun dinamiklerini ve hızını anlamak için faydalıdır ve bir arıtma sisteminde bir adsorbent etkinliğini değerlendirmek için en önemli parametrelerden biridir. Kinetik parametreler, aşağıda sırasıyla verilen yalancı birinci dereceden kinetik, yalancı ikinci dereceden kinetik (Ramirez *et al.* 2011) ve parçacık içi difüzyon (Javadian *et al.* 2014, Weber and Morris 1963) modellerini içeren denklemler kullanılarak analiz edilmiştir.

$$\ln(q_{den} - q_t) = \ln q_{den} - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{den}^2} + \frac{1}{q_{den}} \quad (8)$$

$$q_t = k_i t^{1/2} + C \quad (9)$$

Burada  $q_t$  (mg/g),  $t$  (dk) zamanındaki adsorpsiyon kapasitesidir.  $k_1$  (1/dk), yalancı birinci dereceden modelin hız sabitidir ve  $t'$ 'ye karşı  $\ln(q_e - q_t)$  grafiği çizilerek belirlenir.  $k_2$  (g/mg/dk) yalancı ikinci derece modelin hız sabitidir,  $t'$ 'ye karşı  $t/q_t$ 'nin doğrusal grafiğinin eğiminden hesaplanır.  $k_i$  (mg/(g/dk)<sup>1/2</sup>) parçacık içi difüzyon hızı sabitidir ve  $q_t$ 'ye karşı  $t^{0.5}$ 'in eğiminden hesaplanır.

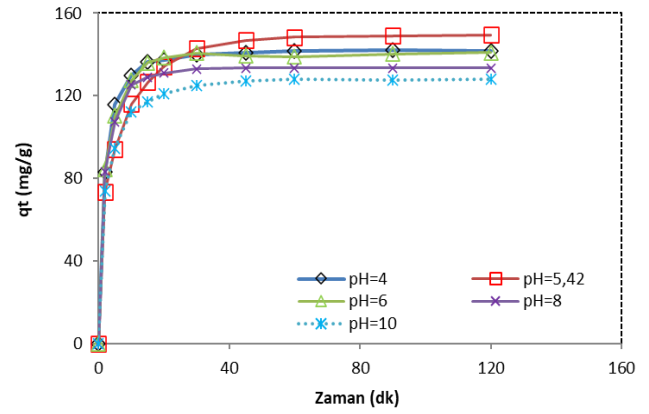


### 3. Bulgular

#### 3.1. Adsorpsiyon Üzerine Başlangıç pH'ının Etkisi

Adsorpsiyon sisteminin pH'ı, bir katı fazın (adsorbent) yüzey yükü çözeltinin pH'ı ve adsorbat molekülünün iyonlaşması/ayırışması değiştirilerek değiştirilebildiğinden, adsorbent üzerine adsorbatın adsorpsiyonunu kontrol eden en önemli faktörlerden biridir. Bu bedenle başlangıç pH'ının adsorpsiyon üzerine etkisini belirlemek için deneyler, 0,05 g/100 mL P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> dozajı, 75 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonu, 4-10 pH aralığında, 25 °C sıcaklıkta ve 250 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). pH<2,5'a ayarlandığı zaman naftol yeşili B çözeltisinin rengi açıldığı için çok düşük pH'larda çalışılmamıştır. Çizelge 1'den görüldüğü gibi asidik pH aralığında giderim verimleri pH 4, 5,42 ve 6 için sırasıyla %96,31, %97,77 ve %95,88 olmuştur ve giderim verimleri birbirine yakındır. Alkali ortamda, giderme verimliliği nispeten daha düşüktür ve pH 8 ve 10 olduğunda, giderme verimi sırasıyla %90,74 ve %87,01'dir. Asidik aralıkta elde edilen daha yüksek giderim, naftol yeşili B boyasında bulunan negatif yüklü fonksiyonel gruplar ile pozitif yüklü adsorbent yüzeyi arasındaki elektrostatik çekimlerden kaynaklanabilir. Ayrıca hidrojen iyonu adsorbent duvarı ile boya molekülü arasında köprüleyici bir ligand görevi görür. Bununla birlikte, adsorbent üzerinde naftol yeşili B boyasının adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılması için iki olası mekanizma düşünülebilir: (a) adsorbent ve naftol yeşili B boyası arasındaki elektrostatik etkileşim ve (b) naftol yeşili B boyası ile adsorbent arasındaki kimyasal reaksiyon. Düşük pH değeri (asidik aralık), adsorpsiyon sisteminde hidrojen iyonu konsantrasyonunda bir artışa yol açar ve adsorbent yüzeyi hidrojen iyonlarını emerek pozitif yük kazanır, böylece naftol yeşili B boyasının adsorpsiyonunu artırır. Adsorbent yüzeyi asidik aralıkta pozitif olarak yüklendiğinden, adsorbent yüzeyi ile naftol yeşili B anyonları arasında önemli ölçüde güçlü bir elektrostatik çekim meydana gelir ve bu da naftol yeşili B boyasının maksimum adsorpsiyonuna yol açar (Rizk and Hamed 2014). Çizelge 1'de naftol yeşili B adsorpsiyonunda farklı

başlangıç pH'larında dengede adsorplanan naftol yeşili B miktarları ( $q_{den}$ ) ve % giderim değerleri verilmiştir. Çizelge 1'den de görüldüğü gibi 75 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonunda, dengede P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub>'ün adsorpsiyon kapasitesi ( $q_{den}$ ) sırasıyla pH=5 için 141,56 mg/g, pH=5,42 için 143,88 mg/g, pH=6 için 140,98 mg/g, pH=8 için 136,80 mg/g ve pH=10 için 133,91 mg/g olmuştur. En yüksek giderim verimi pH 5,42 (çözeltinin doğal pH'ı) olmuştur. Bu nedenle daha sonraki çalışmalar pH 5,42'de gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.** P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda başlangıç pH'ının etkisi ( $m=0,05$  g/100 mL,  $C_0=75$  mg/L,  $T=25$  °C,  $KH=250$  rpm)

**Çizelge 1.** P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda farklı başlangıç pH'larında dengede adsorplanan naftol yeşili B miktarları ve % giderim değerleri ( $m=0,05$  g/100 mL,  $C_0=75$  mg/L,  $T=25$  °C,  $KH=250$  rpm)

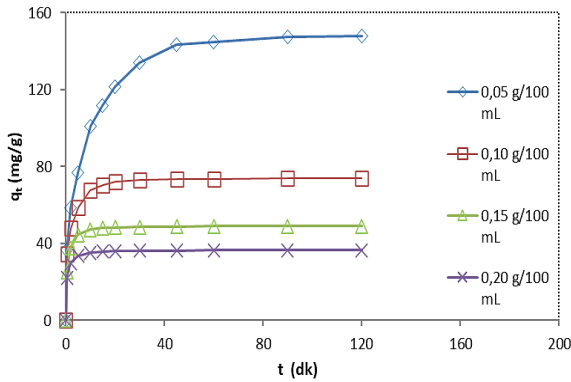
pH	$q_{den}$ (mg/g)	% Giderim
4	141,56	96,30
5,42	143,88	97,77
6	140,98	95,92
8	133,40	90,74
10	127,90	87,01

#### 3.2. Adsorbent madde miktarının etkisi

Adsorbent madde dozajı boyar maddenin adsorpsiyonu için gerekli yüzey alanı ve bağlanma yerleri sağladığı için uygun miktarda seçilmesi önemlidir. Naftol yeşili B giderimi üzerine adsorbent madde miktarının etkisini belirlemek için deneyler, 75 mg/L başlangıç naftol yeşili B

konsantrasyonunda, 5,42 pH' da, 25 °C sıcaklıkta ve 250 rpm karıştırma hızında farklı miktarlarda P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojelini (0,05-0,2 g/100 mL) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Adsorbent miktarı deneylerinin sonuçları Şekil 3 ve Çizelge 2' de gösterilmiştir. Adsorbent miktarının 0,05 g/100 mL'den 0,20 g/100 mL'ye artırılması naftol yeşili B giderim verimini %97,94'den %92,95'e düşürürken, dengede adsorpsiyon kapasitesini 149,90 mg/g'dan 36,46 mg/g'a düşürmüştür. Tüm adsorpsiyon bölgelerinin yığılma veya etkileşim nedeniyle adsorpsiyona katılmayabileceği düşünüldüğünde adsorpsiyon kapasitesi nispeten azalmıştır (Mousavi et al. 2018).

Adsorbent miktarının 0,05 g/100 mL' den 0,20 g/100 mL' ye artması adsorpsiyonun dengeye varma süresini 60 dk'dan 30 dk'ya düşürmekle birlikte, çalışılan adsorbent miktarlarında giderim veriminin fazla etkilenmemesi ve adsorbent miktarı arttıkça  $q_{den}$  değerlerinin düşmesi nedeniyle optimum adsorbent miktarı 0,05 g/100 mL olarak kabul edilmiştir ve sonraki çalışmalar 0,05 g/100 mL adsorbent dozajlarında gerçekleştirilmiştir. Adsorbent miktarının düşük olması ekonomik açıdan da önemlidir.



**Şekil 3.** P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda adsorbent miktarının etkisi (pH=5,42, C<sub>0</sub>=75 mg/L, T=25 °C, KH=250 rpm)

**Çizelge 2.** P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda farklı adsorbent miktarlarında dengede adsorplanan naftol yeşili B miktarları ve % giderim değerleri (pH=5,42, C<sub>0</sub>=75 mg/L, T=25 °C, KH=250 rpm)

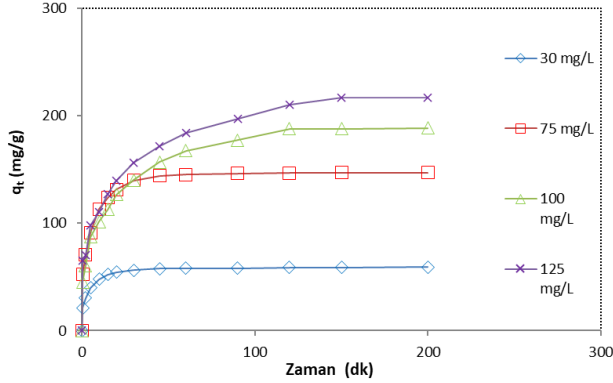
Adsorbent miktarı (g/100 mL)	$q_{den}$ (mg/g)	Giderim (%)
0,05	149,90	97,77
0,10	73,88	97,12
0,15	48,98	95,60
0,20	36,46	92,95

### 3.3. Başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonunun ve temas süresinin etkisi

Bir adsorpsiyon prosesinde adsorbatın başlangıçtaki konsantrasyonu, sıvı ve katı fazın kütle transferi itici gücü arasındaki farkı gösteren anahtar bir parametredir. Boya konsantrasyonu, adsorbat türleri için adsorbent üzerindeki adsorpsiyon bölgelerinin sayısını temsil eder. Bir adsorpsiyon işleminde, adsorpsiyon kapasitesi, sabit bir değere ulaşana kadar boya konsantrasyonundaki artışla kademeli olarak artar. Bu artış, kütle transfer işlemi için itici güçteki farktan kaynaklanır ve adsorpsiyon alanlarının çoğu doygun hale geldiğinden nihai sabit değere ulaşılır.

30-125 mg/L arasında değişen farklı başlangıç konsantrasyonlarında temas süresi ile naftol yeşili B'nin adsorpsiyon kapasitesindeki değişim, sabit sıcaklık (25 °C), adsorbent miktarı (0,05 g/100 mL) ve pH'da (5,42) incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4 ve Çizelge 3' de verilmiştir. Şekilden başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyonun dengeye ulaşma süresinin uzadığı ve dengeye ulaştıktan sonra adsorpsiyon derecesinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Boya konsantrasyonunun artmasıyla aktif adsorpsiyon bölgeleri için artan rekabet olacağı ve adsorpsiyon işleminin giderek yavaşlayacağı gerçeğinden dolayı dengeye ulaşılması daha uzun sürer. Çizelge 3' den görüldüğü gibi 25 °C'de naftol yeşili B'nin başlangıç konsantrasyonu 30 mg/L'den 125 mg/L'ye yükseldiği zaman boya giderim etkinliği % 98, 40'den %86,82'ye düşmüştür. Bu daha düşük boya konsantrasyonunda boya adsorpsiyonu için P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojelinin yüzeyinde çok sayıda

aktif bölgenin mevcut olmasından kaynaklanabilir. Bununla birlikte, boya konsantrasyonunun artmasıyla, boya molekülleri tarafından bağlanma bölgelerinin doygunluğu nedeniyle yüzey aktif bağlanma bölgelerinin sayısı azalmıştır (Rehman *et al.* 2013).



Şekil 4. P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda başlangıç naftol yeşili B derişiminin etkisi ( $m=0,05$  g/100 mL, pH=5,42, T=25 °C, KH=250 rpm)

### 3.4. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklığın etkisi, 30-125 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonuna sahip boya çözeltileri kullanılarak, 25, 35 ve 45 °C sıcaklıkta incelenmiştir ve dengede elde edilen adsorpsiyon kapasitesi değerleri ve naftol yeşili B giderim verimleri Çizelge 3'te verilmiştir. Anyonik boyanın çözünürlüğünün artması nedeniyle sıcaklığın 25°C'den 45°C'ye yükselmesiyle 125 mg/L naftol yeşili B konsantrasyonunda boya giderimi %86,82'den %76,15'e düşmüştür. Bu, adsorpsiyon işleminin ekzotermik doğada olduğunu gösterir (Yagub *et al.* 2014). Daha yüksek sıcaklıkta adsorpsiyon kapasitesinin azalması adsorbentın iç ısı enerjisi ile boya moleküllerinin desorpsiyonuna atfedilebilir (Saini *et al.* 2017).

Çizelge 3. P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda farklı başlangıç derişimlerinde ve sıcaklıklarda elde edilen dengede adsorplanan naftol yeşili B miktarları ve % giderim değerleri ( $m=0,05$  g/100 mL, pH=5,42, KH=250 rpm)

T, 25 °C			T, 35 °C		
C <sub>0</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim	C <sub>0</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim
30	60,3	98,4	30	59,8	97,7
75	149,9	97,7	75	147,7	96,8
100	190,3	94,4	100	183,0	91,7
125	216,1	86,8	125	211,0	84,7
T, 45 °C					
C <sub>0</sub> (mg/L)	q <sub>den</sub> (mg/g)	% Giderim			
30		57,6	95,1		
75		138,2	91,1		
100		163,7	82,0		
125		188,5	76,1		

### 3.5. Adsorpsiyon denge çalışması

Adsorpsiyon izotermi, boya adsorpsiyonunu sabit sıcaklık ve dengede boya konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak tanımlar ve adsorbe edilen miktar ile denge konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi açıklar. Adsorpsiyon izoterm deneyleri, 0,05 g/100 mL P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> dozajında, 30-125 mg/L arasında değişen naftol yeşili B konsantrasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Naftol yeşili B'nin denge verileri, adsorpsiyon mekanizmasını tanımlamada uygun modeli bulmak için Langmuir ve Freundlich denklemlerine yerleştirilerek analiz edilmiştir ve bu izotermilerden elde edilen adsorpsiyon sabitleri Çizelge 4'te verilmiştir. Langmuir parametreleri  $q_m = 243,90$  mg/g,  $b = 0,482$  L/mg ve  $R^2$  (korelasyon katsayısı) = 0,991 olarak bulunurken, Freundlich parametreleri  $K_f = 82,34$ ,  $n = 2,734$  ve  $R^2 = 0,946$  olarak bulunmuştur. Langmuir sabiti olan  $b$  değeri naftol yeşili B boyasının bağlanması için adsorbentın ilgisini göstermektedir. Freundlich sabiti olan  $n$  değeri, adsorbentın yüzeyinin adsorpsiyon yoğunluğunu veya heterojenliğini tanımlar. Bu çalışmada  $n$  değerleri, pozitif bir adsorpsiyon sürecini gösteren 1 ile 10 arasında bulunmuştur.  $R^2$  değerleri karşılaştırıldığında Langmuir izoterm modelinin daha uygun olduğu görülmektedir. Bu da sentezlenen poli(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojelinin yüzeyinde naftol yeşili B adsorpsiyonunun tek

katmanlı bir adsorpsiyon prosesi olarak düşünülmesi gerektiğini göstermektedir.

**Çizelge 4.** Naftol yeşili B'nin P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline adsorpsiyonunda farklı sıcaklık değerlerinde Langmuir ve Freundlich modeline göre elde edilen adsorpsiyon sabitleri ( $m=0,05\text{g}/100\text{ mL}$ ,  $\text{pH}=5,42$ ,  $T= 35\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{KH}=250\text{ rpm}$ )

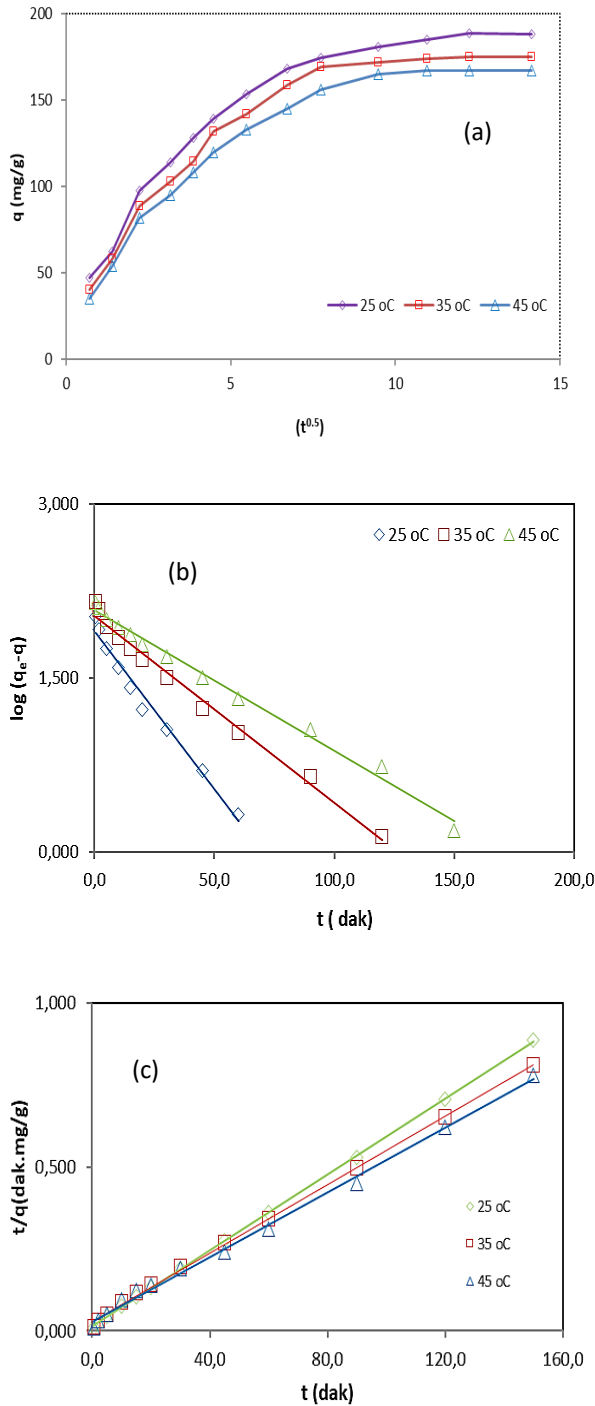
Langmuir modeli		Freundlich modeli			
$q_m$ (mg/g)	$b$ (L/mg)	$R^2$	$K_f$ (mg/g)	$n$	$R^2$
243,9	0,48	0,99	82,34	2,73	0,94

### 3.6. Adsorpsiyon kinetiği

Kinetik parametreler genellikle adsorpsiyon hızının tahmininde yardımcı olur ve adsorpsiyon proseslerinin mekanizması ve doğası hakkında bilgi verir. Bu nedenle, naftol yeşili B'nin P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> üzerine adsorpsiyon kinetiğini analiz etmek için yalancı birinci ve ikinci derece kinetik modelleri ile parçacık içi difüzyon modeli kullanılmıştır. Kinetik deneyler farklı başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonlarında,  $\text{pH } 5,42$ 'de,  $0,05\text{ g}/100\text{ mL}$  P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> dozajında,  $25$ ,  $35$  ve  $45\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $^\circ\text{C}$  gerçekleştirilmiştir.  $25\text{ }^\circ\text{C}$  için kinetik grafiklerin lineer eğrileri Şekil 5(a-c)'de gösterilmiştir.  $25$ ,  $35$  ve  $45\text{ }^\circ\text{C}$  için kinetik parametreler ve hesaplanan başlangıç adsorpsiyon hızları Çizelge 5 ve Çizelge 6'da listelenmiştir. Birinci derece kinetik model için  $\log(q_{\text{den}}-q)$ 'ya karşı çizilen  $t$  doğrularının eğimi  $-k_1/2,303$ 'ü, kayması  $\log q_{\text{den}}$ 'i verir ve adsorpsiyon hız sabiti  $k_1$  ve denge adsorpsiyon kapasitesi  $q_{\text{den,hes}}$  değerlerinin hesaplanmasını sağlar. İkinci derece kinetik modeli için  $t/q$ 'ya karşı çizilen  $t$  doğrularının eğimi  $1/q_{\text{den}}$ , kayması  $1/k_2 q_{\text{den}}^2$  'i verir ve eğimden hesaplanan  $q_{\text{den,hes}}$  değeri kullanılarak, kesme noktasından adsorpsiyon hız sabiti  $k_2$  değeri belirlenir. Çizelgeden  $k_1$  ve  $k_2$  değerlerinin sıcaklıkla azaldığı görülmektedir. Korelasyon katsayılarına ( $R^2$ ) dayalı olarak, deneysel verilerin daha yüksek korelasyon katsayısı değerlerine sahip olan ( $R^2=0,999$ ) yalancı ikinci dereceden kinetik modele daha iyi uyduğu görülmektedir. Ayrıca, yalancı ikinci dereceden modelden hesaplanan  $q$  değerleri ( $q_{\text{den,hes}}$ ), deneysel  $q$  değerleriyle ( $q_{\text{den,den}}$ ) diğer modellerle

hesaplanandan daha uyumludur. Bu sonuç, aynı zamanda hız sınırlayıcı adımın kimyasal sorpsiyon olduğunu da işaret eder (Baskaralingam *et al.* 2006). Parçacık içi difüzyon modeli için  $q_t$ 'ya karşı  $t^{0.5}$  eğrileri çizilmiş (Şekil 5.a) ve  $q'$ 'nin  $t^{0.5}$  ile değişiminin doğrusal olduğu bölgedeki eğimlerden bulunan  $k_i$  değerleri ( $25$ ,  $35$  ve  $45\text{ }^\circ\text{C}$  için) Çizelge 5' de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonu arttıkça iç difüzyon hız sabiti artarken, sıcaklık artışıyla azalmaktadır. Gözenekli katılar için adsorpsiyon işlemi üçe aşamaya ayrılabilir: (1) dış difüzyon (veya sınır tabaka difüzyonu) olarak da adlandırılan adsorbent dış yüzeyine sıvı film boyunca adsorbat dış kütle transferi, (2) adsorbat maddenin adsorban dış yüzeyinden, partikül içi difüzyon (veya iç difüzyon) olarak adlandırılan adsorban iç yapısının gözeneklerine taşınması ve (3) adsorbat maddenin adsorbent'in iç ve dış yüzeyleri üzerindeki aktif bölgelere adsorpsiyonu. Üçüncü adım çok hızlı kabul edilir ve bu nedenle hız kontrol adımı olarak ele alınmaz. Genel olarak adsorpsiyon hızı, dış difüzyon veya partikül içi difüzyon veya her ikisi ile kontrol edilir.

Yalancı ikinci dereceden model adsorpsiyon işlemi difüzyon mekanizmasını tanımlayamadığından, naftol yeşili B'nin P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> üzerine adsorpsiyon sürecini belirlemek için partikül içi difüzyon modeli kullanılmıştır. Denklem (2)'a göre, eğer adsorpsiyon işleminde partikül içi difüzyon söz konusuysa,  $q_t$ 'ye karşı  $t^{0.5}$ 'in grafiği lineer olmalıdır. Lineer eğriler orijinden geçerse, partikül içi difüzyon hız kontrol adımıdır. Aksi takdirde, parçacık içi difüzyon hız kontrol eden tek adım değildir ve bir dereceye kadar dış difüzyon da adsorpsiyon sürecini kontrol eder. Şekil 5a' da gözlemlendiği gibi, naftol yeşili B adsorpsiyonu için eğri doğrusal olmasına rağmen orijinden geçmemiştir, bu da parçacık içi difüzyonun tek hız kontrol eden adım olmadığını göstermektedir. Bu nedenle hem partikül içi difüzyon hem de dış difüzyon, genel adsorpsiyon sürecinde önemli roller oynayabilir.



**Şekil 5.** Farklı sıcaklıklarda P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda elde edilen (a) parçacık içi difüzyon modeli, (b) yalnızca birinciden kinetik modeli ve (c) yalnızca ikinciden kinetik modeli grafikleri (pH=5,42, m=0,05 g/100 mL, C<sub>0</sub>= 100 mg/L, KH=250 rpm)

**Çizelge.5** Farklı sıcaklıklarda P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda elde edilen iç difüzyon hız sabiti değerleri (pH=5,42, m=0,05 g/100 mL, C<sub>0</sub>= 100 mg/L, KH=250 rpm)

T (°C)					
25		35		45	
k <sub>i</sub> mg/(g/dk <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>	k <sub>i</sub> mg/(g/dk <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>	k <sub>i</sub> mg/(g/dk <sup>0.5</sup> )	R <sup>2</sup>
23,91	0,95	20,45	0,97	20,35	0,94

**Çizelge 6.** P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojeline naftol yeşili B adsorpsiyonunda farklı sıcaklıklarda elde edilen birinci ve ikinci derece hız sabitlerinin ve deneysel ve kinetik modellerden bulunan q<sub>den</sub> değerlerinin karşılaştırılması (pH=5,42, m=0,05g/100 mL, C<sub>0</sub>= 100 mg/L, KH=250 rpm).

Birinci mertebe kinetik model				
T (°C)	q <sub>den,den</sub> (mg/g)	k <sub>1</sub> (1/dk)	q <sub>den,hes</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
25	190,30	0,04210	121,20	0,961
35	183,06	0,03707	109,75	0,975
45	163,70	0,02786	80,72	0,955
İkinci mertebe kinetik model				
T (°C)	q <sub>den,den</sub> (mg/g)	k <sub>2</sub> (g/mg.dk)	q <sub>den,hes</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>
25	190,30	0,0296	204,08	0,999
35	183,06	0,0278	192,30	0,999
45	163,70	0,0142	172,41	0,999

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> hidrojel kompoziti adsorbent olarak kullanılarak kesikli sistemde naftol yeşili B'nin sulu çözeltilerden giderimi araştırılmıştır. pH'ın adsorpsiyon üzerine etkisinin incelendiği deneyler 75 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonunda pH= 4-10 aralığında gerçekleştirilmiştir. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi pH=5,42'de 149,90 mg/g ve giderim verimi %97,77 olarak elde edilmiştir. Adsorbent dozajının naftol yeşili B adsorpsiyonu giderimi üzerine etkisinin incelendiği deneyler 0,05, 0,10, 0,15, ve 0,20 g/100 mL adsorbent dozajlarında yapılmıştır. En yüksek adsorpsiyon kapasitesi 0,5 g/100 mL P(4-VP-ko-AAM)/EuCl<sub>3</sub> dozajında 149,90

mg/g olarak elde edilmiştir ve dengede adsorplanan madde miktarları diğer dozajlar için sırasıyla 73,88 mg/g, 48,98 mg/g ve 36,46 mg/g olmuştur. 75 mg/L başlangıç naftol yeşili B konsantrasyonunda 25, 35 ve 45 °C için dengede adsorpsiyon kapasiteleri sırasıyla 149,90, 147,76 ve 138,26 mg/g olmuştur. Giderim verimleri ise sırasıyla; %97,77, 96,82 ve 91,17 olarak hesaplanmıştır. Artan sıcaklık ile naftol yeşili B gideriminin azalması adsorpsiyonun ekzotermik olduğunu göstermiştir. Naftol yeşili B konsantrasyonunun artmasıyla adsorplanan naftol yeşili B yüzdesinin düştüğü, adsorbent birim kütlesi başına adsorplanan naftol yeşili B miktarının arttığı belirlenmiştir. Adsorpsiyon verilerinin modellenmesinde Langmuir ve Freundlich izotermelerinin korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında adsorpsiyonun Langmuir izotermi ile daha iyi bir uyum sağladığı görülmektedir. Naftol yeşili B'nin P(4-VP-ko-AAm)/EuCl<sub>3</sub> hidrojelü üzerine adsorpsiyon kinetiği, yalancı ikinci dereceden denklem, yalancı birinci derece ile karşılaştırıldığında deneysel verilerin en iyi korelasyonunu sunmuştur. Naftol yeşili B'nin adsorpsiyon sürecini öğrenmek için partikül içi difüzyon mekanizması test edilmiştir. Kinetik sonuçlar, adsorpsiyon prosesinin hız belirleme basamaklarından biri olarak iç difüzyon ile yalancı ikinci derece kinetiği ile tanımlanabileceğini göstermiştir.

#### **Teşekkür**

Bu tez çalışmasını YLMUB020-10 proje numarası ile destekleyen Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

#### **5. Kaynaklar**

- Akkaya, R., Ulusoy, U., 2011. Preparation and characterization of poly(acrylamide/maleic acid)-based hydrogels composites, *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, **39**, 359-370.
- Bartoňová, L., Ruppenthalová, L., Ritz, M., 2017. Adsorption of naphthol green B on unburned carbon: 2- and 3-parameter linear and non-linear equilibrium modelling. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **25**, 37-44.
- Baskaralingam, P., Pulikesi, M., Elango, D., Ramamurthi, V., Sivanesan, S., 2006. Adsorption of acid dye onto

organobentonite. *Journal of Hazardous Material*, **128**, 138-144.

- Boztepe, C., Şölenner, M., Yüceer, M., Künkül, A., 2015. Kabasakal, O.S., Modeling of swelling behaviors of acrylamide-based polymeric hydrogels by intelligent system. *Journal of Dispersion Science and Technology*, **36**,1647-1656.
- Budtova, T.V., Suleiman, I.E., Frenkel, S.Y., 1993. On the swelling of polyelectrolyte hydrogels in solutions of linear-polymers. *Vyskom. Sodeny*, **35**,93-98.
- Das A, Dey A., 2020. P-nitrophenol-bioremediation using potent *Pseudomonas* strain from the textile dye industry effluent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **8**, 103830.
- Duran, S., Şolpan, D., Güven, O., 1999. Synthesis and characterization of acrylamide-acrylic acid hydrogels and adsorption of some textile dyes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms*, **151**, 196-199.
- Freundlich, H., 1906. Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry A*, **57**(385471): 1100-1107.
- Javadian, H., Ghaemy, M., Taghavi, M., 2014. Adsorption kinetics, isotherm, and thermo-dynamics of Hg<sup>2+</sup> to polyaniline/hexagonal mesoporous silica nanocomposite in water/wastewater. *Journal of Material Science*, **49**, 232-242.
- Keskin, C.S., 2017. Dispers mavi 56 boyasınının Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> gömülü akrilamid temelli polimer ile giderimi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**, 363-371.
- Mittal, H., Alili, A.A., Alhassan, S.M., 2020. Adsorption isotherm and kinetics of water vapors on novel superporous hydrogel composites, *Microporous and Mesoporous Materials*, **299**, 110106.
- Mousavi, S., Parvini, M., Ghorbani, M., 2018. Adsorption of heavy metals (Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>) on novel bifunctional ordered mesoporous silica: Optimization by response surface methodology, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **84**, 123–141.
- Ödemiş, H., 2014. Ksantan gam ve sepiyolit içeren yeni akrilamid/çinko akrilat kompozit hidrojelilerin hazırlanışı, karakterizasyonu ve adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 101.

- Oztop, H.N., Saraydin, D., Karadag, E., Caldıran, Y., Güven, O., 1998. Influence of some aromatic amino acids on the swelling behavior of acrylamide/maleic acid hydrogel. *Polymer Bulletin*, **40**, 575-582.
- Pérez-Marín, A., Zapata, V.M., Ortuno, J., Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., 2007. Removal of cadmium from aqueous solutions by adsorption onto orange waste. *Journal of Hazardous Material*, **139**, 122-131.
- Pıhtılı G., Tanyol M., Birkan K. 2022, Naphthol green B Removal using a Novel Hydrogel Composite: Thermodynamics, Isotherms, Kinetics and Optimization by RSM, ChemistrySelect DOI: 10.1002/slct.202201719, Article ID: SLCT202201719.
- Ramírez, E., Burillo, S.G., Barrera-Díaz, C., Roa, G., Bilyeu, B., 2011. Use of pH-sensitive polymer hydrogels in lead removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Material*, **192**, 432-439.
- Rehman, M.S.U., Munir, M., Ashfaq, M., Rashid, N., Nazar, M.F., Danish, M., Han, J.I., 2013. Adsorption of brilliant green dye from aqueous solution onto red clay, *Chemical Engineering Science*, **228**, 54-62.
- Rizk, S.E., Hamed, M.M., 2014. Batch sorption of iron complex dye, naphthol green B, from wastewater on charcoal, kaolinite, and tafla. *Desalination and Water Treatment*, **56**, 1536-1546.
- Saini, J., Garg, V.K., Gupta, R.K., Kataria, N., 2017. Removal of Orange G and Rhodamine B dyes from aqueous system using hydrothermally synthesized zinc oxide loaded activated carbon (ZnO-AC). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**, 884-892.
- Saraydin, D., Karadag, E., Güven, O., 2001. Use of superswelling acrylamide/maleic acid hydrogels for monovalent cationic dye adsorption. *Journal of Applied Polymer Science*, **79**, 1809-1815.
- Tosun, E., Boztepe, C., Baysar, A., Künkül, A., 2019. Asidik boyaların poli(akrilamid-vinilimidazol) hidrojel kullanılarak atık sulardan giderimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **25**, 914-921.
- Üzüm, B.Ö., 2008. Yeni akrilamid esaslı anyonik IPN'lerin sentezi, karakterizasyonu ve şişme/soğurum/denetimli salınım potansiyellerinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Adnan Menderes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın, 162.
- Varjani, S.J., Upasani, V.N. 2017. Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. *Bioresource Technology*, **232**, 389-397.
- Yagub M.T., Sen T. K., Afroze S., Ang H.M. 2014. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review, *Adv. Colloid Interface Sci*, **209**, 172-184.
- Weber, W.J., Morris, J.C., 1963. Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, **89**, 31-60.
- Zhang, F., Ni, Z., Xia S., Liu, X., Wang, Q., 2009. Removal of naphthol green B from aqueous solution by calcined layered double hydroxides: adsorption property and mechanism studies. *Chinese Journal of Chemistry*, **27**, 1767-1772.



# Enhancement of Optical and Photonic Properties of the Micro-sized ZnO Particles by Cerium Doping

Ramazan DALMIŞ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Buca, 35390, Izmir, Turkey.

Corresponding author e-mail: ramazan.dalmis@deu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5508-2539>

Geliş Tarihi: 27.05.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

## Abstract

Water shortage is one of the most urgent issues today, owing to rising population and environmental reasons. The most significant thing that humanity can do to solve this situation is to recycle waste or contaminated water. ZnO has been widely employed for photocatalytic applications due to its unique features. It was aimed to improve the photocatalytic properties of the micron-sized ZnO particles by doping with Cerium dopant, which is a rare earth element and used in many photocatalytic studies. Structural, morphological, optical, and photocatalytic properties were characterized to examine the effect of the Ce dopant ratio. The increased grain size demonstrated that Ce<sup>4+</sup> was efficiently integrated into the ZnO lattice. Ce doping into the Wurtzite ZnO lattice improved both the emission and photocatalytic efficiency of the micro-sized ZnO particles. Additionally, it was revealed that the Ce doping procedure is more effective than grain size on the photocatalytic efficiency.

## Keywords

ZnO micro-particle; Ce dopant; Photoluminescence; Photocatalytic; Characterization

## Mikro Boyutlu ZnO Parçacıklarının Optik ve Fotonik Özelliklerinin Seryum Katkılaması ile İyileştirilmesi

### Öz

Artan nüfus ve çevresel nedenlerle su kıtlığı günümüzün en acil sorunlarından biridir. Bu durumu çözmek için insanlığın yapabileceği en önemli şey kirli suları geri dönüştürmektir. ZnO, benzersiz özellikleri nedeniyle fotokatalitik proses uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemiyle üretilen mikron boyutlu ZnO partiküllerinin, nadir toprak elementi olan Seryum katkı maddesi katkılanarak fotokatalitik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ce katkı oranının etkisini incelemek için yapısal, morfolojik, optik ve fotokatalitik özellikler karakterize edildi. Artan tane boyutu, Ce<sup>4+</sup>'nin ZnO kafesine verimli bir şekilde entegre olduğunu gösterdi. Wurtzite ZnO kafesine Ce katkısı, mikro boyutlu ZnO parçacıklarının hem emisyonunu hem de fotokatalitik verimliliğini iyileştirdi. Ayrıca fotokatalitik verim üzerinde Ce doping işleminin tane boyutundan daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

### Anahtar kelimeler

ZnO mikro-parçacık; Ce katkılaması; Fotoluminesans; Fotokatalitik; Karakterizasyon

## 1. Introduction

Environmental contamination has become a severe hazard to humanity as industry and civilization have grown rapidly (A. Gupta, Saurav and Bhattacharya 2015). Water pollution caused by the discharge of several contaminants from the industry has worsened the water quality. Therefore, its management is a major problem (L. Li *et al.* 2015). As natural purification cannot remove such harmful organic contaminants from water sources, various

attempts have been carried out to identify adequate procedures for their total removal (Choudhary, Bisht, Satpati and Mohapatra 2021). The photodecomposition of these contaminants has evolved as an important option in recent decades and has been widely employed (Yang *et al.* 2016). Because of their variable band gap, cheap production cost, and favorable optical features, semiconductor-assisted photocatalysis has attracted interest (Xu, Anusuyadevi, Aymonier, Luque and Marre 2019).



Various semiconductor materials, such as ZnO, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>, and WO<sub>3</sub>, have been employed for photocatalytic degradation in water and wastewater treatment to eliminate environmental pollutants (Demirci, Dikici, Tuncay ve Kaya 2020, Singh and Borthakur 2018). Among these semiconductor materials, ZnO has been preferred for photocatalytic applications due to its flexible, nontoxic, low cost, and distinctive electrical and optical features (Bomila, Suresh and Srinivasan 2019). Also, ZnO-based materials are widely used in various applications, including solar cells, chemical- and bio-sensors, ultraviolet (UV) lasers, light-emitting diodes (LEDs), photo-detectors, piezoelectric transducers, and actuators, hydrogen storage, photocatalysts, and soon, batteries (Kumar *et al.* 2015, Thambidurai, Muthukumarasamy, Velauthapillai and Lee 2014).

To a certain extent, doping ZnO nanoparticles increases surface flaws, which may shift absorption toward the visible area. Some studies have been conducted in order to dope rare earth metals (Er, Yb, La, Nd, and Ce) into the interstitial locations of ZnO crystals (H. L. Li, Lv, Li and Yu 2014, Sinha, Ray, Bhandari, Godara and Kumar 2014, Zamiri, Lemos, Reblo, Ahangar and Ferreira 2014). Rare earth metal-doped semiconductor nanomaterials have found widespread use in lasers, amplifiers, thin film electroluminescent devices, and optoelectronic/cathodoluminescent devices (Sinha *et al.* 2014, Zamiri *et al.* 2014). Rare earth ion doping can build traps for photo-generated charge carriers, by lowering the rate of electron-hole pair recombination (Sin, Lam, Lee and Mohamed 2014). Thus, hydrothermal, spraypyrolysis, radio frequency sputtering, sol-gel, chemical spray, thermal evaporation, and other techniques have been used to create lanthanide-doped ZnO (Kumar *et al.* 2015).

Studies on the photocatalytic properties of the Ce-doped ZnO materials have already been conducted. However, these studies have generally focused on Ce doping to the nano-sized structures (particles, rods, pindles etc.) (Choudhary *et al.* 2021, Karidas, Veena, Pujari, Krishna and Chundururu 2020, Kumar *et al.* 2015, Pathak, Coetsee-Hugo, Swart, Swart and Kroon 2020). For example, Kumar *et al.* investigated Ce

doped ZnO nanoparticles for the photocatalytic degradation of direct red-23 dye (Kumar *et al.* 2015). They discovered that Ce-doped ZnO nanoparticles had significant photocatalytic activity, and that the degradation percentage increased with increasing Ce concentration (Kumar *et al.* 2015).

Nanotechnology may significantly improve many features of daily life for people, such as by enabling the production of clean energy and pure drinking water (Djaja and R. 2013). However, there is little information available regarding the exposure to nanoparticles or their effects on human health and safety in working environments, making it impossible to make an accurate risk assessment (Savolainen *et al.* 2010). Particularly, the separation of the photocatalytic particles to be used from water is of critical importance. Therefore, the development of micro-sized photocatalysts with high photocatalytic efficiency will be an important advantage. However, studies on Ce doping of micron-sized ZnO particles and its effect on their optical and photocatalytic properties are scarce. Therefore, this study characterizes the structural, morphological, optical, and photocatalytic properties of the 0.5%-2% Ce doped micro-particles, revealing the effect of the doping process. XRD, XPS, Powder Size Distribution, SEM, Photoluminescence spectrofluorometer, and photocatalytic tests analyzed the properties of the particles produced using the sol-gel method.

## **2. Experimental Procedure**

### **2.1 Sol- Gel Production**

To produce ZnO particles, zinc nitrate hexahydrate (Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 99%, Aldrich Chemistry) was used as the initial raw material. In 300 ml absolute ethanol, 59.488 g of zinc nitrate hexahydrate was added. To create a homogeneous and clear solution, the solution was mixed for 30 minutes to finish the hydrolysis process. Cerium nitrate hexahydrate was added to the precursor solution in various concentrations (0, 0.5, 1, and 2 mole percent) with steady stirring until full dispersion. Following the creation of the transparent sol, 3 mL of glacial acetic acid and 0.1 mole of trietanolamin were added to the solution, as the chelating agent. Later, vigorously

stirred for 24 hours to enhance the gel formation. The powders were then annealed for 2 hours at 500°C. Thus, doped and undoped ZnO particles were obtained.

## 2.2 Characterization Methods

The crystal structures of the particles were determined using a Rigaku ULTIMA 3-Rint 2200/PC system X-ray diffractometer (XRD) in the  $2\theta$  range of 3–90, using Cu K $\alpha$  with a wavelength of 0.1542 nm radiation produced with 40 kV and 36 mA current settings. The XPS measurements of the particles were carried out by a Thermo-Scientific Instrument equipped with an Al-K $\alpha$  irradiation source (1486.7 eV). The XPS survey scans were performed from -10 eV to 1350 eV with a scanning speed of 1 eV, by applying a pass energy of 150 eV. Each sample was scanned 20 times from a single point. Calibration of the instrument was performed according to the gold 4f<sub>7/2</sub>.

The Malvern Nano ZS device, using the dynamic light scattering method, measured powder size distribution (PSD). The particle morphologies of the samples were studied using Zeiss Sigma 500 field emission scanning electron microscope. Steady-state excitation/emission spectra of the particles were recorded by an FLS920 spectrofluorometer from Edinburgh Instruments. The degradation of methylene blue (MB) in an aqueous solution under UV light was used to investigate the photocatalytic activity of the ZnO particles. To achieve an adsorption–desorption equilibrium of MB on the surface of the particles, 0.15 g particle were suspended in 50 ml of 10<sup>-5</sup> M MB aqueous solution, which was magnetically agitated for 60 minutes in the dark medium.

## 3. Results and Discussions

### 3.1 XRD Analysis

The intensity data of the calcinated ZnO-based powder samples were gathered throughout a 20–90° range. The general XRD patterns of the ZnO powders are presented in Figure 1 (a). As can be observed from Fig. 1(a) diffraction peaks were located at the angles ( $2\theta$ ) of 31.86°, 34.54°, 36.36°, 47.66°, 56.68°, 62.94°, 66.44°, 68.02°, 69.16°, 72.68°, corresponding

to the crystalline planes of the hexagonal Wurtzite zinc oxide structure (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112), (201), (004) and (202), respectively (Al Abdullah, Awad, Zaraket, & Salame, 2017). All of the diffraction peaks matched the JCPDS number of 00-036-1451, and there were no secondary peaks other than ZnO. The peak at  $2\theta = 36.29^\circ$  with (101) miller index plane exhibited the highest intensity, which is the major peak for the samples (see Fig. 1 (a)).

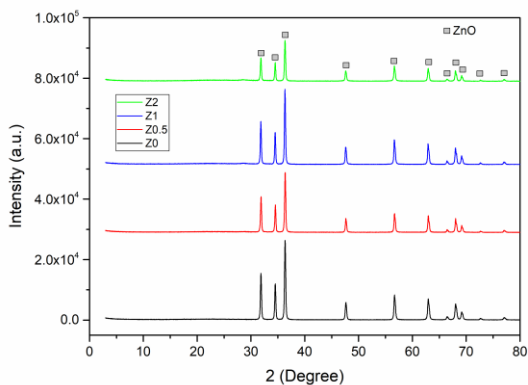
To show the Ce dopant effect, diffraction peaks at the (101) plane are presented in Fig. 1 (b). As can be observed from Fig. 1 (b), there is a considerable shift at the (101) peak after the doping process. The peak, belonging to the undoped sample was 36.36°, shifted to 36.34° after doping by the maximum Ce dopant. However, no linear change was observed between the dopant ratio and the peak shift level. For example, after 1% Ce doping, it caused a shift from 36.36° to 36.32°, causing more shifts than the maximum doping (2% Ce). Additionally, the peak intensity value was also seen to decrease, in proportion to the amount of dopant, by almost half after the doping process. The Debye-Scherrer equation was used to compute the average crystalline sizes of the samples, using FWHM values of the (101) peak.

$$D = (0.89 \times \lambda) \times (\beta \times \cos\theta) \quad (1)$$

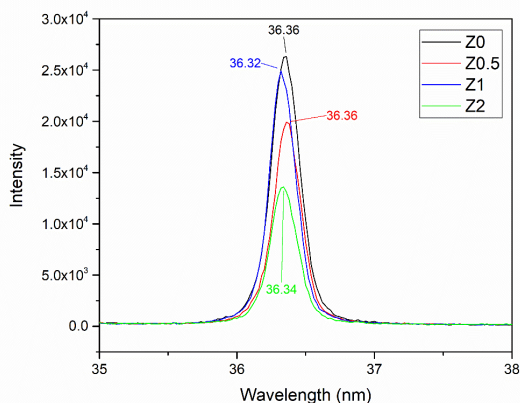
where D is crystalline size,  $\lambda$  is the wavelength of radiation,  $\beta$  is full of half maximum of  $2\theta$  (101) peak,  $\theta$  is the angle of the (101) XRD peak (Keskin, Dalmis, Birlik ve Azem 2020). Calculated average crystallite sizes of the samples with  $2\theta$  and full width half-maximum (FWHM) values are presented in Table 1.

The grain size, which was 34.02 nm before doping, increased to 36.92 nm with 1% Ce addition and became 35.67 nm with 2% Ce addition. That is, the addition of a Ce atom to the ZnO crystal structure increases grain size. Ce<sup>4+</sup> and Ce<sup>3+</sup> are the two distinct oxidation states of the Ce, yet the Ce<sup>4+</sup> oxidation state is far more stable in the presence of air than the Ce<sup>3+</sup> oxidation state (Subramanian *et al.* 2010). Since the ionic radii of the Zn<sup>2+</sup> (7.4 Å) and O<sup>2-</sup> (12.6 Å) ions in the ZnO content are different from Ce<sup>4+</sup> (9.2 Å)

ionic radii, it causes distortions in the lattice structure (Anandan and Miyauchi 2011).



(a)



(b)

**Figure 1.** (a) General XRD patterns of the ZnO powders and (b) detailed pattern of the (101) diffraction peak according to the amount of Ce dopant ratio.

**Table 1.** Average crystalline sizes of the samples with related peak information

Sampl e Name	2θ	FWHM (Deg.)	Crystallite size (nm)
Z0	36.36	0.2567	34.02
Z0.5	36.36	0.2472	35.33
Z1	36.32	0.2366	36.92
Z2	36.34	0.2449	35.67

The absence of a new peak indicating the formation of a phase in XRD indicates that the Ce atom is located in substitutional or in one of the interstitial positions (Sharma, Sharma, Kumar and Sharma

2016). Compared to the undoped Z0 sample, all the doped samples have a larger crystallite size. The improvement in crystallite size shows that Ce<sup>4+</sup> has been effectively absorbed into the ZnO lattice, where it replaces Zn<sup>2+</sup> ion. Given that the doping ions are positioned in the tetrahedral sites via Zn<sup>2+</sup> ion substitution, the electrical neutrality of the ZnO crystal necessitates the formation of  $Ce_{Zn}^{2+}$  (Ce ion with two positive charge at the Zn position according to the Kröger-Vink notation) structure (Anandan & Miyauchi, 2011). However, the crystallite size, which increased up to a 1% Ce addition rate, showed a decrease with 2% Ce addition. This decrease in crystallite size might be attributed to the interstitial incorporation of Ce ions ( $Ce_i^{2+}$ ) in ZnO matrix with increasing Ce concentration (Djaja and R. 2013). Thus, the nucleation process of ZnO and/or Ce atoms forms segregation at grain boundaries (Chelouche *et al.* 2017). As the Ce ratio rises, so does the number of nucleation sites, which may put a drag force on the motion of the crystallite border and hinder crystallite expansion (Chelouche *et al.* 2017).

### 3.2. XPS Analysis

The XPS analysis was performed to examine and get chemical information and the oxidation states of the components in ZnO particles. Fig. 2 (a) displays the XPS survey spectra of ZnO-based samples with various Ce dopant concentrations. It can be concluded that all samples consist of Zn, O, and C elements. Ce can be observed in all doped samples. The main peaks for Zn and O were clearly visible (see Fig. 2).

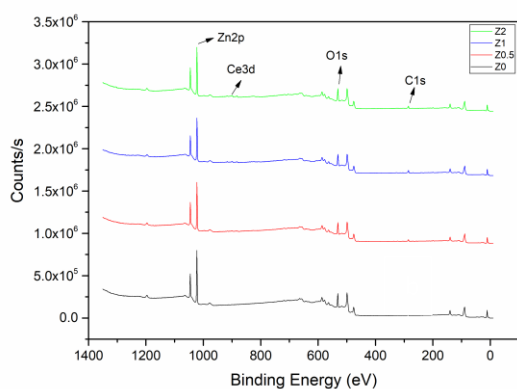
Carbon exists on all sample surfaces (Fig. 2) because it has been absorbed from the environment and cannot be eliminated from the surface (Demirci *et al.* 2020). The elemental composition results obtained from the XPS analysis are given in Table 2. It is observed that Zn and O, which have the highest element ratios, are between 36.92%-32.83% and 42.03%-39.43% values, respectively. The very high carbon ratio of about 25% may be due to the sol-gel process. During the removal of organic structures from the body by the calcination process, excess carbon may be left. Mole ratios of the Ce dopant were determined in the range of 0.91% to 1.50% in

the doped samples. As shown in Table 2, the determined Ce ratio is close to the theoretical dopant ratios. It is consistent that the Ce by mole ratio increases as the theoretical Ce ratio increases.

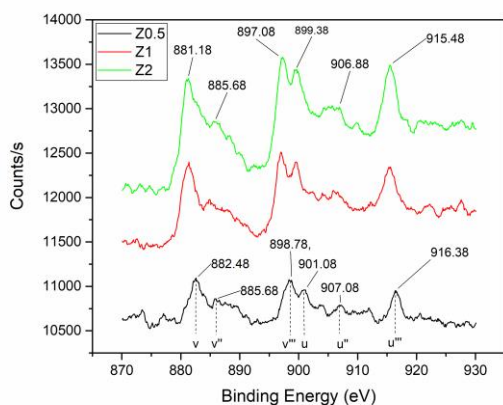
The binding maxima at 1022.38 and 1045.48 eV (Fig. 2 (a)) are possibly attributed to the Zn-O bond, which corresponds to Zn<sup>2+</sup> in the ZnO structure (Reddy *et al.* 2019). Samples exhibit a characteristic O 1s peak at 531.18 eV, which can be attributed to OH bonds and, as a result, the presence of the O<sup>2-</sup> ion on the ZnO surface (Demirci *et al.* 2020).

**Table 2.** Elemental composition results according to the XPS analysis

Samples	Chemical Contents (%mole)			
	Zn2p	O1s	Ce3d	C1s
Z0	36.92	42.03	-	21.05
Z0.5	38.04	41.53	0.91	19.52
Z1	32.83	39.43	1.32	26.42
Z2	32.88	40.52	1.50	25.10



(a)



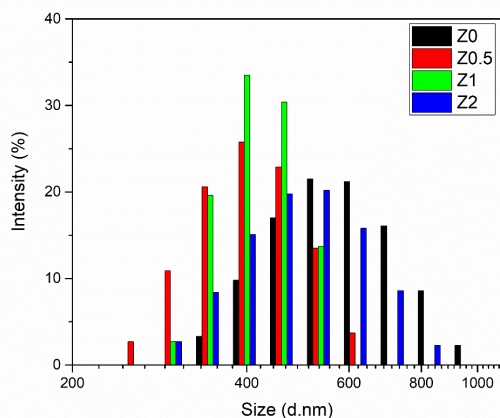
(b)

**Figure 2.** XPS survey spectra of (a) ZnO powders with various concentrations of Ce ions, and (b) focused high resolution XPS scans on Ce 3d peaks for Z0.5-Z2 samples.

High-resolution XPS scans on Ce 3d peaks for Z0.5-Z2 samples are presented in Fig. 2 (b). The Ce 3d spectrum of the ZnO:Ce samples consists of six peaks (two multiplets) specifically u ( $3d_{3/2}4f^2O_{2p4}$ ), v ( $3d_{5/2}4f^2O_{2p4}$ ), u<sup>11</sup> ( $3d_{3/2}4f^1O_{2p5}$ ), v<sup>11</sup> ( $3d_{5/2}4f^1O_{2p5}$ ), u<sup>111</sup> ( $3d_{3/2}4f^0O_{2p6}$ ), and v<sup>111</sup> ( $3d_{5/2}4f^0O_{2p6}$ ) as shown in Fig. 3 (b). These two multiplets are allocated to the spin-orbit split  $3d_{5/2}$  and  $3d_{3/2}$  core holes. The presence of tetravalent Ce<sup>4+</sup> in particles is distinguished by spin orbital multiplets (v,u) and a peak at a higher binding energy of 916 eV. All six binding energy peaks in the presence of tetravalent Ce<sup>4+</sup> ions according to the XPS examination of the Ce 3d spectrum (Anandan and Miyauchi 2011).

**3.3 Powder Size Distribution**

Powder size distribution (PSD) charts of the samples are presented in Fig. 3. Generally, the first thing about the graph draws attention is that the particle distributions of all samples exhibit a wide spectrum. Looking at the charts (see Fig. 3), it is seen that Z0 and Z2 have similar distributions, yet Z2 shows lower grain size distribution compared to Z0. It can be observed that the highest particle size belongs to the Z0 sample. The Z0.5 sample stands out as having the lowest particle size. Sample Z1 exhibits a higher (than Z0.5) and narrower (than others) particle size distribution. Considering the values calculated using the particle size analyses, Z0, Z0.5, Z1, and Z2 samples have average particle size values of **581.0 nm**, **410.8 nm**, **563.6 nm** and **508.3 nm**, respectively.



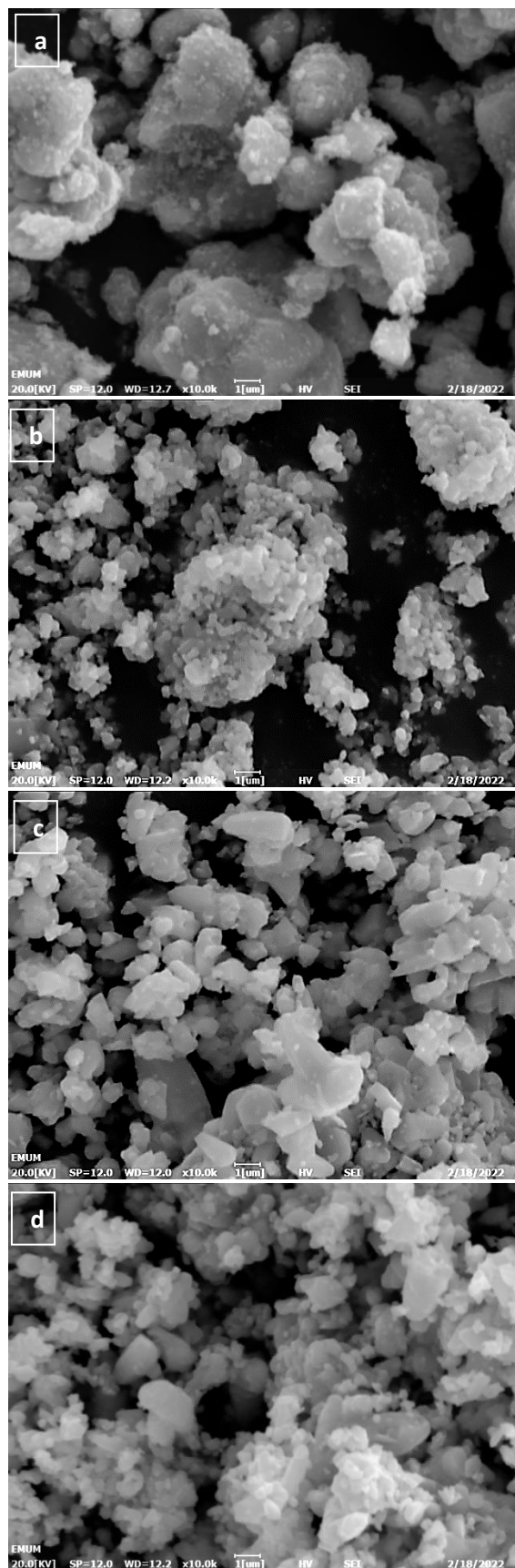
**Figure 3.** Powder size distribution charts of the samples

### 3.4 Morphological Analysis

Powder morphologies of the samples are presented in Fig. 4 with their SEM images. Powder morphology is an important parameter that can affect the properties of a material. As seen in Fig. 4, it can be said that ZnO powders produced using the sol-gel method generally have rounded corners and random particle shapes. The SEM images appear consistent with the particle size measurement results. Accordingly, it is seen that the smallest sized particles belong to the Z0.5 sample (Fig. 4 (a)) while the largest sized ZnO powders were observed in the Z0 sample (Fig. 4 (b)). When Figure 5 is examined collectively, it is observed that Ce doping causes a serious decrease in particle size but does not change its morphology. Additionally, it is proved that ZnO samples exhibit a wide particle size distribution in PSD results (Fig. 3), with large and small particles appearing together in SEM images (Fig. 4).

### 3.5 Photoluminescence Characteristics

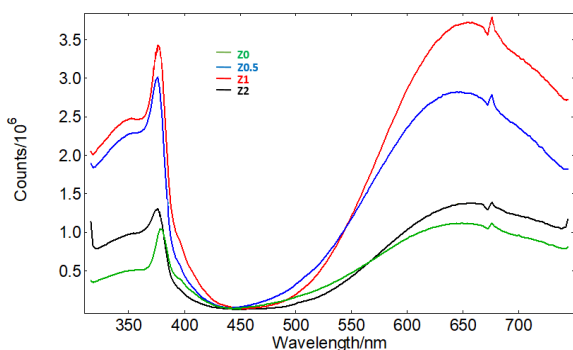
The optical characteristics of doped and undoped ZnO powders were investigated using a photoluminescence (PL) experiment at room temperature. The PL emission spectra of ZnO powders with various Ce dopant concentrations are presented in Figure 6. As can be seen from Fig. 5, while all samples are excited around 378 nm, they exhibit emission around 646 nm. This broad green emission peak is typically linked with the existence of band gap defects such as oxygen vacancies, zinc vacancies, and interstitial zinc ion vacancies (Jung *et al.* 2012, Kuo *et al.* 2006, Sinha *et al.* 2014).



**Figure 4.** Powder morphologies via SEM images of the (a)Z0, (b)Z0.5, (c)Z1 and (d)Z2 samples



When the effect of doping on PL is examined, it is seen that the emission intensity increases for all Ce dopant ratios. Emission intensity was increased proportionally with 0.5% and 1% doping, while it was decreased with 2% doping ratio (not below the undoped ZnO). The increased intensity of green emission is explained by the additional Ce impurity defects in the ZnO host (Lang *et al.* 2010).



**Figure 5.** The PL emission spectra of ZnO powders according to the Ce dopant ratios

Depending on the dopant concentration and excitation energy, these newly created defects cause an increase or decrease in the visible area emission intensity (Jayachandriah and Krishnaiah 2017). Increased dopant ions create numerous electron traps, which inhibit electron-hole pair recombination and reduce emission intensity (W. Li, Wang, Chen, Liao and Li 2017).

### 3.6 Photocatalytic Results

The maximum absorbance values of methylene blue dye at a wavelength of 664 nm in accordance with time were obtained to observe photocatalytic degradation for each sample. The progression of the degradation mechanism; first, light absorption, followed by stimulated hole and electron separation. Next, photo-generated charge carriers travel toward the catalyst's surface, followed by a redox reaction involving adsorbed reactants (Kar, Smith, and Subramanian 2009).

The time-dependent dissolution curves of MB resolved ZnO-based powders are presented in Fig. 6 (a). Previously, it was stored in the MB solution in the dark, and the deterioration obtained was insignificant. Considering the variation with respect to the initial concentration, it can be seen that the

doped samples exhibit more concentration variation according to Fig. 6(a). Photocatalytic kinetic analyses of the samples were also performed to better understand the kinetics throughout the degradation period. The kinetic mechanism graph given in Fig. 6 (b) is explained by the following formula (2) proposed by Langmuir–Hinshelwood (Kumar *et al.* 2015)

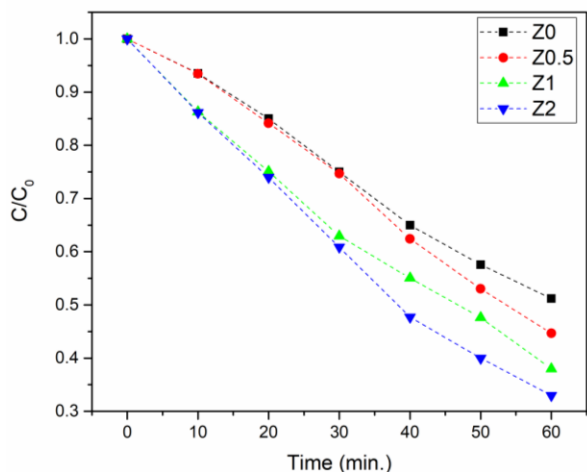
$$\ln \left( \frac{C_0}{C} \right) = kt \tag{2}$$

where t is the time, C<sub>0</sub> corresponds to the original concentration, C represents the comparative concentration and k is the degradation constant. The values of rate constants (k) were found as 0.0120, 0.0136, 0.0147, and 0.0169 min<sup>-1</sup> for the Z0, Z0.5, Z1, and Z2 samples, respectively. The order of photocatalytic efficiency and photocatalysts k values can be listed as Z2> Z1> Z0.5>Z0.

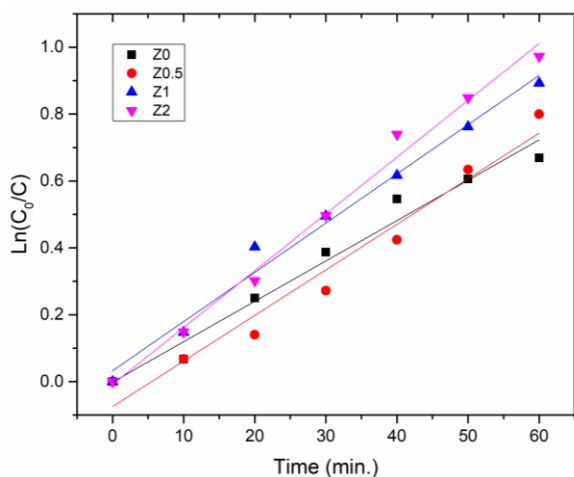
Finally, Fig. 6 (c) shows the photocatalytic degradation efficiencies of the samples. Photocatalytic degradation efficiencies were estimated by the following formula (3);

$$\eta = \left( \frac{C_0 - C}{C_0} \right) \tag{3}$$

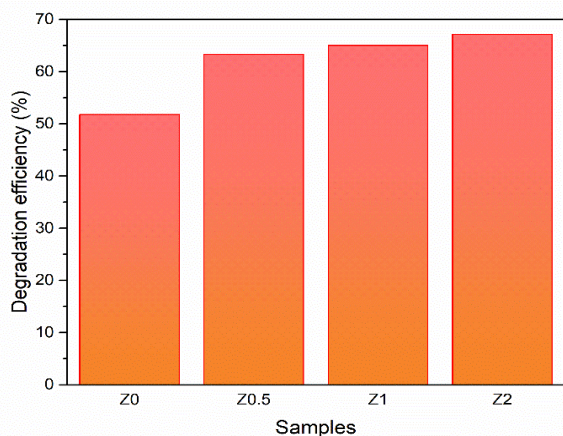
The photocatalytic efficiencies of the Z0, Z0.5, Z1, and Z2 samples after 60 min degradation period was calculated as 51.79%, 63.34%, 65.04 and 67.19, respectively. As can be seen from all of the photocatalytic results in Fig. 7, the photocatalytic properties were affected positively by the doping process. Ce doping in ZnO resulted in significantly improved photocatalytic activity and a significant rise in rate constant values compared to undoped ZnO. There is no significant morphology, phase, and crystallite size difference between the samples. As can be seen in Fig. 6, the photocatalytic efficiency increased continuously in direct proportion to the dopant ratio. Considering the particle size, which is one of the most important parameters, no correlation was observed between increasing or decreasing particle size and photocatalytic efficiency.



(a)



(b)



(c)

**Figure 6.** (a) The time-dependent dissolution curves, (b) kinetic constant curves, and (c) the degradation efficiency diagram of the ZnO-based samples

For example, the Z0.5 sample, which has the lowest particle size, does not exhibit the highest photocatalytic efficiency. Since there is not any

regular correlation with other parameters, it can be said that the most effective parameter in terms of photocatalytic efficiency is the dopant ratio.

The increased photocatalytic activity of Ce-doped ZnO photocatalysts is explained by electron and hole migration to the catalytic surface in response to UV irradiation and subsequent involvement in redox reactions with the adsorbed dye (J. Gupta, Barick and Bahadur 2011, Kumar, Kumar and Umar 2014).  $Ce^{4+}$  ions can also operate as electron scavengers, trapping conduction band electrons and minimizing or limiting the possibility of electron-hole recombination (Daneshvar, Salari and Khataee 2004). This can efficiently transmit photo-generated electrons to participate in a redox process that produces  $\cdot OH$  free radicals, triggering dye degradation (Djaja and R. 2013). Doping ZnO with  $Ce^{4+}$  is predicted to increase surface imperfections and produce trap centers, which form discrete energy levels (impurity states), which lie just below the ZnO conduction band creates the sub-band gap (Anandan and Miyauchi 2011). Because of the trapping-level development, the ZnO band gap narrows, having a significant influence on photocatalytic performance (Choudhary, Bisht, Satpati and Mohapatra 2021). Additionally, Cerium doping improves the visible light usage capability (Choudhary *et al.* 2021). However, with greater Ce concentrations, the number of free electrons reduces due to their entrapment in  $Ce^{4+}$  ions, therefore decreases photo-degradation (Kumar *et al.* 2015). Since the doping ratio did not reach the saturation point, no decrease in the photocatalytic efficiency was observed. As the saturation point cannot be reached and the most effective parameter is the dopant ratio, higher Ce dopant ratios may be the subject of future studies.

#### 4. Conclusion

Cerium doped and undoped hexagonal Wurtzite ZnO micro-particles were produced successfully according to the XRD results. Embedding  $Ce^{4+}$  ions into the ZnO lattice led to improvement in the crystallite size values of the particles. Ce doping did not cause a change in rounded and random particle morphology but caused changes in particle size

values. The highest particle size belongs to the undoped ZnO particle, while the 0.5% Ce-doped ZnO sample has the lowest particles in size. Additionally, Ce doping process provided improvement in the optical properties, including photoluminescence and photocatalysis by increasing the emission intensities and photocatalytic rate constant values. It was determined that the most effective parameter in terms of photocatalytic efficiency is the Ce dopant ratio as there is not any correlation with other parameters.

## 5. References

- Al Abdullah, K., Awad, S., Zaraket, J., & Salame, C., 2017. Synthesis of ZnO nanopowders by using sol-gel and studying their structural and electrical properties at different temperature. *Energy Procedia*, **119**, 565-570.
- Anandan, S., & Miyauchi, M., 2011. Ce-doped ZnO ( $\text{Ce}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ ) becomes an efficient visible-light-sensitive photocatalyst by co-catalyst ( $\text{Cu}^{2+}$ ) grafting. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **13(33)**, 14937-14945.
- Bomila, R., Suresh, S., & Srinivasan, S., 2019. Synthesis, characterization and comparative studies of dual doped ZnO nanoparticles for photocatalytic applications. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, **30(1)**, 582-592.
- Chelouche, A., Touam, T., Tazerout, M., Boudjouan, E., Djouadi, D., & Doghmane, A., 2017. Low cerium doping investigation on structural and photoluminescence properties of sol-gel ZnO thin films. *Journal of Luminescence*, **181**, 448-454.
- Choudhary, S., Bisht, A., Satpati, B., & Mohapatra, S. 2021. Facile synthesis of Ce-doped ZnO nanospindles for photocatalytic applications. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, **127(12)**, 1-14.
- Daneshvar, N., Salari, D., & Khataee, A. R., 2004. Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to  $\text{TiO}_2$ . *Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry*, **162(2-3)**, 317-322.
- Djaja, N. F., & R., S., 2013. Characteristics and Photocatalytic Activities of Ce-Doped ZnO Nanoparticles. *Materials Sciences and Applications*, **4(2)**, 145-152.
- Demirci, S., Dikici, T., Tuncay, M. M., & Kaya, N., 2020. A study of heating rate effect on the photocatalytic performances of ZnO powders prepared by sol-gel route: Their kinetic and thermodynamic studies. *Applied Surface Science*, **507**, 145083.
- Gupta, A., Saurav, J. R., & Bhattacharya, S., 2015. Solar light based degradation of organic pollutants using ZnO nanobrushes for water filtration. *Rsc Advances*, **5(87)**, 71472-71481.
- Gupta, J., Barick, K. C., & Bahadur, D. 2011. Defect mediated photocatalytic activity in shape-controlled ZnO nanostructures. *Journal of Alloys and Compounds*, **509(23)**, 6725-6730.
- Jayachandiraiah, C., & Krishnaiah, G., 2017. Influence of cerium dopant on magnetic and dielectric properties of ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Science*, **52(12)**, 7058-7066.
- Jung, Y. I., Noh, B. Y., Lee, Y. S., Baek, S. H., Kim, J. H., & Park, I. K., 2012. Visible emission from Ce-doped ZnO nanorods grown by hydrothermal method without a post thermal annealing process. *Nanoscale Research Letters*, **7(1)**, 1-5 .
- Kar, A., Smith, Y. R., & Subramanian, V., 2009. Improved Photocatalytic Degradation of Textile Dye Using Titanium Dioxide Nanotubes Formed Over Titanium Wires. *Environmental Science & Technology*, **43(9)**, 3260-3265.
- Karidas, S., Veena, B. K., Pujari, N., Krishna, P., & Chunduru, V., 2020. Photodegradation of Methylene Blue (MB) using Cerium-doped Zinc Oxide nanoparticles. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, **45(1)**, 1-9.
- Keskin, O. Y., Dalmis, R., Birlik, I., & Azem, N. F. A. 2020. Comparison of the effect of non-metal and rare-earth element doping on structural and optical properties of  $\text{CuO/TiO}_2$  one-dimensional photonic crystals. *Journal of Alloys and Compounds*, **817**, 153262.
- Kumar, R., Kumar, G., & Umar, A., 2014. Zinc Oxide Nanomaterials for Photocatalytic Degradation of Methyl Orange: A Review. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, **6(8)**, 631-650.
- Kumar, R., Umar, A., Kumar, G., Akhtar, M. S., Wang, Y., & Kim, S. H., 2015. Ce-doped ZnO nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of direct red-23 dye. *Ceramics International*, **41(6)**, 7773-7782.
- Kuo, S. Y., Chen, W. C., Lai, F. I., Cheng, C. P., Kuo, H. C., Wang, S. C., & Hsieh, W. F., 2006. Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films. *Journal of Crystal Growth*, **287(1)**, 78-84.



- Lang, J. H., Han, Q., Yang, J. H., Li, C. S., Li, X., Yang, L. L., Cao, J., 2010. Fabrication and optical properties of Ce-doped ZnO nanorods. *Journal of Applied Physics*, **107(7)**, 074302.
- Li, H. L., Lv, Y. B., Li, J. Z., & Yu, K., 2014. Experimental and first-principles studies of structural and optical properties of rare earth (RE = La, Er, Nd) doped ZnO. *Journal of Alloys and Compounds*, **617**, 102-107.
- Li, L., Liu, Z. Y., Zhang, Q. Q., Meng, C. H., Zhang, T. R., & Zhai, J., 2015. Underwater superoleophobic porous membrane based on hierarchical TiO<sub>2</sub> nanotubes: multifunctional integration of oil-water separation, flow-through photocatalysis and self-cleaning. *Journal of Materials Chemistry A*, **3(3)**, 1279-1286.
- Li, W., Wang, G. J., Chen, C. E. H., Liao, J. C., & Li, Z. C., 2017. Enhanced Visible Light Photocatalytic Activity of ZnO Nanowires Doped with Mn<sup>2+</sup> and Co<sup>2+</sup> Ions. *Nanomaterials*, **7(1)**, 20.
- Pathak, T. K., Coetsee-Hugo, E., Swart, H. C., Swart, C. W., & Kroon, R. E., 2020. Preparation and characterization of Ce doped ZnO nanomaterial for photocatalytic and biological applications. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, **261**, 114780.
- Reddy, I. N., Reddy, C. V., Sreedhar, M., Shim, J., Cho, M., & Kim, D., 2019. Effect of ball milling on optical properties and visible photocatalytic activity of Fe doped ZnO nanoparticles. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials*, **240**, 33-40.
- Savolainen, K., Pylkkanen, L., Norppa, H., Falck, G., Lindberg, H., Tuomi, T., Seipenbusch, M. 2010. Nanotechnologies, engineered nanomaterials and occupational health and safety - A review. *Safety Science*, **48(8)**, 957-963.
- Sharma, D. K., Sharma, K. K., Kumar, V., & Sharma, A., 2016. Effect of Ce doping on the structural, optical and magnetic properties of ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, **27(10)**, 10330-10335.
- Sin, J. C., Lam, S. M., Lee, K. T., & Mohamed, A. R. 2014. Preparation of rare earth-doped ZnO hierarchical micro/nanospheres and their enhanced photocatalytic activity under visible light irradiation. *Ceramics International*, **40(4)**, 5431-5440.
- Singh, P., & Borthakur, A. 2018. A review on biodegradation and photocatalytic degradation of organic pollutants: A bibliometric and comparative analysis. *Journal of Cleaner Production*, **196**, 1669-1680.
- Sinha, N., Ray, G., Bhandari, S., Godara, S., & Kumar, B., 2014. Synthesis and enhanced properties of cerium doped ZnO nanorods. *Ceramics International*, **40(8)**, 12337-12342.
- Subramanian, M., Thakur, P., Tanemura, M., Hihara, T., Ganesan, V., Soga, T., Jimbo, T. 2010. Intrinsic ferromagnetism and magnetic anisotropy in Gd-doped ZnO thin films synthesized by pulsed spray pyrolysis method. *Journal of Applied Physics*, **108(5)**, 053904.
- Thambidurai, M., Muthukumarasamy, N., Velauthapillai, D., & Lee, C., 2014. Rosa centifolia sensitized ZnO nanorods for photoelectrochemical solar cell applications. *Solar Energy*, **106**, 143-150.
- Xu, C. P., Anusuyadevi, P. R., Aymonier, C., Luque, R., & Marre, S., 2019. Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*, **48(14)**, 3868-3902.
- Yang, L., Gao, M. G., Dai, B., Guo, X. H., Liu, Z. Y., & Peng, B. H., 2016. Synthesis of spindle-shaped AgI/TiO<sub>2</sub> nanoparticles with enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, **386**, 337-344.
- Zamiri, R., Lemos, A. F., Reblo, A., Ahangar, H. A., & Ferreira, J. M. F., 2014. Effects of rare-earth (Er, La and Yb) doping on morphology and structure properties of ZnO nanostructures prepared by wet chemical method. *Ceramics International*, **40(1)**, 523-529.

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055703 (1149-1156)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055703 (1149-1156)

DOI: 10.35414/akufemubid.1115439

## Araştırma Makalesi / Research Article

## Perlit Katkılı Seramik Bünye Özelliklerinin Araştırılması

Fatma Sena BAŞAR<sup>1</sup>, Buket ACARTÜRK<sup>2</sup><sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Seramik ve Cam Anasanat Dalı, Sakarya.<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Seramik ve Cam Bölümü, Sakarya.Sorumlu yazar e-posta: fatma.basar@ogr.sakarya.edu.tr  
buketacarturk@sakarya.edu.trORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3582-8567>  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3264-6079>

Geliş Tarihi: 11.05.2022

Kabul Tarihi: 14.10.2022

## Öz

Perlit, doğada magma lavlarının soğuması sonucu oluşan ve bünyesinin içinde su damlacıkları bulunduran volkanik bir cam türüdür. Yüksek sıcaklıkta üretimi gerçekleştirildiğinden sağlığa zararlı olmayan, çevre dostu, kullanımı kolay olan bir hammaddedir. Bu hammaddenin sanayinin birçok alanında kullanılmasına olanak sağlayan özellikleri "Perlit Katkılı Seramik Bünye Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı çalışmayı belirleyen etmenleri oluşturmuştur. Seramik sanatında, sanatçılar kendi çamurlarını oluştururken bünyeye; esneklik kazandırmak, büyük boyutlu formların ağırlığını azaltmak, farklı doku ve estetik nitelikler kazandırmak amacıyla alternatif malzemeler eklemektedirler. Bünyeye eklenen organik ve inorganik çok çeşitli hammaddeler bulunmaktadır. Bu çalışmada, perlitin seramik bünyelerde kullanılabilirliği ve katkı oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Şamot ve akçini kilerine %0, %3, %5 ve %7 oranlarında perlit ilave edilerek bünye reçeteleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bünyeler 950°C ve 1200°C'lerde pişirilmiştir. Perlit katkılı bünyeler, perlit içermeyen bünye ile karşılaştırılmış, toplu küçülme ve su emme testleri yapılmıştır. Çalışma doğrultusunda gerçekleştirilen deneyler sonucunda; akçini çamurunda %7 perlit katkısının deformasyona sebep olduğu, şamotlu çamurda ise tüm katkı oranlarında herhangi bir deformasyon oluşmadığı gözlemlenmiştir. Her iki çamur türünde pişirim sıcaklığına bağlı olmaksızın perlit katkısının renk ve sinterleşme özelliklerine olumlu katkıları olduğu görülmüştür.

## Anahtar kelimeler

Perlit; Seramik; Şamot;  
Akçini

## Investigation Of Perlite Added Ceramic Body Properties

## Abstract

Perlite is a type of volcanic glass that is formed in nature as a result of the cooling of magma lava and contains water droplets in its structure. It is a raw material that is not harmful to health, is environmentally friendly, and is easy to use because it is produced at high temperatures. The properties of this raw material that enable it to be used in many fields of industry have formed the factors determining the study titled "Investigation of Perlite Added Ceramic Body Properties". In the art of ceramics, while the artists create their clay; they add alternative materials to provide flexibility, reduce the weight of large-sized forms, and provide different textures and aesthetic qualities. There are a wide variety of organic and inorganic raw materials added to the body. This study, it was aimed to determine the usability and additive ratios of perlite in ceramic bodies. Body recipes were prepared by adding 0%, 3%, 5%, and 7% perlite to chamotte and casting slip. The prepared bodies were fired at 950°C and 1200°C. Perlite-added bodies were compared with perlite-free bodies, and total shrinkage and water absorption tests were carried out. As a result of the experiments carried out in line with the study; It has been observed that 7% perlite additive causes deformation in casting slip, and no deformation occurs at all additive ratios in chamotte. It has been observed that perlite additive has positive effects on color and sintering properties in both clay types, regardless of firing temperature.

## Keywords

Perlite; Ceramic;  
Chamotte; Casting Slip

## 1. Giriş

Perlit, magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup, gözle veya mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği, kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan volkanik bir camdır. Perlit ismi, bazı perlit tiplerinin kırıldığında inci parlaklığında küçük küreler elde edilmesi nedeni ile inci anlamına gelen *perle* kelimesinden türetilmiştir (Akçam 2011).

Perlit, petrolojik olarak diğer asidik volkanik camlardan, %2-5 oranında su içermesi, inci parlaklığına sahip olması, soğan kabuğu dokusu (perlitik doku) göstermesi ile ayırt edilir. Perlit kelimesi hem ham perlit hem de genişmiş perlit için kullanılmaktadır. Ham perlit, kimyasal bileşimine göre 600-1280°C aralığında yüksek sıcaklıklara ani olarak maruz kalınca içindeki suyun buhar haline geçmesiyle mısır gibi patlayarak hacmi 4-40 kat artıp genişlemektedir. Oluşan bu çok gözenekli ve hafif malzemeye genişmiş perlit adı verilmektedir (Tiber 2011). Ham perlitin görseli Şekil 1’de, genişmiş perlitin görseli ise Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 1: Ham perlit (Gen-Per 1980)



Şekil 2: Genişmiş perlit (Gen-Per 1980)

Perlitin genişleme teknolojisi 20. yüzyılın ilk çeyreğinde Avrupa ülkelerinin bazılarında ve Amerika’da deneysel çerçevede başlamış ancak geliştirilmiş perlit üretimi yüzyılın ortalarını bulmuştur.

1925 yıllarında Almanya’da, perlitik obsidianın ısıtılınca genişlediği bulunmuştur. 1940’ta Arizona’daki bir perlitin genişlediği tespit edilmiştir. Perlit sanayii esas itibarıyla 1947’den sonra gelişmeye başlamıştır (Orhun 1969).

Dünyada önemli perlit rezervleri Tersiyer-Erken orta Kuvaterner yaşlı volkanik bölgelerde yoğun olarak bulunmaktadır. Dünya perlit rezervleri volkanik kuşak içindeki bölgelerde mevcuttur. ABD, Türkiye, Yunanistan ve Macaristan zengin perlit kaynaklarına sahip ülkelerdir. Dünya görünür rezervi 700 milyon tondur. Dünya toplam rezervi (görünür+ muhtemel + mümkün) 7.700 milyon ton iken; bu rezervin 5.700 milyon tonu yani %74’ü Türkiye’dedir (Kaya 2019).

Ülkemiz dünyanın en büyük perlit rezervine sahip ülkesidir. Türkiye perlit endüstrisi 1980’den sonra önemli gelişme göstermiş olmasına rağmen rezerv payını üretime yansıtamamaktadır (Esenli 2000).

Türkiye’de bulunan perlit rezervlerini gösteren harita Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3: Türkiye perlit rezervleri haritası (MTA 2020)

MTA (Maden Tetkik Arama Enstitüsü) haritasında, Doğu Anadolu Bölgesi, Batı Anadolu Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi’nde perlit rezervlerinin yer aldığı görülmektedir.

Ham perlit üretimi İzmir- Manisa arasındaki Yuntdağı yöresinde yoğunlaşmıştır. Çanakkale, Kütahya, İzmir-Menderes, Ankara-Çubuk, Çankırı-

Orta, Nevşehir, Erzincan, Erzurum, Bitlis ve Van yörelerinde de üretim yapılmaktadır (TMD 2015). Çizelge 1’de dünya perlit üretimi gösterilmektedir.

**Çizelge 1.** 2020-2021 yılı dünya perlit üretimi (bin ton) (Survey 2022)

Ülkeler	2020	2021
ABD	493	500
Arjantin	18	20
Ermenistan	50	50
Çin	1500	1500
Yunanistan	710	710
Macaristan	80	80
İran	72	70
Meksika	20	20
Yeni Zelanda	18	20
Slovakya	32	30
Türkiye	1200	1200
Diğer ülkeler	30	30

Türkiye’de perlit üretim teknolojisi geniş bir kapsama sahiptir. Dünyada perlit üretimini Çin’den sonra ikinci sırada yer alan Türkiye yapmaktadır.

Perlitin kullanımı daha çok genişlemiş perlit üzerinedir. Genleşmiş perlit tarım, inşaat, gıda, kimya ve ilaç gibi sanayi sektörlerinde kullanılabilir. Genleştirilmiş perlit üstün ısı ve ses yalıtım özellikleri sebebiyle en çok inşaat sektöründe az yoğun yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Dünyada üretilen perlitin %60’ı siva ve beton agregası olarak, %23’ü filtre malzemesi, %8’i yalıtım malzemesi imalinde, %4’ü ise tarımda kullanılmaktadır (Ceylan 2019).

Perlitin yapı malzemesi olarak %60 oranında kullanımı sonucunda, yapıya sağlamlık ve hafiflik özelliği kazandırdığı bilinmektedir. Seramik malzemelerin mimari alanlarda kullanılması seramik

sanatında önemli bir yer teşkil etmektedir. Özellikle seramik duvar karolarında kullanılan seramik hammaddelerinin yapıya ağırlık eklememesi ya da ağırlığın mümkün olduğunca hafifletilmesi bu alanda yapılan araştırmaların geliştirilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Perlit hammaddesinin hafifliğinin yanı sıra, ucuzluğu ve kolay işlenebilir oluşu gibi faktörler bu çalışmanın tasarlanmasında etken oluşturmuştur. Çalışmanın deneysel aşamalarında şamot ve akçini çamurları kullanılmıştır.

Akçini çamuru endüstriyel olarak kullanılan, toz halde hazırlanan, kırığı beyaz ve gözenekli bir yapıdadır. Bu çamurun ana hammaddelerini beyaz ve sarı renkte bağlayıcı özelliği yüksek killer oluşturmaktadır. Çömlekçi çamuru olarak da bilinen kırmızı çamur, yüksek oranda demir cevheri içeren bağlayıcı killere oluşur. Şamotlu çamur ise bağlayıcı özelliğini kaybedinceye kadar pişirilmiş seramik parçaların granül hale getirilip kil ile karıştırılması ile elde edilmektedir. Bu çamur yüksek ısıya dayanıklı refrakter özellikli, su emmesi düşük ve mukavemeti çok yüksek ürünler verir (Acartürk ve Kaya 2013).

Deneysel olarak kullanılan akçini ve şamot çamurlarına perlit hammaddesi belli yüzde oranlarında arttırılarak eklenmiş, 950°C ve 1200°C olacak şekilde pişirimleri yapılmıştır. Bünyelerin su emme ve toplu küçülme testleri yapılarak tüm sonuçlar deney görselleri ile birlikte verilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Perlit madeni doğada bulunan kayaç hali, parçalanmış (öğütülmüş şekli) ve geliştirilmiş görünümü olarak üç biçimde var olmaktadır. Çalışma kapsamında, İstanbul ilinde bulunan Genper Genleştirilmiş Perlit San. Tic. Ltd. şirketinden temin edilen filtre (mikronize) P2 kodlu perlit kullanılmıştır.

Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri Çizelge 2’de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3’te verilmiştir.

**Çizelge 2.** Genleştirilmiş perlitin fiziksel özellikleri (Gen-Per 1980)

Özellik	Değerler
Yoğunluk (Kg/m <sup>3</sup> )	65-100
Tane çapı (µm)	35- 150
Gözeneklilik (%)	85
Renk	Beyaz
Ergime noktası(°C)	1270-1295
Nem (%)	0,1

**Çizelge 3.** Genleştirilmiş perlitin kimyasal özellikleri (Gen-Per 1980)

Özellik	Değerler	
Kimyasal bileşimi	SiO <sub>2</sub>	%74,00
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%14,33
	K <sub>2</sub> O	%4,95
	MgO	%0,28
	CaO	%0,50
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%0,97
PH	4-9	

Deneyleerde, 35 mikron çapında genleştirilmiş perlit kullanılarak akçini ve şamot çamurlarına %0, %3, %5, %7 oranlarında eklenmiştir. Deney tabletlerinin hazırlanma süreçlerinde sırasıyla; model şekillendirilmiş ve sonrasında modelin alçı kalıbı alınmıştır. Akışkan özellikte olan akçini çamuru döküm yöntemi ile plastik kıvamlı şamot çamuru ise alçı kalıbın içine basılarak şekillendirilmiştir. Şekillendirilen deney tabletlerinin plastik uzunlukları kumpas ile işaretlenmiş ve yaş ağırlıkları hassas terazide tartılarak kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işlemi 48 saat boyunca 23-28°C'de yapılmış ve

ardından kuru uzunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney tabletlerinin pişirimleri 950°C ve 1200°C'lerde 7 saat süre ile pişirilmiştir. Pişirimler elektrikli fırında, nötr fırın atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Pişiriminin ardından tabletlerin hassas tartım ve pişme uzunluk ölçümleri yapılarak toplu küçülme sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de belirtilmiştir. Su emme değerlerinin ölçülmesi için deney örnekleri 12 saat su içerisinde bekletildikten sonra ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bünyelerdeki su emme oranları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Reçeteler

**Çizelge 4.** Şamot kiline eklenen perlit miktarları

Şamot	Kil(gr)	Eklenen perlit(gr)
Reçete 1	100	0
Reçete 2	100	3
Reçete 3	100	5
Reçete 4	100	7

**Çizelge 5.** Akçini kiline eklenen perlit miktarları

Şamot	Kil (gr)	Su (ml)	Eklenen perlit (gr)
Reçete 1	100	40	0
Reçete 2	100	47,2	3
Reçete 3	100	64	5
Reçete 4	100	72,9	7

Perlit katkılı akçini bünyelerinin, katkısız bünyeye oranla daha fazla su ihtiyacı olduğu saptanmıştır. Döküm yöntemi ile gerçekleştirilen akçini çamurunun akışkan kıvamlı olması için gerekli olan su miktarının, perlit oranının artması ile doğru orantılı artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Su oranındaki artış perlit hammaddesinin gözenekli yapıda olmasıyla ilişkilidir.

### 3.2. Bünyelerin Pişirim Sonuçları



Şekil 4. 950°C pişirim sonuçları

950°C'de pişirimleri yapılan perlit katkılı ve katkısız deney numuneleri Şekil 4'te verilmiştir. Pişirim sonrası şamot deney numunelerinde kırılma, çatlama, eğilme vb. deformasyonların oluşmadığı görülmüştür. Pişme renklerinin olduğu görsellerde bej renginden açık sarıya uzanan renk farklılıkları gözlenmiştir.

Şekil 4'te gösterilen akçini deney numunelerinin %0, %3 ve %5 perlit katkılı reçete bünyelerinin şekillendirme ve pişme sonrasındaki aşamalarda deformasyon yaşanmamıştır. %7 perlit katkılı akçini reçetesinde ise çamur plaka kalıp içinde iken deformasyon oluşarak şekillendirme olumsuz sonuçlanmıştır. Aynı olumsuzluk pişirim sonrasında da görülmektedir.

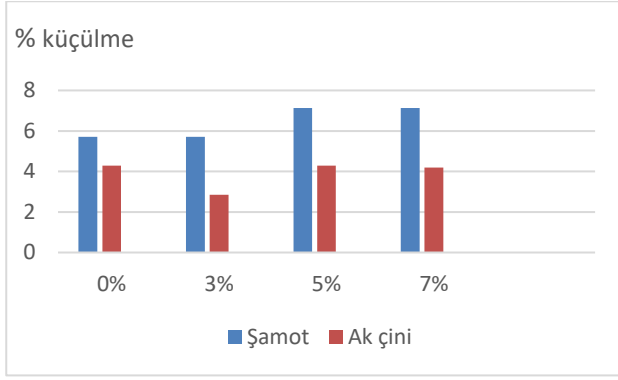


Şekil 5. 1200°C pişirim sonuçları

1200°C'de pişirimleri yapılan perlit katkılı ve katkısız deney numuneleri Şekil 5'te gösterilmektedir. Şamot deney numunelerinin pişirim sonrasında kırılma, çatlama, eğilme gibi deformasyonlarının oluşmadığı görülmüştür. Pişme renkleri açık sarı ve turuncu olarak değişiklik göstermiştir.

Şekil 5'te gösterilen perlit katkılı ve katkısız %0, %3, %5 akçini deney numunelerinin şekillendirme ve pişme sonrası görünümünde deformasyon oluşmamıştır. %7 perlit katkılı akçini reçetesinde ise çamur plaka kalıp içinde iken deformasyon oluşarak şekillendirme olumsuz sonuçlanmış, bu deformasyon pişme sonrasında da görülmektedir.

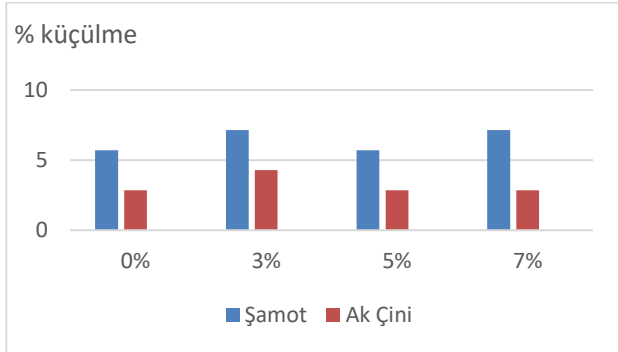




**Şekil 6.** 950°C pişirimi yapılan bünyelerin toplu küçülmeleri

Şekil 6'da gösterilen grafikte perlit katkısız bünyelerdeki toplam küçülme; şamotlu çamurda %5,71, akçini çamurunda %4,28 olarak gerçekleşmiştir. Perlit katkısız şamot bünye ile %3 perlit katkılı şamot bünyenin toplam küçülme oranı değişmeyerek %5,71 olarak aynı oranda kalmıştır. %5 ve %7 perlit katkılı şamot bünyeler ise %7,14 oranında küçülme göstermiştir.

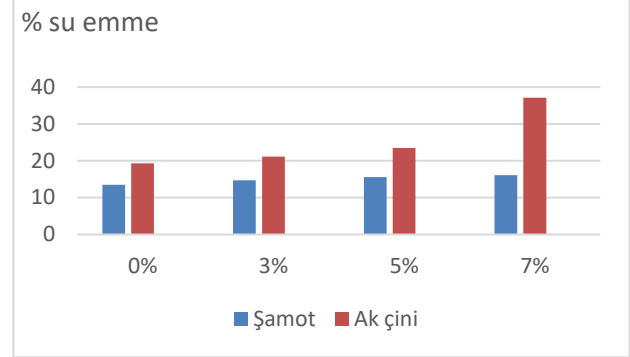
Şekil 6'da gösterilen grafiğin akçini seramik bünyelerdeki toplam küçülmesi; %3 perlit katkılı bünyede %2,85 tespit edilirken %0, %5 ve %7 oranlarındaki bünyelerde ise aynı oranlarda yani %4,28 olarak saptanmıştır.



**Şekil 7.** 1200°C pişirimi yapılan bünyelerin toplu küçülmeleri

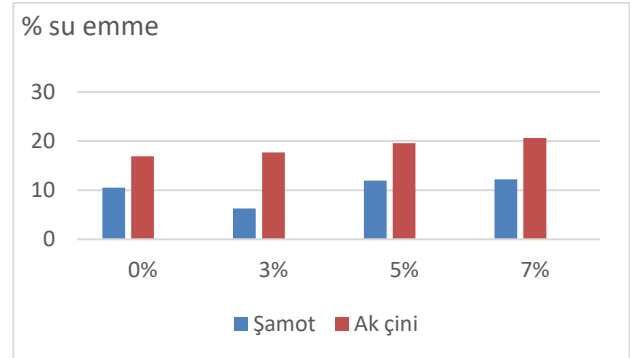
Şekil 7'de gösterilen grafikte perlit katkısız bünyelerdeki toplam küçülme sonucu; şamotlu çamurda %5,71 akçini çamurunda ise %2,85 olarak gerçekleşmiştir. Perlit katkısız şamot bünye ile %5 perlit katkılı şamot bünyenin toplam küçülmesi %5,71 olarak aynı oranda küçülme göstermiştir. %3 ve %7 perlit katkılı şamot bünyeler ise %7,14 olarak aynı oranda küçülme göstermiştir.

Şekil 7'deki grafikte verilen akçini seramik bünyelerin toplam küçülme oranı; %3 perlit katkılı bünyede %4,28 oranı ile farklılık gösterirken %0, %5 ve %7 oranlarındaki bünyelerde aynı miktarda toplu küçülme görülmüştür.



**Şekil 8.** 950°C pişirimi yapılan bünyelerin su emme test sonuçları

Şekil 8'de gösterilen ve 950°C'de pişirimleri yapılmış olan bünyelerin su emme test sonuçlarına göre; akçini ve şamot bünyelerde perlit oranının artması ile su emme oranı da artış göstermiştir. Perlit hammaddesi pişirim sonrasında bünye içinde gözenekli bir yapı oluşturmaktadır. Bünyede oluşan gözeneklerin miktarına bağlı olarak su emme oranının artışı doğru orantılıdır. Her iki çamur türünde de perlit katkısız bünyelerin su emme test sonuçları düşük oranlarda gerçekleşmiştir.



**Şekil 9.** 1200°C pişirimi yapılan bünyelerin su emme test sonuçları

Şekil 9'da verilen 1200°C'de pişirimleri yapılan bünyelerin su emme test sonuçlarına göre; akçini bünyelerde perlit oranının artması ile su emme oranı da artış göstermiştir. Şamot bünyelerde ise su emme oranları %3 perlit katkılı bünyede en az iken

%7 perlit katkılı bünyede en yüksek düzeyde gerçekleşmiştir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada perlit hammaddesinin seramik çamurları içinde kullanım imkânları araştırılmıştır. Seramik çamurunun şekillendirilebilmesi için çamurun plastik özellikte olması en temel hususlardan biridir. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde, perlit katkı oranının artması ile çamurun plastik özelliğinin azaldığı saptanmıştır. Bu durum sonucunda bir adet bünyede deformasyon gerçekleşmiştir. Bünyede oluşan deformasyonlar çamur çeşidine ve perlit katkı miktarına göre değişmektedir.

Akçini çamurlarında %5 perlit katkısından itibaren bünyenin akışkanlık özelliğini yitirmeye başladığı ve %7 oranında bu özelliğini tamamen kaybederek şekillendirme aşamalarında deformasyonların gerçekleştiği görülmüştür. Şamot çamurlarında ise perlit katkısının bünye şekillendirmelerinde olumsuz etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Her iki çamur türünde de pişirme aşamalarında ısı yükselmesine bağlı olan deformasyon gerçekleşmemiştir.

Pişirim ısısının artması ile %3 perlit katkılı akçini bünyesinin toplu küçülmesi artarken %0, %5 ve %7 oranında bulunan akçini bünyelerinin toplu küçülmeleri azalmaktadır. %0 ve %7 perlit katkılı şamot bünyelerin toplu küçülme oranları her iki pişirim derecesinde de aynıdır. Pişirim ısısının artması ile %3 perlit katkılı şamot bünyede toplu küçülme artarken %5 perlit katkılı şamot bünyenin toplu küçülmesi azalmıştır.

Pişirim ısısının artması ile akçini ve şamot bünyelerdeki su emme oranları azalmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan her iki çamur türünde pişirim ısı yükseldikçe bünyedeki su emme oranı düşüş göstermiş ve buna bağlı olarak gözeneklilik azalmıştır. Bu durum seramik bünyelerde sinterleşme olarak da bilinmektedir. Sinterleşen bünyelerin mukavemeti gözenekli bünyelere kıyasla daha yüksektir.

Çalışma kapsamında yapılan deney ve test sonuçlarına göre, seramik üretiminde kullanılacak

şekillendirme yöntemlerine bağlı olarak seramik bünyeye ilave edilecek perlit katkı miktarının önemi belirlenmiştir. Örneğin döküm yöntemiyle şekillendirmede perlit katkısının %5 ile sınırlandırılması ve %7 perlit katkılı akçini çamurlarının deformasyonlara sebep olduğu için tercih edilmemesi önerilmektedir. Serbest şekillendirme yöntemlerinde kullanılan plastik kıvamlı şamot çamurlarında ise perlitin tüm katkı oranlarında deformasyonlara sebep olmadığı ve olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

Seramik bünyelerin doku, renk ve bünye özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile yapılan bu çalışmada her iki çamur türünde pişirim sıcaklığına bağlı olmaksızın perlit katkısının renk ve sinterleşme özelliklerine olumlu katkıları olduğu görülmüştür. Çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına bağlı olarak perlitin seramik sanatına katkı sağlayabilecek bir hammadde olduğu düşünülmektedir.

#### Teşekkür

- Bu çalışmada perlit hammaddesi desteklerinden dolayı Gen-Per firmasına teşekkür ederiz.
- Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (SAÜ-BAP Proje no: 2022-7-24-115) desteklenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Acartürk, B. ve Kaya Ş., 2013. Agregat Katkılı Seramik Bünye Özelliklerinin Araştırılması. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17, 2, 65-69.
- Akçam, O, 2011. Katkılı Poliester Filamentlerinden Kumaş Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 135.
- Ceylan, B.T, 2019. Erzurum Yöresinde Çıkarılan Pomza ve Perlitin Seramik Sanayisinde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 171.
- Esenli, F, 2000. Perlit. Endüstriyel Mineraller Envanteri, İstanbul Maden İhracatçılar Birliği, 163.
- Kaya, E.S, 2019. Ham Perlit ve Genleştirilmiş Perlitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 92.
- Orhun, O, 1969. Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 8, 4, 213-222.



Tiber, B, 2011. Perlit İçeren Fonksiyonel Bir Tekstil Ürününün Tasarımı. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 246.

### ***İnternet Kaynakları***

1. [https://www.tmdr.org.tr/modules/faq/datafiles/FILE\\_8F6E75-89DEEA-C46041-9C05D6-133C62-0074D1.pdf](https://www.tmdr.org.tr/modules/faq/datafiles/FILE_8F6E75-89DEEA-C46041-9C05D6-133C62-0074D1.pdf), (20.03.2022)
2. <https://www.genper.com.tr/>, (10.04.2022)
3. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>, (28.02.2022)
4. [https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b\\_h/perlit\\_pomza.jpg](https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/perlit_pomza.jpg), (01.01.2022)

# Olivin Mineralinin Seramik Sırlarında Kullanım Olanaklarının Araştırılması ve Uygulamaları

Beyza TURAN<sup>1</sup>, Buket ACARTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Sakarya Üniversitesi, Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Seramik ve Cam Bölümü, Sakarya

Sorumlu yazar e-posta: buketacarturk@sakarya.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-3264-6079>

beyzaturan@sakarya.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4173-8429>

Geliş Tarihi: 12.04.2022

Kabul Tarihi: 14.10.2022

## Öz

1930'lu yıllardan itibaren endüstride kullanılmaya başlanan Olivin, ismini zeytin renginden alan bir mineral türüdür. Olivin, zamanla sanayide artan önem kazanmış ve günümüzde tüm dünyada Olivin endüstrisi olarak kendine önemli bir yer edinmiştir. Ticari Olivinin kimyasal bileşiği % 45-50 Magnezyum Oksit, % 40-43 Silisyum Dioksit, % 8 Demir Oksit ve % 1- 2 kızdırma kaybı içermektedir. Olivin mineralinin çevre dostu olması, Türkiye'de rezerv bakımından önemli potansiyele sahip olması ve daha önce seramik sırlarında kullanılmamış olması çalışmanın özgün kısımlarıdır. Bu çalışmada Olivin mineralinin sır yapımında kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Araştırmada deneysel yöntem kullanılarak albit, ortoklas, petalit, kalsine boraks, kolemanit ve borik asit gibi temel hammaddelerden oluşan alkalili, alkalili-borlu ve borlu sırlar hazırlanmıştır. Sır reçetelerinde Olivin %10-50-80 oranlarında ilave edilerek kullanılmıştır. Hazırlanan sır karışımları ESC 1 Kodlu akçini döküm çamuru ile şekillendirilmiş olan deney tabletlerine uygulanmış ve 1150°C'de pişirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, en fazla % 50 oranında Olivin katkısı ile hatasız sırlar edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen sırlar, parlak, mat, krakle gibi yüzey özelliklerine göre değerlendirilmiş ve metin içinde sunularak çalışma desteklenmiştir.

## Anahtar kelimeler

Olivin; Sır; Seramik Sırları; Seramik

## Investigation of Olivine Mineral's Use in Ceramic Glazes and Applications

### Abstract

Olivine, which has been used in industry since the 1930s, is a mineral type that takes its name from the Olive color. Olivine has gained increasing importance in the industry over time and has gained an important place as the Olivine industry all over the world today. The chemical compound of commercial Olivine contains 45-50% Magnesium Oxide, 40-43% Silicon Dioxide, 8% Iron Oxide and 1-2% glow loss. The fact that the olivine mineral is environmentally friendly, has a significant potential in terms of reserves in Turkey and has not been used in ceramic glazes before are important parts of the study. In this study, it is aimed to investigate the usability of olivine mineral in glaze making. In the research, alkaline, alkaline-boron and boron glazes consisting of basic raw materials such as albite, orthoclase, petalite, calcined borax, colemanite and boric acid were prepared using the experimental method. Olivine is used in glaze recipes by adding 10-50-80%. The glaze mixtures prepared were applied to the test tablets shaped with ESC 1 Code white tile casting clay and fired at 1150°C. As a result of the study, faultless glazes were made with a maximum of 50% Olivine contribution. The glazes obtained from the test results were evaluated according to surface properties such as glossy, matte, crackle, and the study was supported by presenting them in the text.

### Keywords

Olivine; Glaze; Ceramic Glazes; Ceramic

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Sır, birden çok seramik hammaddesinin belirli miktarda karıştırılması ve su ilave edilmesiyle elde

edilen, pişirme işlemi sonucunda seramik yüzeyde oluşan camsı tabakadır.

Seramik çamurunun üzerinde pürüzsüz, kaygan ve parlak yüzey oluşturur (Arcasoy ve Başkırkan 2020).

Sır uygulandığı seramik bünyenin görünümüne estetik yönden değer katarken, işlevsel açıdan da hijyenik olmasını sağlamaktadır.

Sır aynı zamanda seramik bünyenin sıvıları sızdırmasını önlemektedir. Ayrıca, sır, bünyeyi sıvı ve gazlardan koruyup yalıtırken, asitlere, bazlara, karşı dayanıklı olup, çarpma ve darbelerde bünyeye dayanım kazandırır (Mete 2020).

Olivin, mineralojik formülü  $(Mg, Fe)_2 SiO_2$  olan zeytin yeşili renginde doğal magnezyum ve demir silikattır (Aydınli 2008).

Zeytin yeşile benzeyen renginden dolayı, Latince *Oliva* (zeytin)'dan türemiştir. Olivin, yüksek sıcaklık ve silikat mineral grubuna ait, Mg ve Fe iyonlarını içeren, siyahtan yeşile kadar değişebilen renk özelliğine sahip olan oldukça parlak bir mineral çeşididir (Yalçın 2018).

Olivin camsı özelliklere sahip bir mineraldir (Kanarya 2010). İçeriğinde yüksek miktarda magnezyum oksit, silisyum dioksit ve demir oksit bulunmaktadır.

Olivin endüstride kireçtaşı, dolomit ve silis kumunun yerini almaktadır. Forsteritik olivin yüksek fırınlarda kireçtaşı, dolomit ve silis kumunun yerini alması hem ekonomik hem de sağlık ve çevreyle ilgilidir. Zira forsteritik olivinler hem yüksek oranda Mg (dolomitten daha fazla) hem de Si içerirler, dolayısıyla çelik üretiminde dolomit ve silisten daha az olivin kullanılır. Bu da açığa çıkan cürufun ağırlık ve hacim olarak daha az olmasını sağlar ve üretimde birim maliyetleri düşürür. Diğer taraftan olivin serbest silis içermemesi serbest silisin sebep olduğu silikoz hastalığı riskini de ortadan kaldırır (Zedef ve Döyen 2001).

Günümüzde işletilmekte olan en büyük Olivin (dunit) yatağı Norveç-Aheim civarında bulunur. Buradaki dunitler 6.5 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamakta olup, rezervi 2 milyar tondan fazladır. Diğer önemli Olivin/dunit yatakları sırasıyla, İtalya'da Torino yakınlarındaki Vidrocco ve Castellamonte kasabaları civarında (yaklaşık 100 milyon ton), İspanya'nın KB'sında Galicia civarında (100 milyon tondan fazla), İsveç'te (üretim yapıldığı dönemlerde 50.000 ton'luk kapasiteli-ancak günümüzde üretim yok), A.B.D'de Washington (1,7 milyon ton) ve North Carolina

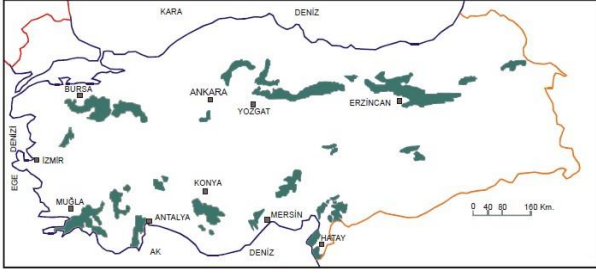
yörelerinde (125-200 milyon ton) bulunur. Ayrıca, Japonya (yaklaşık 100 milyon ton), Yeni Zelanda (1,3 milyon tondan fazla), Meksika, Güney Afrika, Rusya, Avusturya, Pakistan, İran ve Yugoslavya'da da olivin/dunit yataklarının varlığı bilinmekte, ancak rezervleri konusunda sağlıklı bilgi elde edilememektedir (Genç 2000).

**Çizelge 1.** Dünya olivin üreticisi ülkeleri ve yıllık üretim değerleri (Örgün ve Erarslan 2012).

Ülke	Üretim(ton/yıl)
Norveç	> 3,5 milyon
Japonya	~ 2 milyon
İspanya	~ 700.000
Güney Kore	~ 500.000
Çin	350.000-500.000
Tayvan	400.000
Brezilya	350.000
A.B.D.	200.000
Meksika	150.000
İtalya	100.000
Avustralya	80.000
Avusturya	20.000
Türkiye	590.000
Güney Afrika Cumhuriyeti, Japonya, Yeni Zelanda, Pakistan, İran, Avusturya	Üretimleri bilinmemektedir.

Türkiye'de oldukça geniş alanlar kaplayan ultrabazik kayalar ve bunların içerisinde de önemli dunit oluşumları mevcuttur. Özellikle Adana-Karsanti (Kızılyüksek), Guleman-Kef, Bursa-Orhaneli, Muğla-Fethiye, Köyceğiz, Beyşehir, Konya-Meram'da

ultrabazik kayalarında önemli dünit zonları mostra\* vermektedir (DPT Raporu 2001).



Şekil 1. Türkiye’de Ultrabazik-Bazik Kayaların Dağılımı (DPT Raporu 2001)

Çizelge 2. Olivin Madeninin Üretim Değerleri (Int Kyn. 1)

Maden Adı	ENDÜSTRİYEL HAMMADELER ÜRETİMİ (TON)
Olivin+Dünit	
2020	269.553,76
2019	469.545
2018	411.612
2017	177.493
2016	304.279
2015	184.623
2014	244.138
2013	126.990
2012	244.753
2011	221.079

Günümüzde, Olivin madenciliği Muğla’da gerçekleştirilmektedir. Zengin olivin yataklarına sahip ilimizde olivin madenciliği Köyceğiz’de yapılmaktadır. Günümüzde genellikle sadece zengin olivin yatakları değerlendirilmektedir. Bu rezervler boyut küçültme ve sınıflandırma ile son ürün haline getirilerek pazara sunulur. Cevher içinde bulunan serpantin mineralleri, olivin ile aralarındaki sertlik ve öğütülebilirlik farkından dolayı seçimli boyut küçültme sonucu ince boyutlu fraksiyonda

zenginleştirir. Dolayısıyla iri boyutta kalan zenginleşmiş olivin konsantresi sadece boyut küçültme ve sınıflandırma ile elde edilmiş olur (Güler vd. 2018)

Geniş rezerv yataklarına sahip olan ülkemizde Olivin minerali, sanayinin birçok alanında kullanılmaktadır.

Demir-Çelik, Refrakter, Döküm Sanayileri, Aşındırıcı (Abrasiv), Elektrikli Isıtıcı(Radyatör), Denge (Balast) malzemesi olarak kullanımı, Tarımda kullanımı, Çevre Teknolojilerinde kullanımı, Endüstriyel Atıkların Arıtılması, Nükleer Atıkların Bertarafı ve CO<sub>2</sub> Salınımının Azaltılması gibi pek çok alanda kullanıldığı bilinmektedir (Örgün ve Erarslan 2012).

Bu çalışma, birçok sanayi alanında kullanıldığı bilinen Olivinin seramik üretiminde özelinde de seramik sırlarında kullanılabilirliğini araştırmak amacı ile yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında Olivin katkılı sır reçetelerinde, albit, kolemanit, ortoklas ve petalit gibi ergiticiler %40, %20, %10 oranlarında azaltılıp, yerine Olivin %10, %50 ve %80 oranında ilave edilerek reçeteler hazırlanmış ve bisküvi pişirimi 1080°C’de yapılmış seramik tabletler üzerine uygulanmıştır. Laboratuvar tipi fırında 1150°C’de, 8 saatte sır pişirimleri gerçekleştirilmiştir. Alkalili sır reçetelerinde Albit-Ortoklas-Olivin, Borlu sır reçetelerinde Kolemanit-Borik Asit-Olivin, Alkalili-Borlu sır reçetelerinde ise Albit-Kalsine Boraks-Olivin, Ortoklas-Kalsine Boraks Olivin, Petalit-Kalsine Boraks-Olivin hammaddeleri kullanılmıştır. Deney sonuçları, görseller ve reçeteler ile birlikte Şekil 3, 4, 5, 6 ve 7’de gösterilmiştir.

Albit, ortoklas ve petalit, sırlarda ergitici olarak görev yapmaktadır. Bu hammaddeler, yüksek genleşme katsayısına sahip oldukları için artan oranlarda kullanıldığında sırlarda çatlamaya neden olurlar. Albit’in genleşme katsayısı ortoklas’a göre daha yüksektir. Petalit’in genleşme katsayısı ise albit ve ortoklas’a göre daha düşüktür.

\* **Mostra:** Yeryüzünde bir madenin açığa çıkmış ve çıplak göz ile görülen kısmı, yani maden yatağının yüzeyi ile yeryüzünün ara kesiti (Eti Maden, 2018).

Na<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O yüzey gerilimini düşürürken Li<sub>2</sub>O yüzey gerilimini arttırır (Mete 2020).

Ortoklas ve albit'e oranla Petalit sırlarda daha fazla parlaklık oluşturmaktadır. Ayrıca alkalili sırlarda petalit oranının çok artması sonucu büyük kristaller elde edilir.

Kalsine boraks, borik asit ve kolemanit, bor oksit içermektedir. Bor oksit, sırlar için kuvvetli bir ergiticidir (Genç 2013).

Sırların erime sıcaklığını kolaylıkla düşürmektedir. Kimyasal bileşiminde %10-15 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunan seramik sırlarında "bor tülü" olarak adlandırılan, bulanık-beyaz bir görünüm ortaya çıkar (Arcasoy ve Başkırkan 2020). Düşük genleşme katsayısına sahip olduğu için çatlakları engeller. Yumuşak camsı yüzeye sahip sırları oluşturur.

Çalışma kapsamında Olivinin kimyasal analizi yapılmış ve çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** Olivinin Kimyasal Analizi

No	Bileşen	Sonuç
1	MgO	%44,77
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%0,99
3	SiO <sub>2</sub>	%43,61
4	CaO	%0,55
5	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%0,49
6	MnO	%0,14
7	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%8,16
8	NiO	%0,32
9	BaO	%0,26
10	A.Z.	%0-2

Analiz sonucunda Olivin bileşiminde %44,77 oranında magnezyum oksit bulunduğu görülmektedir.

Magnezyum oksit düşük genleşme katsayısı nedeni ile sır çatlaklığını önlemede yararlı olur ve büyük bir yüzey gerilimine sahip olması ile artistik sırlardan olan toplanma sırları elde edilir (Arcasoy 1983).

Az oranlarda sırda parlaklık etkisi yüksek oranlarda (%40 üzeri) matlaşmaya sebep olur.

Olivinin bileşimindeki bir diğer yüksek miktardaki hammadde ise %43,61 oranında silisyum dioksittir.

Tüm seramik sırlarında tek ortak oksit olan SiO<sub>2</sub>, kaolen, kil, feldspat ve en fazla da kuvarstan alınarak kullanılır. Seramik sırlarında cam oluşturucu olarak tanımlanabilen SiO<sub>2</sub>, bu görevini ancak bazik oksitler ile uygun oranlarda birleştiği zaman yapar (Arcasoy ve Başkırkan 2020). Sırın erime sıcaklığını yükseltir, genleşme katsayısını düşürür. Bu yüzden sır çatlaklarının giderilmesinde kullanılmaktadır.

Olivinin bileşiminde ayrıca %8,16 oranında demir oksit bulunmaktadır.

Demir oksit, diğer renklendirici metal oksitlere göre seramik sırlarında en yaygın bir biçimde kullanılır (Genç 2013). Genel olarak sırlarda oksitleyici pişirimlerde, demir oksit ile katkı oranlarına göre, sarı, kahverengi, kızıl kahverengi, şarap kırmızısı renkler elde edilir (Arcasoy 1983). İndirgen ortamda ise gri-mavi, yeşil-kahve gibi, nötr ortamlarda ise demir oranına bağlı olarak açık ve koyu kahverengi tonları ile kızıl-şarabi renkler verir (Genç 2013).



**Şekil 2.** Olivin Minerali (Çoban 2014)

Olivin katkılı sır reçetelerinde Olivin miktarı %10, %50 ve %80 oranlarında sabit tutulmuştur. Olivinin kimyasal analiz sonucunda görülen yüksek oranlı magnezyum oksit ve kuvars miktarları baz alınarak sır reçeteleri oluşturulmuştur.

Hazırlanmış olan sır reçeteleri, ESC 1 Kodlu akçini döküm çamuru ile şekillendirilmiş ve bisküvi pişirimi 1080°C'de yapılmış olan deney tabletlerine uygulanmıştır.

Olivin katkılı sır deneyleri 1150°C'de sır pişirimleri gerçekleştirilmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Olivin Katkılı Alkalili Sır Deneyleri



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
3-A	%40 Albit %50 Ortoklas %10 Olivin	Parlak
		Yarı Mat ✓
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
Toplanma		
Kavlama		

Şekil 3-A



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
3-B	%20 Albit %30 Ortoklas %50 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat ✓
		Bor Tülü
		Krakle
Toplanma		
Kavlama		

Şekil 3-B



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
3-C	%10 Albit %10 Ortoklas %80 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
Toplanma		
Kavlama		

Şekil 3-C



Pişirimleri 1150°C'de yapılan alkalili sır örnekleri Şekil 3-A, 3-B ve 3-C'de reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 3-A'da %10 Olivin katkısı ile yarımat bir sır elde edilirken Şekil 3-B'de ergiticilerin azalması ve %50 Olivin katkısı olması sonucunda daha mat görümlü bir sır elde edilmiştir. Olivin katkısı Şekil 3-C'de %80 iken sırnın olgunlaşmadığı görülmektedir. Olivinin içeriğindeki yüksek demir oksit nedeniyle alkalili sırlarda kıvılcak-kahve renk vermiştir. Şekil 3-A daha açık renk tonuna sahipken katkı oranı arttıkça renkte koyulaşma olduğu gözlemlenmiştir. Olivin, alkali ağırlıklı sırlarda uygulandığında düşük miktarda (%50'nin altında) Olivin katkısı kullanılması önerilmektedir.

### 3.1.2. Olivin Katkılı Borlu Sır Deneyleri



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
4-A	%40 Kolemanit %50 Borik Asit %10 Olivin	Parlak ✓
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
Kavlama		

Şekil 4-A



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
4-B	%20 Kolemanit %30 Borik Asit %50 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat ✓
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
Kavlama		

Şekil 4-B



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
4-C	%10 Kolemanit %10 Borik Asit %80 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
Kavlama		

Şekil 4-C

Pişirimleri 1150°C’de yapılan borlu sır örnekleri Şekil 4-A, 4-B ve 4-C’de reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 4-A’da parlak bir sır oluşumu görülmektedir. Olivin katkısının artma oranına bağlı olarak sır dokularında parlaktan mat’a doğru değişiklik olduğu gözlemlenmektedir. Borlu sırlarda Olivin %10 yeşil rengi verirken %50 oranında yeşil-kahve, %80 katkı oranında ise kahverengi renk vermektedir. Olivinin katkısının %10 ve %50 olduğu reçetelerde sırlarda olgunlaşma gerçekleşmiş, %80 oranında ise olgunlaşma gerçekleşmemiştir.

### 3.1.3. Olivin Katkılı Alkalili-Borlu Sır Deneyleri

Alkalili-Borlu sır deney grubu 3 farklı şekilde oluşturulmuştur. İlk grupta Albit-Kalsine Boraks-Olivin, ikinci grupta Ortoklas-Kalsine Boraks-Olivin, üçüncü grupta ise Petalit-Kalsine Boraks-Olivin’den oluşan reçeteler hazırlanmış ve 1150°C’de pişirilmiştir. Sır deney görselleri ve reçeteleri Şekil 5, 6 ve 7’de görülmektedir.

#### 3.1.3.1. Albit-Kalsine Boraks-Olivin



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
5-A	%40 Albit %50 K. Boraks %10 Olivin	Parlak ✓
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle ✓
		Toplanma
		Kavlama

Şekil 5-A



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
5-B	%20 Albit %30 K. Boraks %50 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat ✓
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
		Kavlama

Şekil 5-B



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
5-C	%10 Albit %10 K. Boraks %80 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
		Kavlama

Şekil 5-C



Pişirimleri 1150°C'de yapılan Albit-Kalsine Boraks-Olivinden oluşturulan sır örnekleri Şekil 5-A, 5-B ve 5-C'de reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 5-A'da sır parlak, açık yeşil renklidir fakat sırnın kalın olduğu yerlerde ince krakle oluşumları görülmektedir. Albit yüksek genişleme katsayısına sahip olduğu için krakle oluşumlarına neden olmuştur. Şekil 5-B'de kıvılcak ve mat bir sır oluşmuştur. Olivin miktarı arttıkça rengin yeşilden kahverengiye döndüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5-C'de ise diğer reçetelerde olduğu gibi yüksek Olivin miktarından dolayı sır olgunlaşmamıştır.

### 3.1.3.2. Ortoklas-Kalsine Boraks-Olivin



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
6-A	%40 Ortoklas %50 K. Boraks %10 Olivin	Parlak ✓
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
Kavlama		

Şekil 6-A



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
6-B	%20 Ortoklas %30 K. Boraks %50 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma ✓
Kavlama		

Şekil 6-B



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünümü
6-C	%10 Ortoklas %10 K. Boraks %80 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
Kavlama		

Şekil 6-C

Pişirimleri 1150°C'de yapılan Ortoklas-Kalsine Boraks-Olivinden oluşturulan sır örnekleri Şekil 6-A, 6-B ve 6-C'de reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 6-A'da parlak sır olduğu görülmektedir fakat sırn kalın geldiği yerlerde iğne deliği hatası olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 6-B'de rengin kahverengiye döndüğü, sırn olgunlaşmadığı ve toplanmalar olduğu görülmektedir. Şekil 6-C'de %80 Olivin katkısıyla sırn olgunlaşmadığı görülmektedir.

### 3.1.3.3. Petalit-Kalsine Boraks –Olivin



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
7-A	%40 Petalit %50 K. Boraks %10 Olivin	Parlak ✓
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
		Kavlama

Şekil 7-A



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
7-B	%20 Petalit %30 K. Boraks %50 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat ✓
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
		Kavlama

Şekil 7-B



Sır No	Sır Reçete	Yüzey Görünüm
7-C	%10 Petalit %10 K. Boraks %80 Olivin	Parlak
		Yarı Mat
		Mat
		Bor Tülü
		Krakle
		Toplanma
		Kavlama ✓

Şekil 7-C

Pişirimleri 1150°C'de yapılan Petalit-Kalsine Boraks-Olivinden oluşturulan sır örnekleri Şekil 7-A, 7-B ve 7-C'de reçeteleri ile birlikte verilmiştir. Şekil 7-A'da yeşil-kahve tonlarında parlak bir sır görülmektedir. Sırın kalın olduğu bölgelerde sır yüzeyinde kristallenme olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7-B'de sırın kızıl-kahveye döndüğü mat bir sır görülmektedir. Şekil 7-C'de sırın olgunlaşmadığı ve sır yüzeyinde kavlama olduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuç

"Olivin Mineralinin Seramik Sırlarında Kullanım Olanaklarının Araştırılması ve Uygulamaları" başlıklı bu çalışma, birçok farklı sanayi alanında kullanılan Olivin seramik sırlarında ilk kez deneyimlenmesi yönünden özgün bir yönü vardır bu sebeple de seramik sırları yapımında Olivin kullanımının araştırma ve geliştirmeye açık bir alan olduğu anlaşılmıştır. Sırlarda ergitici işlevleri olan hammaddeler ve Olivinin artan oranlarda ilave edilmesi ile hazırlanan sır reçetelerinde, yeşilden kızıl-kahveye değişen renk ve dokulara sahip sırlar elde edilmiştir. Sırların fiziksel görünüşleri incelendiğinde, artistik etkili sırların olduğu belirlenmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre Olivinin %50'nin altında kullanılan reçetelerde sırın olgunlaştığı ve parlak bir yüzeye sahip olduğu, %50 oranında kullanıldığında Olivinin yüksek miktarda magnezyum oksit içeriğine bağlı olarak mat sırlar elde edildiği, %50 oranından fazla kullanıldığında ise sırların olgunlaşmadığı görüldüğünden, bu orandan fazla kullanılması önerilmemektedir.

Alkalili-borlu sırlarda sır oldukça akışkan olduğundan dolayı fırın raflarına yapışmaması için dikkat edilmesi tavsiye edilmektedir.

Makale kapsamında uygulanan Olivin katkılı sırların yüzey özellikleri incelendiğinde doku ve renk çeşitliliği sağladığı bu yönleriyle de sanatsal seramik üretimlerinde özgünlük ve estetik düzeyi geliştiren sonuçlar verdiği görülmüştür. Olivin minerali, ülkemizdeki rezerv zenginliği, ekonomik olması ve çevre dostu olması gibi diğer birçok olumlu özelliğinden dolayı seramik alanında kullanım

alanlarının artması ve geliştirilmesi gereken bir hammaddedir. Sonuç olarak Olivinin seramik sırlarına ve butik atölye üretimlerine alternatif bir hammadde oluşturacağı ayrıca konu ile ilgilenen araştırmacılara kaynaklık edebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne(SAÜ-BAP Proje no: 2022-7-24-60) desteklenmiştir.

Bu çalışmada Olivin minerali desteklerinden dolayı Erkrom Madencilğe teşekkür ederiz.

#### 5. Kaynaklar

Arcasoy A., 1983. Seramik Teknolojisi, İstanbul: Güzel Sanatlar Fakültesi Seramik Anasanat Dalı Yayınları, 169-191.

Arcasoy, A. ve Başkırkan, H., 2020. Seramik Teknolojisi, İstanbul: Literatür Yayıncılık,260-275.

Aydınlı, N., 2008. Plazma Sprey Kaplamada Olivinin Değerlendirilmesi ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 93.

Çevik, E., 2006. Topuk Köyü ve Civarındaki (Orhaneli, Bursa) Dünitleri Mineralojik ve Jeokimyasal Özellikleri ve Olivin Açısından Endüstriyel Kullanımının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 113.

Çoban, Ö., 2014. Krom Ve Olivin Atıklarının Betonda Kullanımının Durabilite Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 147.

DPT Raporu, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2001., *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı*, Ankara, 68-87.

Genç, C., 2000. *Olivin Raporu*. İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, 1-7.

Genç, S., 2013. Artistik Seramik Sırları Sır Sanatı, İstanbul: Boyut Matbaacılık,21-79.

Güler, T., Güney, A., ve Polat, E., 2018. Muğla'da Madencilik: Potansiyeli ve Değerlendirmesi, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, 233.

Kanarya, A., 2010. Olivin Kalıp Kumlarının Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 140.

Mete, Z. , 2020. Seramik Kimyası, İzmir: Tibyan Yayıncılık, 215-221.

Örgün, Y. ve Erarslan, C., 2012. 21. Yüzyılda Olivin ve Türkiye'nin Olivin Potansiyeli. *Madencilik ve Yer Bilimleri Dergisi*, **23**, 62-75.

Yalçın, Ö. Ü., 2018. Mineral (Dolomit Ve Olivin) Katkılı Bazı Lignoselülozik Kaynaklardan Üretilen Levhaların Performans Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta, 184.

Zedef, V. ve Döyen, A., 2001. Olivin: Türkiye'de Tanınmayan Çok Amaçlı Kullanımı Olan Bir Hammadde Ve Ülkemiz Olivin Potansiyeline Bir Örnek-Kızıldağ (Akseki-Antalya) Olivin Yatağı. *4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. Selçuk Üniversitesi MühendislikFakültesi, Konya, 299-303.

#### ***İnternet Kaynakları***

1-<https://www.mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>  
(10.03.2022)

2- <https://www.etimaden.gov.tr/maden-terimleri-sozlugu> (29.08.2022)

## Türkiye Piyasasında Satılan Bazı Talk Pudralarının Mineralojik ve Yarı Nicel Kimyasal Bileşimi

Muazzez ÇELİK KARAKAYA<sup>1</sup>, Necati KARAKAYA<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü 42250 Selçuklu Konya

Sorumlu yazar e-posta: mckarakaya@ktun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1104-2110>

nkarakaya@ktun.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9447-157X>

Geliş Tarihi: 23.05.2022

Kabul Tarihi: 29.09.2022

### Öz

Türkiye'de satılan talk pudralarından 40 adeti, insan sağlığı için tehlikeli krizotil ve tremolit gibi mineralleri içerip içermediğini araştırmak amacıyla incelenmiştir. Pudralarının mineralojik ve yarı nicel kimyasal analizleri yapılmıştır. Pudralar talk yanında çoğunlukla kalsit, kaolinit, manyezit, simektit/klorit, dolomit, kuvars ve nadiren krizotil (?) ve tremolit belirlenmiştir. Kalsit içeriğinin bazı numunelerde talka yakın olduğu belirlenmiştir. Talk, tremolit ve krizotil kristalleri kısmen yassı kısmen de sivri, kıymık şeklindedir. Ayrıca iğnemsî, bükülmüş, ipliksi morfolojide kristaller de belirlenmiştir. Liflerde yığın görünümlü bazen çubuksu, borumsu, levhamsı şekillerde de gözlenmiştir. Çubuksu kristallerin boyu krizotil için literatürde verilenlerden büyüktür ( $\geq 5\mu\text{m}$ ). Yapılan yarı nicel kimyasal bileşim analizinde silikat minerallerinin yapısında bulunan özellikle Si ve Mg yanında birçok kristalde Fe, Ca ve Al içeriği de tespit edilmiştir. Çubuksu/ipliksi morfolojideki krizotilin yapısal formülündeki Mg:Si=3:2 oranıyla aynı oran belirlenmiştir. Genelde Si içeriği Mg'dan çok daha yüksek iken, birkaç analizde bu elementlerin içeriği eşite yakın bulunmuştur. Bazı kristallerde Fe veya Al içeriği de belirlenmiş olup Fe içeriği dikkate alınmalıdır. Zira Fe, asbest minerallerinde biyolojik sistemde dokularda kanser oluşturma riskine neden olabilir. Ayrıca mikron boyutlardaki kuvars silikozis oluşturma riski taşıyabilir.

### Anahtar kelimeler

Talk Pudrası; Krizotil;  
Tremolit; Kanser;  
Asbest

## Mineralogical and Semi-Quantitative Chemical Composition of Some Talc Powders Sold on the Turkish Market

### Abstract

40 of the talcum powders sold in Turkey were investigated to determine whether they contain dangerous minerals such as chrysotile and tremolite for human health. Mineralogical and semi-quantitative chemical analyzes of the powders were made. Besides talc, mostly calcite, kaolinite, magnesite, smectite/chlorite, dolomite, quartz and rarely chrysotile (?) and tremolite were determined in the powders. It was determined that the calcite content was close to talc in some samples. Talc, tremolite and chrysotile crystals are partly flat and partly pointed and splintered. In addition, acicular, twisted, filamentous morphology crystals were also determined. Stack appearance is also observed in the fibers, sometimes in rod, tubular, and plate-like shapes. The size of the rod-like crystals is larger than those given in the literature for chrysotile ( $\geq 5\mu\text{m}$ ). In the semi-quantitative chemical composition analysis, in addition to Si and Mg in the structure of silicate minerals, Fe, Ca and Al contents in many crystals were also determined. The same ratio was determined as the Mg:Si=3:2 ratio in the structural formula of chrysotile in rod-like/filamentous morphology. In general, the Si content is much higher than that of Mg, while in a few analyzes the content of these elements has been found to be close to equal. Fe or Al content has also been determined in some crystals and the Fe content should be taken into account. Because Fe, asbestos minerals may cause the risk of cancer formation in the tissues in the biological system. In addition, micron-sized quartz may carry the risk of silicosis.

### Keywords

Cancer; Chrysotile;  
Talcum Powder;  
Tremolite; Asbest

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Talk minerali, yerkabuğunun %95'ini oluşturan fillo silikat gurubu minerallerin bir üyesi olup,  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  genel formülüne sahiptir. Kimyasal

bileşiminde doğada genelde fazla değişiklik olmamakla birlikte, kristal yapısına Si yerine az miktarda Al veya Ti, Mg yerine ise  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  elementleri girebilmektedir. Doğada talk minerali,

genellikle ultrabazik kayaların veya silisli dolomitlerin bazı jeolojik süreçler sonucu değişimiyle oluşabilir. Ultrabazik kayalarda talk serpantin mineralleri ile silisli dolomitlerde ise tremolit, antofillit, manyezit ve kuvars gibi mineraller birlikte bulunabilir. Doğada asbestleşmiş serpantin mineralleri, amfibol grubunun mineralleri ve talk oluşumları ile doğada birlikte bulunabilmektedir. Talk işletmesi yapılırken söz konusu asbest formundaki bu mineraller az miktarda da olsa talka karışabilmektedir. Bütün lifsi mineraller asbest değildir, asbest terimi, Mg-Fe'ce zengin silikat minerallerinin, lifsi formlara dönüşmüş şeklini tanımlamak için önerilmiştir (Langer vd. 1991). Tarihsel olarak "lif" terimi, uzun (uzunluk/genişlik oranları  $\geq 3.0$ ) parçacıkları tanımlamak için kullanılmıştır (Millette 2006). İnsanın akciğer dokusunda solunacak kadar küçük liflerin nadiren  $>1 \mu\text{m}$  çapında olduğu belirtilmiştir (Aust vd. 2011). Lifleşmiş bu minerallerin morfolojilerinde, uzunluk/genişlik oranı (en az 3:1), liflerin çapı, boyu önemli tanımlama kriterleridir (Langer vd. 1991, Muhle ve Pott 2000). Asbest formu/şekli lifli morfolojinin bir alt kümesidir; bu formda nispeten lif kalınlığı küçük ve lif uzunluğu büyüktür, lifler esnek, kolay ayrılabilir ve doğal numunelerde lifler demetler halinde, paralel dizilmiştir (Addison ve McConnell 2008). Dolayısıyla tüm lifli mineraller asbest değildir. Üretim safhasında asbest minerallerinin birbirinden ayırılması, talkın saflaştırılması mümkün olamamaktadır. Asbestle kirlenmiş talk pudra tozu uzun süreli, yoğun olarak solunduğunda asbest lifleri akciğerlerde kanser ve mezotelyoma gibi hastalıklara sebep olabilmektedir. Serpantin minerallerinden krizotil ve amfibol minerallerinden tremolit, krokidolit, ribekit gibi mineraller Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC 1996) tarafından 1. Sınıf kanserojen mineraller olarak değerlendirilmiştir. Amfibol ve serpantin grubu asbest mineralleri üzerinde yapılan çalışmalarda, asbest liflerinin bütün türlerinin akciğer kanseri yaptığı, ancak amfibol grubu asbest minerallerinin (krokidolit ve amosit) olivin grubunun serpantinleşmiş minerallerine (krizotil, antigorit, lizardit) göre daha riskli olduklarını belirtilmiştir (Bernstein vd. 2010, 2014; Kakoei vd. 2010; Yawas

vd. 2016; İkpambese vd. 2016). IARC (2009) asbestin birinci grup bir yumurtalık kanseri geni olduğunu açıklamıştır. Penninkilampi ve Guy (2018) ise, genel olarak perineal talk kullanımı ile yumurtalık kanseri arasında tutarlı bir ilişki varlığını, ancak Slomovitz vd. (2021) asbest ve yumurtalık kanseri arasında gözlemlenen istatistiksel bir ilişkinin zayıf ve tutarsız olduğunu belirtmiştir.

Talk minerali endüstriyel alanda birçok sektörde kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; kozmetik, seramik, ilaç, kağıt, sıva, elektrik malzemesi, boya, kauçuk vb. dur. Talk minerali insan sağlığı ve çevre açısından zararlı mineral sınıfına girmemekle birlikte, oluşumda birlikte bulunabileceği kanser oluşturma riski taşıyan minerallerle birlikte oluşması/bulunması (krizotil, tremolit, krokidolit, vb.) nedeniyle, talkın kullanımında yönetmelikler ve sağlık açısından kısıtlamalar doğabilmektedir. Bu proje kapsamında "talk pudrası" olarak satılan, bu ticari ürünler satış reyollarından/firmalardan derlenmiş (markaları gizli kalmak kaydıyla), mineralojik ve ana element içerikleri araştırılarak, asbestleşmiş mineral bulundurma riskleri incelenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Piyasadan temin edilen talk pudraları (40 adet)

## 2. Materyal ve Metot

X-ışınları Difraksiyon (XRD) yöntemi piyasadan temin edilen numunelerin tüm kaya mineralojik bileşimlerinin belirlenmesinde, Rigaku (D/MAX 2200 PC) kullanılarak Hacettepe Üniversitesi YUVAM biriminde gerçekleştirilmiştir. X-ışınları çekiminden itibaren difraktogramlar üzerinde minerallerin



tanımlamasında JCPDS (1994) dosyaları kullanılmıştır (Çizelge 1). Tarama hızı  $1^{\circ}/2\theta$  dakika, çekim aralığı  $2\theta=2-70^{\circ}$ , difraktometre grafit monokromatörlü ve Cu ( $\text{CuK}\alpha=1.5186 \text{ \AA}$ ) tüplü, Ni filtreli, gerilim 40 kv, akım ise 18 mA dir. Goniometre hızı  $2^{\circ}/\text{dak}$ , duyarlık  $4.10^2$ , kağıt hızı  $2\text{cm}/\text{dak}$ 'dır.

Taramalı elektron mikroskopta (SEM) yapılan inceleme ve analizlerde talk pudrasını oluşturan bileşenlerin morfolojisi ve dokusal özellikleri incelenmiştir. İncelemelerde seçilen nokta veya alanın yarı nicel enerji saçınım analizi (EDS) yapılmıştır. Bileşenlerin boyut, şekil ve birbirleri ile ilişkileri-dönüşümleri taramalı elektron mikroskopta

incelenmiştir. Numuneler inceleme öncesi altınla kaplanmıştır. SEM-EDS analizleri Selçuk Üniversitesi İLTEK Laboratuvarında Zeitz Evols10 model taramalı elektron mikroskopta yapılmıştır.

### 3. Bulgular

Piyasadan alınan 40 talk pudrası numunelerinin XRD ile incelemesi sonucunda, talk mineralinin ana mineral olduğu, kuvars, manyezit, dolomit, kalsit, klorit, kaolinit, krizotil ve feldispat minerallerinin de birçok pudrada bir veya birkaçının bulunduğu belirlenmiştir (Karakaya ve Karakaya 2020). Talkın belirlenen bileşimiyle ürünün üzerinde yazılan bileşimi arasında önemli farklar tespit edilmiştir (Çizelge 1, Şekil 2).

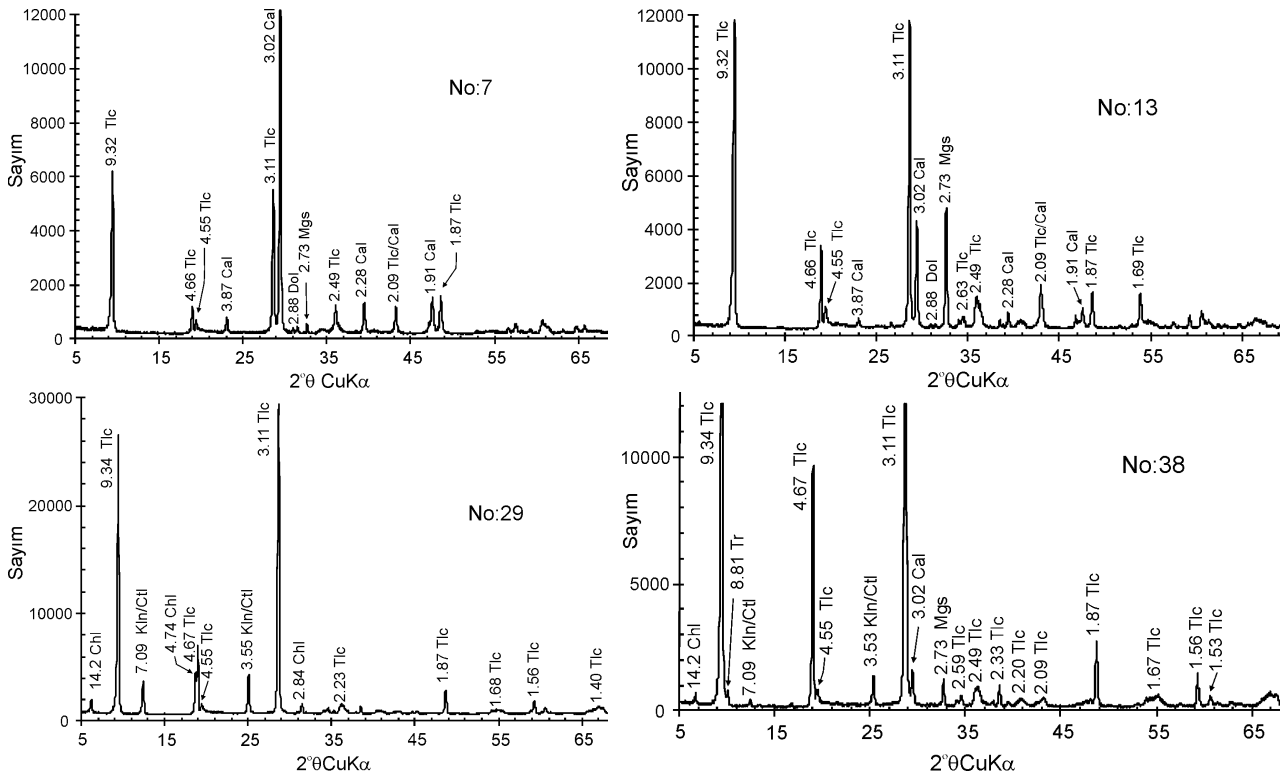
**Çizelge 1.** İncelenen talk pudralarının mineralojik bileşimi ve belirtilen içerikleri.

No	XRD Mineralojik içerik	Etiket içeriği
1	Tlc+Qz+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
2	Tlc+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Verilmemiş
3	Tlc+Qz+Dol+Mgs+Ctl	Verilmemiş
4	Tlc+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+ZnO+Parfüm
5	Tlc+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+ZnO+Mg-sterat+Kimyasallar+Parfüm
6	Tlc+Qz+Chl+Kln/Ctl	Verilmemiş
7	Tlc+Cal+Dol+Mgs	Tlc+Parfüm
8	Tlc+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
9	Tlc+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Tlc
10	Tlc+Qz+Dol+Chl+Kln+Fsp	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
11	Tlc+Cal+Qz	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
12	Tlc+Dol+Chl+Kln	Tlc+Parfüm
13	Tlc+CalQz+Mgs	Tlc+Parfüm
14	Tlc+Qz+Dol+Chl+Kln	Verilmemiş
15	Tlc+Mgs+Cal+Dol+Qz+Chl+Kln/Ctl	Tlc+ZnO+Mg-Sterat+Parfüm
16	Tlc+Qz+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar
17	Tlc+Qz+Dol+Cal+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar
18	Tlc+Dol+Mgs+Chl+Kln	Verilmemiş
19	Tlc+Mgs+Dol+Chl+Kln/Ctl	Verilmemiş
20	Tlc+Dol+Mgs+Qz+Chl+Kln/Ctl	Tlc
21	Tlc+Dol+Mgs+Qz+Fsp	Verilmemiş
22	Tlc+Qz+Mgs+Dol+Cal+Kln/Ctl	Verilmemiş
23	Tlc+Cal+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Parfüm
24	Tlc+Qz+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
25	Tlc+Cal	Verilmemiş
26	Tlc+Cal+Dol+Mgs+Kln/Ctl	Tlc+ZnO+Magnezyum+Sterat+Kln+Parfüm
27	Tlc+Cal+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Çinko Oksit+Kimyasallar
28	Tlc+Dol+Mgs+Qz+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
29	Tlc+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
30	Tlc+Dol+Cal+Kln/Ctl	Tlc+Hidrate+Silika+Kimyasallar+Parfüm

Çizelge 1. Devamı

31	Tlc+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm
32	Tlc+Dol+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Parfüm
33	Tlc+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Tlc+ZnO+Çeşitli Kimyasal
34	Tlc+Cal	Tlc+ZnO
35	Tlc+Cal	Tlc+ZnO
36	Tlc+Dol+Qz+Chl+Kln/Ctl	Verilmemiş
37	Tlc+Qz+Cal+Dol+Mgs+Chl+Kln/Ctl	Verilmemiş
38	Tlc+Cal+Mgs+Chl+Kln/Ctl+Tr	Tlc+CaCO <sub>3</sub> +Undeselat+TiO <sub>2</sub> +Kimyasallar
39	Tlc+Qz+Mgs+Dol+Cal+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Parfüm
40	Tlc+Dol+Mgs+Cal+Chl+Kln/Ctl	Tlc+Kimyasallar+Parfüm

Not: Mineral isimleri kısaltması: Dol: Dolomit, Fsp: Feldispat, Cal: Kalsit, Kln: Kaolinit, Chl: Klorit, Ctl: Krizotil, Qz: Kuvars, Mgs: Manyezit, Tlc: Talk, Tr: Tremolit (Whitney ve Evans 2010).



Şekil 2. İncelenen bazı talk pudralarının tüm kaya X-ışınları difraktogramları (kısaltılmış mineral isimlerinin açıklaması Çizelge 1’de verilmiştir).

İncelenen pudraların 11’inin içeriği üzerinde yazılı olarak bulunamamıştır, diğerlerinde ise talk dışında çeşitli kimyasallar (asit, alkol, vb.), parfüm, silika, ZnO, steat, vb. ifadeler yazılmıştır. Çok çeşitli kimyasal maddeler olarak Çizelge 1’de verilen içerikte asit, alkol ve çeşitli bileşikler vardır. Ancak bu kimyasalların bazılarının ciltte alerjik (kuruluk, kaşıntı) problemler oluşturabilir. İncelenen talkların 11’inde kuvars tespit edilmiştir. Benzer şekilde 40 talk pudrasının 33’ü dolomit, 27’si manyezit ve 14’ü de kalsit içermektedir. Ancak verilen içerikte bu

minerallerin hiçbiri yazılmamıştır. Tek bir numunede muhtemelen kalsit yerine formülü olan CaCO<sub>3</sub> yazılmıştır (No: 38). Yapılan nicel hesaplamalarda kalsit içeriği %10-50 arasında belirlenmiştir (No: 7, 11, 13, 25, 26, 34, 35, 38). Mikron boyutunda öğütülerek talk pudrasına katılan kuvars solunma ile sağlık sorunu oluşturabilir. XRD çekimlerinde birçok talk numunesinde bazı pikler kaolinite benzemekle birlikte, krizotil mineraline daha uyumlu bulunmuştur. Ancak yine de Çizelge 1’de Kln/Ctl şeklinde yazılmıştır. Bir numunede (No: 38) tremolit



belirlenmiştir. Bununla birlikte XRD analizi ile genellikle %5'in altındaki mineral içeriğinin belirlenmesi zor olduğundan diğer pudralar için de dikkatli olunması gerekir. XRD çekimleri dikkate alınarak, 11 adet numunenin SEM'de incelemesi ve EDS ile bileşimi belirlenmiştir (Şekil 3, Çizelge 2). SEM'de lifsi kristallerin boyu 2-5 µm ve kalınlığı/çapı 0.1-0.2 µm arasındadır. Lifler genelde çok ince olduğundan nokta seçilerek EDS ile kimyasal bileşimi incelenmiştir (Çizelge 1).

#### 4. Tartışma

Serpantin grubunun en yaygın olarak bulunan mineralleri olan antigorit, lizardit ve krizotilin en kuvvetli ve kolayca tanımlanabilecek bazal yansımaları ~7.30 Å'dadır ve kaolinitin 7.14 Å'daki bazal yansımından kolayca ayırt edilebilir. Ayrıca serpantin ~3.65 Å'da oluşan 002 yansıması kaolinitin 3.57 Å'daki 002 yansımasına göre oldukça fazla yer değiştirmiş bir konumdadır (Karakaya 2006). Bu minerallerin tanımlanmasında diğer önemli farklılıklar, serpantin minerallerinin trioktahedral yapıda olmasıyla ilişkilidir, serpantinlerin 020 ve 060 yansımaları sırayla ~4.60 Å ve 1.55 Å'da iken, dioktahedral yapısı olan kaolinitin 4.47 Å ve 1.49 Å'dadır (Moore ve Reynolds 1997). XRD çekimlerinde, lizardit, antigorit ve krizotilin pikleri önemli derecede benzerlik gösterir ve sadece XRD ile serpantin polimorflarının tanımlaması problemlidir. Lifsi olan krizotilin ortokrizotil (ortorombik), klinokrizotil (en yaygın monoklinik form) ve parakrizotil (lifler x-ekseni yerine y-ekseni boyunca yönelmiştir) polimorfları vardır. Bu türlerin/polimorfların saf halde olsalar bile sadece XRD ile tanımlanması kolay değildir, diğer minerallerle karışım halinde bulduklarında ise ayırt edilmeleri, tanımlanmaları çok zordur. Krizotil, silindirik lifler şeklindedir ve genellikle habitusu asbest formundadır. Krizotilin silindirik yapısı oktahedral levha  $[Mg(OH)_2]$  ile tetrahedral levha  $[SiO_4]$  arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanır (Aust vd. 2011). Antigorit ve lizarditin normalde habitusu yassı/plakamsıdır, ancak antigoritlerin kıymık şekilli formları da yaygındır. Lifli form, lif

demetlerinin mevcut ve bunların, kenarlarının pürüzsüz olması ve esneklik gösteren en-boy > 1:20 oranları ile <1 µm kalınlığında lifçikler şekilde kolayca ayrılmasıyla belirgin şekilde asbest formundadır. Bununla birlikte, lifler çıta şeklinde ve serttir ve bu nedenle, genellikle krizotilin saç benzeri ve oldukça esnek liflerinden önemli ölçüde farklıdır (Şekil 3).

Talk pudrası içeriğindeki, minerallerin ve özellikle de lifsi-çubuksu morfoloji (muhtemel krizotil) gösteren kristallerden SEM'de görüntü alınmıştır. Amfiboller morfolojik olarak genellikle sadece enine kırılan katı çubuk benzeri lifler şeklinde olmasına karşın, krizotil genişleme eğiliminde olan birçok ince fibrilden oluşan bir ip gibi görünüm sunar (Bernstein 2005). Ancak morfolojik olarak yapılan SEM incelemesinde kesin olarak krizotil ve diğer asbest minerallerinin tanımlaması tam olarak netleştirilememekle birlikte, kristallerin kısmen yassı kısmen de sivri, kıymık formlar şeklinde bulunduğu, özellikle asbest formları için tipik olan liflerde bükülme, uç kesimlerin kıymık görüntüsünün olması çok önemlidir (Şekil 2 de 3, 10 ve 12 nolu numuneler).

EDS analizlerinde tespit edilen kimyasal bileşimin krizotil mineralinin teorik formülü arasında benzerlik tespit edilmiştir. Bilindiği gibi serpantin  $Mg_3Si_2O_5(OH)_6$  bileşimine sahip üç (antigorit, lizardit ve krizotil) polimorfu vardır bu formların hepsinde Mg:Si oranı aynıdır. Bu nedenle, EDS analizleri lifsi asbest görünümlü kristallerde yapılmıştır, bu mineralin yapısal formülü ile tutarlı olarak Mg ve Si'in oranının yaklaşık olarak 3:2 (veya Si:Mg=0.67) ile uyumluluğu denetlenmiştir. Benzer şekilde talk ve tremolit de EDS analiz sonuçları yapısal formülü hesaplanarak teorik yapısal formüllerindeki Mg:Si oranıyla karşılaştırılmıştır. Serpantin polimorflarından özellikle morfolojik olarak krizotil mineraline benzeyen kristallerin, talk  $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$  ve tremolit sırayla EDS ile alan/nokta analiz sonuçları bu minerallerin teorik formüllerindeki Mg:Si oranı olan 3:2, 3:4 ve 5:8 oranıyla aynı veya çok yakın sonuçlar belirlenmiştir (Çizelge 2).



**Şekil 3.** İncelenen bazı talk pudralarının SEM fotoğrafları ve EDS yapılan alan veya noktalar (Çizelge 2’de verilmiştir).

**Çizelge 2.** EDS analizi yapılan kristallerin Si, Mg ve Fe içerikleri (%) ve oranları.

	Si	Mg	Fe	Si/Mg	Mg/Si	Adı
1	61.11	38.99	--	0.74	1.35	Tlc
2	64.39	34.03	1.58	0.62	1.62	Tr
3	63.63	36.37	2.29	0.67	1.50	Ctl
4	62.31	35.91	1.72	0.67	1.49	Ctl
5	60.44	37.37	2.19	0.76	1.31	Tlc
6	62.39	35.10	2.51	0.66	1.52	Ctl
7	64.39	34.03	1.58	0.62	1.62	Tr
8	63.31	34.04	2.65	0.63	1.59	Tr

Not: Mineral isimlerinin açıklaması Çizelge 1’de verilmiştir.

Bazı analizlerde krizotilin kimyasal bileşimi ile uyumlu kristallerin Fe veya Al içerdiği de gözlenmiştir. SEM de talkın öz şekilli kristallerinin bileşiminin safa yakın olmakla birlikte, %1-3 arasında Fe içeriği de tespit edilmiştir (Şekil 3, No 23). Liflerin içerdiği Fe miktarının, uzun süre reaktiviteyi ve hidroksil radikallerini kontrol ettiği ve kanser hücreleri için gerekli bir besin olduğu, krizotilin krokidolit ve amositinden daha az Fe içerdiği

(0-3%), Fe içeriğinin DNA zincirinin kırılmasını artıran hidroksil radikallerinin oluşumunu katalize ettiği belirtilmiştir (Weinberg 1989). Araştırmacı demir içeren tremolit ile kontamine olmuş krizotil, krozdolit ve amositin endüstriyel kullanımının ortadan kaldırılmasının asbeste bağlı kanser ölüm oranında önemli derecede azalmaya neden olabileceğini ifade etmiştir. Solunumla alınabilen, çok yüksek biyo-kalıcılığı ve inflamatuvar etkisi olan tremolit asbest, diğer asbest lifleri ve özellikle krizotil asbest yanında, talk gibi asbest olmayan malzemeler içinde bir tali bileşen olarak bulunsa bile, mezotelyoma ve akciğer kanserine neden olabileceği belirtilmiştir (Pacella vd. 2015).

Yumurtalık kanser vakalarının kanserli dokularında çoğunlukla asbest formu talk ve diğer asbest minerallerinin (tremolit ve antofillit) tespit edildiği, asbest içeren talkı kozmetik olarak kullanmanın asbest maruziyetine neden olduğu açıklanmıştır (Steffen vd. 2020). Ancak, Goodman vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise, perineal talk kullanımı ile yumurtalık kanseri arasında nedensel bir ilişkiyi olmadığı belirtilmiştir.

Tremolit ve krizotil minerallerinin kristal kafesinde magnezyum yerine kısmen (Mg’un %5-10 kadar) demirin kristal kafese yerleşiminin asbestin kanser oluşturma riskini artırdığı belirtilmiştir (Pacella vd. 2010, 2015). Gualtieri vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada mineral yüzeyindeki demirin çoğunun oksitlenmesiyle demir indirgemesinin muhtemelen bu minerallerin toksitesinde önemli bir rol oynadığını açıklanmıştır.

Talk pudrası olarak piyasada satılan ürünlerin XRD verilerine göre bazılarının %50 civarında kalsit yanında, %10-20 arasında dolomit ve manyezit ile bazı kimyasallar içermesi de CTFA (The Cosmetics, Toiletry, and Fragrance Association) standartına uygun değildir. Kozmetikte kullanılan talkın en az %90 talk içermesi, kalsit, klorit, dolomit, kaolen ve manyezit minerallerinin tali bileşen olarak bulunması, lifsi mineralleri (tremolit, krikodolit, ribekit, krizotil gibi,) içermemesi gerekmektedir.

## 5. Sonuçlar

Piyasadan alınan talkların mineralojik ve kimyasal bileşiminin incelenmesi sonucunda:

- 1- Genelde talk pudralarının en az %90 talk mineralinden hazırlanmadığı,
- 2- Bazı talk pudralarının %10-50 arasında kalsit ve ayrıca dolomit, manyezit gibi karbonat minerallerini içerdiği,
- 3- Bazı talk pudralarının içeriğinin yazılmadığı,
- 4- Yazılan içerikle belirlenen içerik arasında önemli farklılıklar olduğu,
- 5- Bazı talk pudralarının krizotil ve tremolit benzeri kanserojen mineralleri içerdiği ve bu minerallerin Fe içeriğinin % 1.58-2.65 arasında olduğu tespit edilmiştir.
- 6- Fe içeriğinin asbest minerallerinin kanser oluşturma reaktivitesini artırması nedeniyle dikkate alınması gerekir.
- 7- Talk pudralarının lifsi asbest benzeri mineralleri kesin olarak içermediği yazılmalıdır.
- 8- Talk pudralarında özellikle asbest minerallerinin bulunması, talk dışı bileşenlerin standartlara aykırı eklenmesi, bu ürünlerin kozmetikte ve farmakolojide kullanımının revize edilmesini, kontrollünün acilen yapılmasını gerektirmektedir.

## 6. Teşekkür

Bu araştırma Selçuk Üniversitesi (BAP 17401035) desteğinde gerçekleştirilmiştir.

## 7. Kaynaklar

- Addison, J. and McConnell, E.E., 2008. A review of carcinogenicity studies of asbestos and non-asbestos tremolite and other amphiboles. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **52**, 187-199.
- Aust, A.E., Cook, P.M. and Dodson, R.F. 2011. Morphological and Chemical Mechanisms of Elongated Mineral Particle Toxicities, *Journal of Toxicology and Environmental Health*, Part B, **14**, 1-4, 40-75.
- Bernstein, D.M., 2014, The health risk of chrysotile asbestos. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, **20**, 366-370.
- Bernstein, D.M., Rogers, R.A., Sepulveda, R., Donaldson, K., Schuler, D., Gaering, S., Kunzendorf, P., Chevalier, J. and Holm, S.E., 2010. The pathological response and fate in the lung and pleura of chrysotile in combination with fine particles compared to amosite

asbestos following short-term inhalation exposure: *interim results. Inhalation Toxicology*, **22(11)**, 937-962.

- Goodman, J.E., Kerper, J.E., Prueitt, R.L. and Marsh, C.M., 2020. A critical review of talc and ovarian cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews* **23**, 183- 213.
- Gualtieri, A. F., Andreozzi, G. B., Tomatis, M. and Turci, F. 2019. Iron from a geochemical viewpoint. Understanding toxicity/pathogenicity mechanisms in iron-bearing minerals with a special attention to mineral fibers. *Free Radical Biology and Medicine*, **133**, 21–37.
- International Agency for Research on Cancer (IARC) 1996. Mechanisms of fibre carcinogenesis. *Lyon International Agency for Research on Cancer*. Scientific Publications No: 140.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), 1999. Overall Evaluations of Carcinogenicity: An Updating of IARC Monographs Volumes 1 to 42. No. 71987.
- JCPDS, 1994. Powder Diffraction File 1994: PDF-2 Database Sets 1-44, Pennsylvania, USA.
- Ikpambese, K., Gundu, D.T. and Tuleun, L.T., 2016. Evaluation of Palm Kernel Fibres (PKFs) for Production of Asbestos-Free Automotive Brake Pads. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, **28**, 110-118.
- Kakooei, H. and Marıoryad, H., 2010. Evaluation of Exposure to the Airborne Asbestos in an Automobile Brake and Clutch Manufacturing Industry in Iran. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **56**, 143-147.
- Karakaya, M.Ç. 2006. Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri. Bizim Büro Yayınevi, Ankara 640.
- Karakaya, N. ve Karakaya M.Ç. 2020. Türkiye Piyasasında Satılan Talk-Pudralarının Asbest Mineralleri Bulundurma Riski Açısından Araştırılması. S.Ü. BAP, Araştırma Projesi No: 1741135, 57 (yayınlanmamış).
- Langer, A.M., Nolan, R.P. and Addison, J., 1991. Distinguishing between amphibole asbestos fibers and elongate cleavage fragments of their non-asbestos analogues. In: Brown RC, Hoskins JA, Johnson NF, (eds.) Mechanisms in fibre carcinogenesis. New York, Plenum Press, 253–267.

Millette, J.R. 2006. Asbestos analysis methods. In Asbestos—Risk assessment, epidemiology, and health effects. Dodson R.F., Hammar, S.P. (eds) Boca Raton, FL, Taylor & Francis, 9-37.

Moore, D.M. and Reynolds, R.C. 1997. X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd edition. Oxford University Press, New York, 378.

Muhle, M. and Pott, F. 2000. Asbestos as reference material for fibre-induced cancer. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, **73**, 53-59.

Pacella A., Andreozzi, G.B. and Fournier J., 2010. Detailed crystal chemistry and iron topochemistry of asbestos occurring in its natural setting: a first step to understanding its chemical reactivity. *Chemical Geology*, **277**, 197-206.

Pacella, A., Fantauzzi, M., Turci, F., Cremisini, C., Montereali, M.R., Nardi, E., Atzei, D., Rossi, A. and Andreozzi, G.B. 2015. Surface alteration mechanism and topochemistry of iron in tremolite asbestos: a step toward understanding the potential hazard of amphibole asbestos, *Chemical Geology*, **405**, 28–38.

Penninkilampi, R. and Eslick, G.D. 2018. Perineal Talc Use and Ovarian Cancer A Systematic Review and Meta-Analysis. *Epidemiology*, **29(1)**, 41-49.

Slomovitz, B., de Haydu, C., Taub, M. Robert, L., Coleman, R.L. and Monk, B.J., 2021. Asbestos and ovarian cancer: examining the historical evidence. *International Journal of Gynecological Cancer*, **31**, 122–128.

Steffen, J. E. Tran, T., Yimam, M. Clancy, K., Bird, T.B., Rigler, M., Longo, W. and Egilman, D.S. 2020. Serous Ovarian Cancer Caused by Exposure to Asbestos and Fibrous Talc in Cosmetic Talc Powders—A Case Series. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, **62(2)**, 65-77.

Weinberg, E.D. 1989. Iron, asbestos, and carcinogenicity. *The Lancet*, **333, 8651, 1**, 399-1400.

Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**, 185-187.

Yawas, D.S., Aku, S.Y. and Amaren, S.G., 2016. Morphology and Properties of Periwinkle Shell Asbestos Free Brake Pad. *Journal of King Saud University-Engineering Science*, **28**, 103-109.

### **İnternet kaynakları**

1-

Cosmetics Fragrance and Toiletry Association. The Cosmetics, Fragrance and Toiletry Association (CTFA) Specifications - Talc & Cosmetic Talc. 1976. <https://repository.library.brown.edu/studio/item/bdr:841476/>

## Araştırma Makalesi / Research Article

# Uranium Potentiality of Coal Occurrences in Dinar (Afyonkarahisar, western Turkey) region: Geologic Factors Controlling the Accumulation of the Uranium

Anıl SOYLU<sup>1</sup>, Zeynep DÖNER<sup>2</sup>, Ali Tuğcan ÜNLÜER<sup>2</sup>, Abdullah FİŞNE<sup>1</sup>, Mustafa KUMRAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mining Engineering, Faculty of Mines, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup>Department of Geological Engineering, Faculty of Mines, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey

Sorumlu yazar e-posta: soylu16@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8789-2245>

e-posta: donerz@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2928-3174>

e-posta: unluera@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0382-4059>

e-posta: fisnea@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7449-0573>

e-posta: kumral@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7827-8721>

Geliş Tarihi: 29.04.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

## Abstract

Random distribution of energy resources in the world, rapidly increasing energy prices, environmental problems such as global warming and climate change, the depletion of fossil fuels in the near future and their negative impact on the environment and human health, increasing dependence on foreign energy, limited energy resources of big consumer countries and being dependent on a small number of specific countries lead states to seek various sources of energy. The uranium fuel-based nuclear energy generation is an alternative energy source for Turkey. Proven uranium reserves in Turkey are 32.4 kt and exploration of sedimentary basins for uranium mineralization still continues. In this context, Dinar (Afyonkarahisar, western Turkey) coal occurrences can attract attention for economic possibilities of uranium related with Plio-Miocene aged extensional tectonic regime. A total of 17 coal samples were collected for analyses from five boreholes at various depths. The uranium contents of studied coals are up to 1065 µg/g. The origin of the uranium in this basin are considered as a stratal epigenetic origin, which the uranium was introduced in the coal after coalification and consolidation of the enclosing sediments by ground water deriving uranium from hydrothermal sources or from unconformably overlying volcanic rocks. In addition, it can be highlighted that the higher contents of uranium occur in the upper parts of the stratigraphically highest lignite beds, which is compatible with other epigenetic lignite deposits.

## Keywords

Uranium; Linyit;  
Afyonkarahisar/Dinar;  
Western Turkey

## Dinar (Afyonkarahisar, Batı Türkiye) Bölgesindeki Kömür Oluşumlarının Uranyum Potansiyeli: Uranyum Birikimini Kontrol Eden Jeolojik Faktörler

## Öz

Dünyada enerji kaynaklarının rastgele dağılmış olması, yükselen enerji fiyatları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlar, yakın gelecekte fosil yakıtların tükenmesi, bu enerji kaynaklarının çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkileri, yabancı kaynaklara ve az sayıda enerji zengini ülkeye bağımlılık sebebiyle ülkeler farklı enerji kaynaklarına yönelmiştir. Uranyumu yakıt olarak kullanan nükleer enerji üretimi Türkiye için alternatif bir kaynak olarak ele alınmaktadır. Türkiye'nin kanıtlanmış uranyum rezervi 32.4 kiloton olup, halen uranyum içerebilecek havzaların araştırılması devam etmektedir. Bu kapsamda, Pliyo-Miyosen genişlemeli rejim sonucu gelişen Dinar (Afyonkarahisar, Batı Anadolu) kömür oluşumları ekonomik açıdan önem arz edebilecek uranyum içerikleri bakımından ilgi çekebilmektedir. Çeşitli derinliklerden ve 5 sondaj kuyusundan toplam 17 adet kömür numunesi alınmıştır. Bu numunelerin uranyum içeriklerinin 1065 µg/g mertebelerine kadar çıktığı görülmüştür. Havzada mevcut olan uranyumun, kömürleşme süreci ve kömür tabakalarının üzerinin volkanoklastik sedimanlar tarafından örtülmesinden sonra, hidrotermal akışkanlar ile karışan

## Anahtar kelimeler

Uranyum; Linyit;  
Afyonkarahisar/Dinar;  
Batı Türkiye

yeraltı sularının etkisiyle katmanlı epijenetik köken modeline uygun şekilde oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, yüksek uranyum içeriğinin, linyit damarlarının üst katmanlarında yoğunlaşması sebebiyle havza diğer epijenetik linyit oluşumları ile benzerlik göstermektedir.

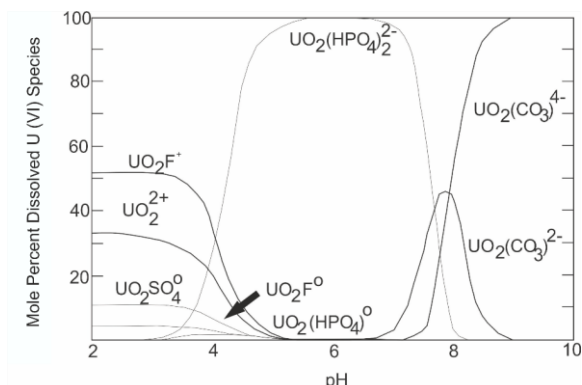
© Afyon Kocatepe Üniversitesi.

## 1. Introduction

Random distribution of energy resources in the world, rapidly increasing energy prices, environmental problems such as global warming and climate change, the depletion of fossil fuels in the near future and their negative impact on the environment and human health, increasing dependence on foreign energy, limited energy resources of big consumer countries and being dependent on a small number of specific countries lead states to seek various sources of energy. The uranium fuel-based nuclear energy generation is an alternative energy source for Turkey. Proven uranium reserves in Turkey are 32.4 kt and exploration of sedimentary basins for uranium mineralization still continues. In this context, Dinar (Afyonkarahisar, western Turkey) coal occurrences can attract attention for economic possibilities of uranium related with Plio-Miocene aged extensional tectonic regime.

Radioactive elements' existence in lignites and other hydrocarbon basins are reported at multiple locations (Gentry et al. 1976, Zelinski and Meier 1988, Dill 1987, Douglas et al. 2011). In earth crust, concentration of uranium is around 1-3 ppm (Hazen et al. 2009, Fayek et al. 2011).

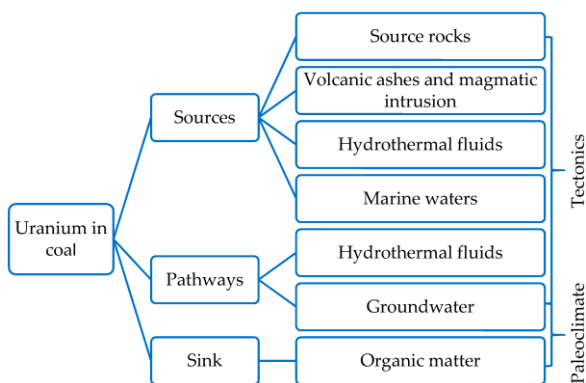
The solubility of the solutions with low temperature increases significantly with the presence of strong anions such as  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $(SO_4)^{2-}$ ,  $(CO_3)^{2-}$ ,  $(PO_4)^{2-}$  (Langmuir 1978). It increases the solubility and the mobility of uranium in groundwater (Cuney and Kyser 2008). The solubility of the uranium minerals in aqueous media and the behavior of the uranyl complexes are given in Figure 1.



**Figure 1.** Distribution of uranyl complexes versus pH for some typical ligand concentrations in ground waters of the Wind River Formation at 25°C.  $PCO_2=10-2.5$  atm,  $\Sigma F=0,3$  ppm,  $\Sigma Cl=10$  ppm,  $\Sigma SO_4=100$  ppm,  $\Sigma PO_4=0.01$  ppm,  $\Sigma SiO_2=30$  ppm (Langmuir 1978).

The highest concentrations of uranium in ground water are found in areas of known deposits (about 70-300 parts per billion) and in ground water from silicic tuffs and tuffaceous rocks of Oligocene and Miocene age (about 20-45 parts per billion). The most highly mineralized water from tuffaceous terranes has an alkaline pH range of 7.5-9.5 (Denson 1959). In general, the greater the alkalinity of the waters from these rocks, the more uranium the waters contain. A large part of the uranium deposits (sedimentary deposits) could be dissolved from a prominent uranium source (metamorphic massives, peralkalin or peralumin) and deposited in a suitable environment (Eh-pH conditions, solution rock reactions, permeability of rocks). The genetic factors for uranium enrichment in coals are shown in Figure 2.





**Figure 2.** Genetic factors for uranium enrichment in coals. The schematic diagram is reorganized from Chen et al. (2017).

The uranium concentrations of the coal deposits ranging from 0.005 to 0.02 % generally are not uniform. Within the low-grade uranium-bearing coal deposits, smaller irregular masses of coal containing 0.1 percent or more uranium have been found in some deposits around the globe. The large quantities of uranium can be expected in the low-rank coal of Plio-Miocene aged lacustrine sedimentary basins in western Anatolia.

The aim of this study is to evaluate the economic possibilities where uranium was found in sufficient amount in coal and to determine the geologic factors controlling the accumulation of the uranium in Dinar (Afyonkarahisar, western Anatolia).

## 2. Material and Methods

A total of 17 coal samples were collected for analyses from five boreholes at various depths. In order to obtain the original basis moisture, ash, volatile matter and fixed carbon core samples are prepared (ASTM International 2013). Firstly, they are fed into a crusher, then, pulverised with a lab scale ring mill. Then, proximate analysis is carried out with determining moisture content (ASTM International 2017), ash content (ASTM International 2012) and volatile matter (ASTM International 2017) by utilizing a Binder brand stove and a Carbolite brand oven. Also, some other part of pulverized samples are put in the oven at 750 °C for at least 6 hours until all organic matter is removed.

Elemental analyses were conducted on powders grounded using an agate mortar muller milling device for Elan DRC-e Perkin Elmer Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) in Geochemistry Research Laboratories of Istanbul Technical University (ITU/JAL) to determine the U, Th and REE element contents. A two-step digestion process used approximately 50 mg of powdered samples: (1) 6 ml of 37% HCl, 2 ml of 65% HNO<sub>3</sub> and 1 ml of 38–40% HF acid mixer put in a pressure- and temperature-controlled Teflon beaker using a Berghoff Microwave at 135 °C; (2) 6 ml of 5% boric acid solution was added to the step one mixer for ICP-MS analyses.

## 3. Geological Setting

The Dinar (Afyonkarahisar) lignite deposit is located approximately 120 km<sup>2</sup> in the western Turkey. The Dinar sedimentary basin is bordered between the Menderes massif in north and the Lycian nappes in east-southeast direction. The autochthon Pan-African basement overlain by the Menderes massif Lower Devonian-Eocene schist and marbles and Mesozoic-Early Cenozoic platform carbonates. The Menderes massif, described as Pan-African basement, is overlain by Lower Devonian-Eocene schist and marbles and Mesozoic-Lower Cenozoic platform carbonates. The carbonates consist mainly of marble, phyllite, schist, gneiss, dolomite and limestone. Lycian nappes contain fragments of the metamorphic rocks of Taurides overlain by the Mesozoic platform carbonates, and fragmented ophiolite and volcano-sedimentary units at the top of the nappes (Yilmaz et al. 2000).

Pre-Eocene carbonate rocks and Eocene Saridere formation (mainly claystone and sandstone) can be considered as the basement of the basin. Oligocene marine conglomerates which are named as Akcakoy formation deposited on these units. Lacustrine sediments and fluvial sediments composed of Upper Miocene-Pliocene sandstone, siltstone, claystone, marl, limestones, lignite with volcanic intercalations (Kumalar formation) were deposited unconformably. Along the northern border of the graben, Pliocene limestones and carbonate

cemented conglomerates (Karatas formation) unconformably overlie the basement rocks. Towards the basin, stream-lacustrine units contain conglomerate claystone, marl and siltstone. Plio-Quaternary units (Kepeztepe formation), which are stored under the control of active tectonism, comprise alluvially-phase and river-lake sediments. In the eastern part of the study area Miocene-Pliocene volcanic sequences with trachyandesites, phonolites and pyroclastics are observed (Figure 3).

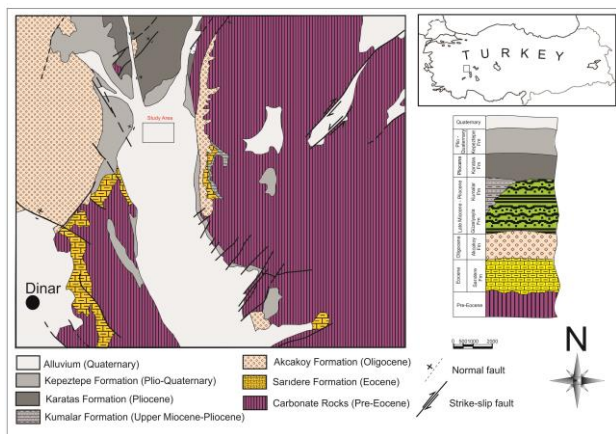


Figure 3. Geological map of the study area (modified from Bechtel et al. 2016)

#### 4. Results and Discussion

##### 4.1 Geochemical and Petrographical Properties of Studied Coals

A previous petrographic observation reveals that the Afyonkarahisar/Dinar uranium-bearing coals are rich in huminite, in which textinite and ulminite (telohuminite subgroup), attrinite, densinite (detrohuminite subgroup), and corphuminite (gelohuminite subgroup) are more abundant than other macerals (Bechtel et al. 2016).

In addition, geochemical composition of selected major oxides and trace elements are listed in Tables 1 and 2. The geochemical studies focus on the original and dry-ash-free moisture, ash, volatile matter and fixed carbon values of the core samples as well as the U-Th-REE element contents. The dry-ash-free volatile contents of all samples from different boreholes are greater than 50%, indicating that they are in the lignite class.

The uranium contents in ash of studied lignite samples from five boreholes at various depths are up to 1065 µg/g. The ash content of the lignite ranges from 10 percent or less to about 20 percent, which indicates that after ignition of the lignite the uranium content of the ash is at least 5 times and generally 7-10 times the uranium content of the lignite. On the other hand, it can be concluded that uranium contents of studied samples are up to 106.5 µg/g in lignite. Furthermore, there is no evident dependency between uranium content and depth. The uranium behaves extreme mobile due to the Eh-pH conditions of basin. The Eh conditions of coals are sufficient for uranium enrichments regardless of depth.

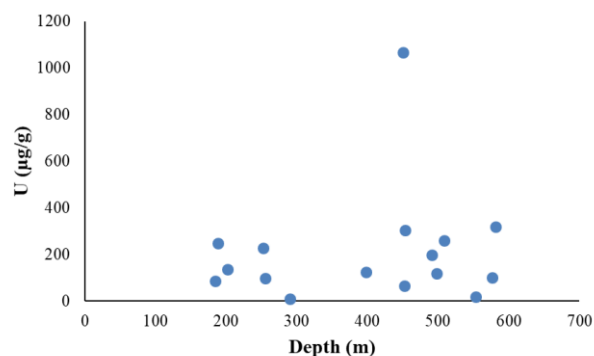
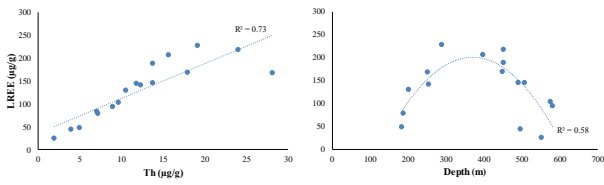


Figure 4. Uranium concentration vs. depth.

The total rare earth elements abundances ( $\Sigma$ REE) are variable for studied samples, from 27.3 to 250.6 µg/g (average of 140.9 µg/g) (Table 1). The ratio of total light REE/ heavy REE ( $\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE) of the coals range from 8.00 to 16.7 (average of 12.4). These enrichment of LREEs relative to HREEs values of coals show a consistency with most distinctive features of the REE patterns of the coals (Yan et al. 2009). The LREEs have a similar behaviour with element Th that there is high positive correlation between them (Figure 4). In addition, it can be said that high LREE contents were observed at between 300 and 400 m average coal depth (Figure 5).

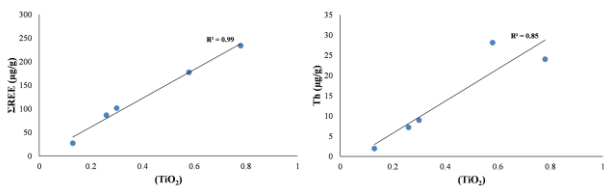
Ash content of the samples fluctuates in low to medium interval. Thus, the seams have different burial conditions in terms of mineral matter considering multiple seams and depth range. However, uranium and other elements consistently available in all samples in some degree because deposition of uranium extends over time.





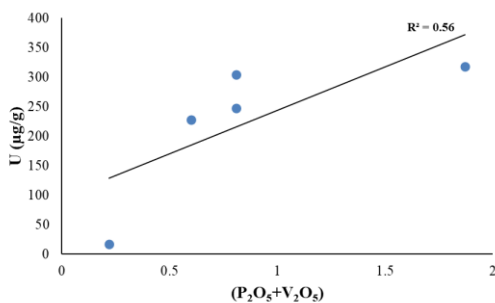
**Figure 5.** The correlations of LREE contents vs. Th and depth

High correlation values between  $TiO_2$  vs. Th and  $\Sigma REE$  strongly suggest that the REE-Th bearing mineral is titanite which is highly resistant in arid-semi-arid conditions (Figure 6, Table 2).



**Figure 6.** The correlations of  $TiO_2$  contents vs.  $\Sigma REE$  and Th.

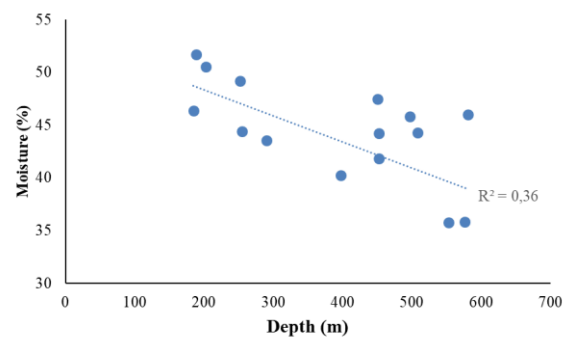
It can be concluded that the U-bearing minerals in lignite layers can be either phosphate or vanadate group minerals such as torbernite, autinite or carnotite. These minerals are considered as secondary uranium minerals which can be found in sedimentary uranium deposits. The presence of  $[PO_4]^{3-}$  and  $[VO_4]^{3-}$  anions caused rapid precipitation of uranyl  $U^{6+}$  from low temperature hydrothermal or meteoric solutions (Figure 7, Table 2).



**Figure 7.** The correlations of U vs.  $(P_2O_5+V_2O_5)$  contents.

In addition, the Th/U and U/Th ratio can be used as a paleoredox proxy (Myers and Wignall 1987, Nath et al. 1997). High concentrations of U suggest that the sediments were probably oxygen-deficient bottom water (Lezin et al. 2013). As shown in Table 1, Th/U ratios of coal samples are low, varying from 0.03 to 2.31, with an average of 0.35. Considering the Th/U ratios of 0–2 for mudstones suggest an anoxic environment, according to Wignall and Twitchett (1996), it can be concluded that coals were deposited in reducing environment. Furthermore, ratios of U/Th < 1.25 indicate oxidizing conditions, while values > 1.25 suggest suboxic and anoxic depositional conditions (Nath et al. 1997). Studied coals U/Th ratios are between 0.43 and 35.5 (average of 14.7), indicating that coal samples were deposited in anoxic depositional conditions.

Proximate analysis results of the samples are also given in Table 1. Considerably high moisture and volatile matter contents implies early stage of lignite rank. Produced fuel ratio values from volatile matter and fixed carbon contents supports this rank range as well. Moisture content of lignite seams decreases with increasing depth in a wide band (Figure 8). Therefore, impact of pressure is significant during coalification and immediate burial with peatification process probably took place.



**Figure 8.** Moisture content vs. depth.

**Table 1.** Geochemical results (contents in µg/g) with original and dry-ash-free basis moisture, ash, volatile matter and fixed carbon (contents in %) values for coal samples from five different boreholes (named as A, B, C, D, E).

Element	A1	A2	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	D1	D2	D3	D4	E1
U	1065.8	17.4	65.1	228.3	135.1	247.5	84.7	14.5	318.3	101.7	304.4	117.4	8.31	98.0	198.4	259.5	124.3
Th	18.0	1.94	13.8	28.1	10.5	7.19	4.99	7.09	8.96	9.69	24.0	3.95	19.2	12.3	13.8	11.9	15.7
In	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Tl	1.53	0.52	0.04	4.72	3.18	0.23	0.24	0.32	0.17	2.71	3.81	0.23	1.21	4.22	2.93	2.50	5.90
Rb	78.7	25.0	56.1	143.2	111.9	34.9	26.1	37.6	47.7	70.6	138.5	17.8	145.3	124.2	69.9	65.2	78.5
Ga	29.0	6.04	20.5	22.1	19.1	8.88	4.58	12.1	29.6	12.0	37.5	7.47	31.7	23.6	19.9	19.6	18.1
Cd	8.20	7.03	6.74	2.56	4.29	1.94	7.87	9.87	8.54	3.48	2.22	3.77	3.39	3.70	1.84	4.03	3.38
Cs	15.0	3.77	5.76	20.0	15.1	5.79	5.33	3.66	9.62	9.95	20.3	3.17	10.0	15.0	12.0	10.9	14.4
Y	14.2	3.85	37.9	11.6	16.7	15.9	6.21	9.47	11.3	10.2	22.1	5.27	31.5	17.1	13.2	14.6	15.4
La	44.4	5.63	42.3	44.7	29.7	20.4	12.4	19.8	23.4	25.5	54.9	11.1	53.7	33.2	35.0	34.7	53.2
Ce	78.2	11.2	88.9	76.0	60.8	35.9	22.4	39.8	43.8	48.1	101.3	19.6	104.8	66.2	68.8	67.8	98.7
Pr	8.49	1.33	9.52	9.08	6.83	3.88	2.29	4.37	5.01	5.22	11.5	2.19	12.3	7.44	7.39	7.39	10.4
Nd	29.9	5.39	36.5	30.5	25.7	14.2	8.35	16.1	17.2	19.0	39.3	7.94	45.8	27.1	27.2	27.2	36.0
Sm	5.68	1.11	8.52	5.84	5.06	3.05	1.88	2.91	3.47	3.93	8.03	2.13	8.68	5.59	5.10	5.71	6.34
Eu	1.64	0.32	2.50	1.57	1.25	1.05	0.68	0.73	0.98	1.16	2.33	0.74	2.08	1.40	1.44	1.41	1.57
Gd	4.44	0.83	8.18	4.26	4.22	2.52	1.21	2.49	2.95	3.12	6.55	1.20	8.49	4.83	4.06	4.49	5.48
Tb	0.62	0.12	1.15	0.57	0.70	0.41	0.18	0.38	0.40	0.42	0.91	0.16	1.22	0.70	0.59	0.64	0.77
Dy	2.70	0.55	5.76	2.38	2.94	1.75	0.88	1.81	1.85	1.84	4.02	0.66	5.98	3.32	2.50	2.94	3.16
Ho	0.47	0.09	1.15	0.38	0.51	0.35	0.17	0.32	0.30	0.31	0.66	0.11	1.02	0.57	0.38	0.49	0.51
Er	1.45	0.34	3.50	1.31	1.63	1.43	0.57	0.95	1.08	1.03	2.29	0.43	3.18	1.77	1.25	1.45	1.54
Tm	0.17	0.04	0.45	0.12	0.24	0.20	0.08	0.12	0.11	0.11	0.27	0.07	0.39	0.25	0.16	0.18	0.17
Yb	1.26	0.31	2.94	0.93	1.50	1.41	0.56	0.96	0.96	0.89	1.85	0.36	2.71	1.49	1.27	1.21	1.31
Lu	0.16	0.03	0.40	0.12	0.20	0.22	0.08	0.13	0.13	0.10	0.25	0.05	0.40	0.22	0.11	0.16	0.15
ΣREE	179.6	27.3	211.8	177.7	141.3	86.7	51.7	90.8	101.7	110.7	234.1	46.8	250.6	154.1	155.2	155.8	219.3
ΛREE	168.3	25.0	188.3	167.6	129.4	78.5	47.9	83.7	93.9	102.9	217.3	43.8	227.2	140.9	144.9	144.2	206.2
ΗREE	11.3	2.31	23.5	10.1	11.9	8.29	3.73	7.16	7.79	7.83	16.8	3.04	23.4	13.2	10.3	11.6	13.1
ΛREE/ΗREE	14.9	10.8	8.00	16.7	10.8	9.47	12.8	11.7	12.1	13.1	12.9	14.4	9.72	10.7	14.0	12.5	15.8
Moisture	47.5	35.8	44.2	49.2	50.6	51.7	46.4	32.7	46.0	35.8	41.9	45.8	43.5	44.4	29.2	44.3	40.3
Ash	6.09	31.8	10.7	11.5	13.7	8.76	12.9	24.5	6.46	26.2	12.9	9.47	19.2	20.1	57.0	11.9	24.8
Volatile matter	27.9	31.2	25.9	23.4	23.4	24.8	26.7	30.7	28.0	28.4	28.0	27.4	25.1	24.4	11.4	25.6	24.6
Fixed carbon	18.5	1.30	19.2	16.0	12.4	14.7	14.0	12.1	19.6	9.60	17.2	17.3	12.1	11.1	2.45	18.3	10.3
Volatile matter (DAF)	60.2	96.0	57.4	59.4	65.4	62.8	65.5	71.6	58.8	74.7	61.9	61.3	67.4	68.8	82.3	58.3	70.5
Fixed carbon (DAF)	39.8	4.00	42.6	40.6	34.6	37.2	34.5	28.4	41.2	25.3	38.1	38.7	32.6	31.2	17.7	41.7	29.5
Fuel ratio	1.51	24.0	1.35	1.46	1.89	1.69	1.90	2.52	1.43	2.96	1.62	1.58	2.07	2.21	4.66	1.40	2.39
Average depth	450.2	553.0	452.6	252.4	202.3	188.5	184.6	847.4	581.5	576.9	452.8	497.5	290.2	255.2	490.9	508.2	397.7

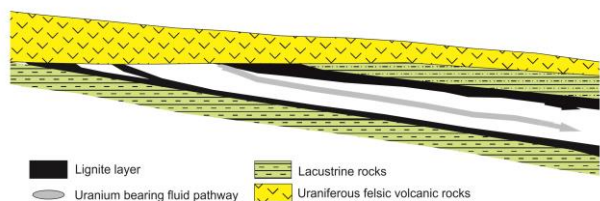
Table 2 shows that the CaO is the most abundant element in lignite samples followed by SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Samples also have considerable amounts of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The high SO<sub>3</sub> values are probably caused by sulphur bearing minerals in reducing environment such as pyrite and marcasite.

**Table 2.** Contents of major-element oxides (in %) of selected coal samples.

Major Oxide	A2	B2	B4	C2	C4
SiO <sub>2</sub>	7,22	22,5	8,58	15,6	30,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,23	11,4	4,56	7,42	13,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,03	5,67	5,57	3,22	6,02
MgO	1,06	2,54	3,78	2,46	5,28
CaO	79,6	33,8	52,7	41,1	20,3
Na <sub>2</sub> O	ND	0,24	0,32	0,34	0,57
K <sub>2</sub> O	0,34	1,28	0,60	1,14	1,91
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,58	0,26	0,30	0,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,38	0,49	1,21	0,49
MnO	ND	ND	ND	ND	ND
BaO	0,16	0,39	0,30	0,32	0,50
SrO	0,10	0,11	0,19	0,10	ND
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ND	0,22	0,32	0,66	0,32
SO <sub>3</sub>	5,37	20,4	21,8	25,2	19,1

#### 4.2 Geologic Factors Controlling The Accumulation of The Uranium

The writers believe an abundance of field evidence favors the epigenetic hypothesis, the third of three opposing concepts, numbered here as the (1) diagenetic, (2) syngeneic, and (3) epigenetic hypotheses of origin (Denson 1959). The uranium in these deposits is of stratal epigenetic origin, secondarily derived by leaching of the volcanic materials in the Miocene rocks that at one time covered most of the region. The uranium was a primary constituent of finely disseminated in volcanic ash and other glassy extrusive rocks and that the uranium was leached from them by ground water percolating downward or moving laterally along aquifers near the lignite beds during weathering & devitrification and extracted by the lignite after coalification (Denson 1959, Figure 9). This concept was based largely on the fact that beds of uranium-bearing lignite intercalated with the tuffaceous rocks of the Kumalar formation.



**Figure 9.** Accumulation modeling of the uranium in epigenetic-stratal deposits with stratigraphic and hydrologic settings. (after Galloway and Hobday, 1996).

In addition, it can be concluded that the greater concentrations of uranium occur in the upper parts of the stratigraphically highest lignite beds, which is compatible with other epigenetic lignite deposits.

## 5. Conclusion

- The uranium contents of studied coals from five boreholes at various depths were determined up to 1065 µg/g in ash.
- The determined uranium enrichments in study area can be considered as stratal epigenetic origin via volcanic intercalations within coals and epiclastic sedimentary rocks.
- The high correlations of U vs. ( $P_2O_5+V_2O_5$ ) suggest that the U-bearing minerals in lignite layers can be either phosphate or vanadate group minerals such as torbernite, autinite or carnotite.
- It can be stated that the groundwater enriched in oxidation agents causes the uranyl complexes to mobilize and hence a high concentration of uranium.
- The higher contents of uranium occurred in the upper parts of the stratigraphically highest lignite beds, which is compatible with other epigenetic lignite deposits

## Acknowledgements

Authors thank to Electricity Generation Company in Turkey for collected samples and their support. Also, authors would like to express gratitude to the team members of Geochemistry Research Laboratories of Istanbul Technical University (ITU/JAL) for their helps with geochemical analyses.

## 6. References

- ASTM International, 2012. Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal: D3174-12.
- ASTM International, 2013. Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis: D2013/D2013M.
- ASTM International, 2017. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: D3173/D3173M-17a.
- ASTM International, 2017. Standard Test Method for Volatile Matter in Analysis Sample of Coal and Coke: D3175-17.
- Bechtel, A., Karayığit, A.İ., Bulut, Y., Mastalerz, M., Sachsenhofer, R.F., 2016. Coal characteristics and biomarker investigations of Dombayova coals of Late Miocene-Pliocene age Afyonkarahisar-Turkey, *Organic Geochemistry*, **94**, 52-67.
- Chen, J., Chen, P., Yao, D., Huang, W., Tang, S., Wang, K., Liu, W., Hu, Y., Li, Q., Wang, R., 2017. Geochemistry of uranium in Chinese coals and the emission inventory of coal-fired power plants in China, *International Geology Review*, **60(5-6)**, 621-637.
- Cuney, M., Kyser, K., 2008. Recent and Not-So-Recent Developments in Uranium Deposits and Implications for Exploration, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 39, 25-26.
- Denson, N.M., 1959. Uranium in coal in the western United States, US Government Printing Office, Vol. 1055, 3-4.
- Dill, H., 1987. Environmental and diagenetic analysis of lower permian epiclastic and pyroclastic fan deposits their role for coal formation and uranium metallogeny in the stockheim through (F.R.G.), *Sedimentary Geology*, **52**, 1-26.
- Douglas, G.B., Butt, C.R., Gray, D.J., 2011. Geology, geochemistry and mineralogy of the lignite-hosted Ambassador palaeochannel uranium and multi-element deposit, Gunbarrel Basin, Western Australia, *Mineralium Deposita*, **46(7)**, 761-787.
- Fayek, M., Horita, J., Ripley, E.M., 2011. The oxygen isotopic composition of uranium minerals: a review, *Ore Geology Review*, **41(1)**, 1-21.
- Galloway, W. E., Hobday, D. K., 1996. Fluvial systems. In *Terrigenous Clastic Depositional Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg 372-373.

- Gentry, R.V., Christie, W.H., Smith, D.H., Emery, J.F., Reynolds, S.A., Walker, R., Cristy, S.S., Gentry, P.A. 1976. Radiohalos in coalified wood: new evidence relating to the time of uranium introduction and coalification, *Science*, **194**(4262), 315-318.
- Hazen, R.M., Ewing, R.C., Sverjensky, D.A., 2009. Evolution of uranium and thorium minerals, *American Mineralogist*, **94**, 1293-1311.
- Langmuir, D., 1978. Uranium solution–mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochimica et Cosmochima Acta*, **42**, 547–569.
- Lézin, C., Andreu, B., Pellenard, P., Bouchez, J.L., Emmanuel, L., Faure, P., Landrein, P., 2013. Geochemical disturbance and paleoenvironmental changes during the early toarcian in NW Europe”, *Chemical Geology*, **341**, 1–15.
- Myers, K.J., Wignall, P.B., 1987. Understanding Jurassic organic-rich mud-rocks e new concepts using gamma ray spectrometry and palaeoecology: examples from the Kimmeridge clay of Dorset and the Jet rock of Yorkshire”, In: Leggett, J.K., Zuffa, G.G. (Eds.), *Marine Clastic Sedimentology*. Graham and Trotman, London, 1–45.
- Nath, B.N., Bau, M., Rao, B.R., Rao, C.M., 1997. Trace and rare earth elemental variation in Arabian Sea sediments through a transect across the oxygen minimum zone, *Geochimica et Cosmochima Acta*, **61**(12), 2375–2388.
- Wignall, P.B., Twitchett, R.J., 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction, *Science*, **272**, 1155–1158.
- Yan, D., Chen, D., Wang, Q., Wang, J., 2009. Geochemical changes across the ordoviciansilurian transition on the yangtze platform, south China, *Science China Earth Sciences*, **52**(1), 38–54.
- Yılmaz, Y., Genç, S.C., Gürer, O.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, R., Elmas, A., 2000. When did the western Anatolian grabens begin to develop?” In: Bozkurt E., Winchester, J. A., Piper, J. D. A.(Eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*, Geological Society of London Special Publications, 173, 353-384.
- Zelinski, R.A., Meier, A.L., 1988. The association of uranium with organic matter in Holocene peat: An experimental leaching study, *Applied Geochemistry*, 631-643.

## Hallaçlar Volkanitleri'nde (Bayramiç, Çanakkale) Stratejik Element Zenginleşmeleri

Demet KIRAN YILDIRIM, Zeynep DÖNER<sup>1</sup>, Ali Tuğcan ÜNLÜER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Sorumlu yazar e-posta: kirand@itu.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5995-5723>

e-posta: donerz@itu.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2928-3174>

e-posta: unluera@itu.edu.tr. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0382-4059>

Geliş Tarihi: 01.06.2022

Kabul Tarihi: 13.10.2022

### Öz

Yapılan çalışmada Bayramiç-Çanakkale bölgesinde bulunan Hallaçlar Volkanitleri stratejik element içerikleri açısından değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları sırasında özellikle yoğun hidrotermal alterasyon gözlemlenen kayalardan alınan örnekler üzerinde mineralojik-petrografik ve jeokimyasal incelemeler yapılmıştır. Çalışma alanının stratigrafisi Kazdağı metamorfiteğine ait Sütüven Formasyonu, Çetmi Ofiyolitik Melanji, Evciler Plütonu ve Hallaçlar Volkanitleri'nden oluşmaktadır. Hallaçlar Volkanitleri'nin Ofiyolitik kayalar ve Evciler Plütonu dokanalarında yoğun hidrotermal alterasyonların geliştiği ve bu alterasyonların özellikle ofiyolitik kayalara daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen jeokimyasal analizler sonucunda ise itriyum (Y), zirkonyum (Zr), toryum (Th), kalay (Sn) ve antimon (Sb) elementlerinin Hallaçlar volkanitleri içerisinde zenginleştiği görülerek, bu elementlerin metamorfik kayalar bünyesinden yıkanarak hidrotermal çözeltiler vasıtasıyla volkanitlerin içerisinde zenginleştiği kanısına varılmıştır.

### Anahtar kelimeler

Hallaçlar Volkanitleri;  
Stratejik Element;  
Bayramiç-Çanakkale

## Strategic Element Enrichments in Hallaçlar Volcanites (Bayramiç, Çanakkale)

### Abstract

In this study, Hallaçlar Volcanites located in Bayramiç-Çanakkale region were evaluated in terms of strategic element contents. Mineralogical-petrographical and geochemical investigations were carried out on the samples which were taken from the outcrops with intense hydrothermal alteration. The stratigraphy of the study area consists of the Sütüven Formation (Kazdağı Metamorfites), Çetmi Ophiolitic Melange, Evciler Pluton and Hallaçlar Volcanites. The intensity of hydrothermal alterations gradually increases in Hallaçlar Volcanites towards to the ophiolitic rocks and the Evciler Pluton. As a result of the geochemical analyzes carried out, it was observed that the yttrium (Y), zirconium (Zr), thorium (Th), tin (Sn) and antimony (Sb) elements were enriched in the Hallaçlar volcanites. It can be concluded that these elements were enriched in the volcanites with the hydrothermal solutions leaching from the elder metamorphic rocks.

### Keywords

Hallaçlar Volcanites;  
Strategic Element;  
Bayramiç-Çanakkale

### 1. Giriş

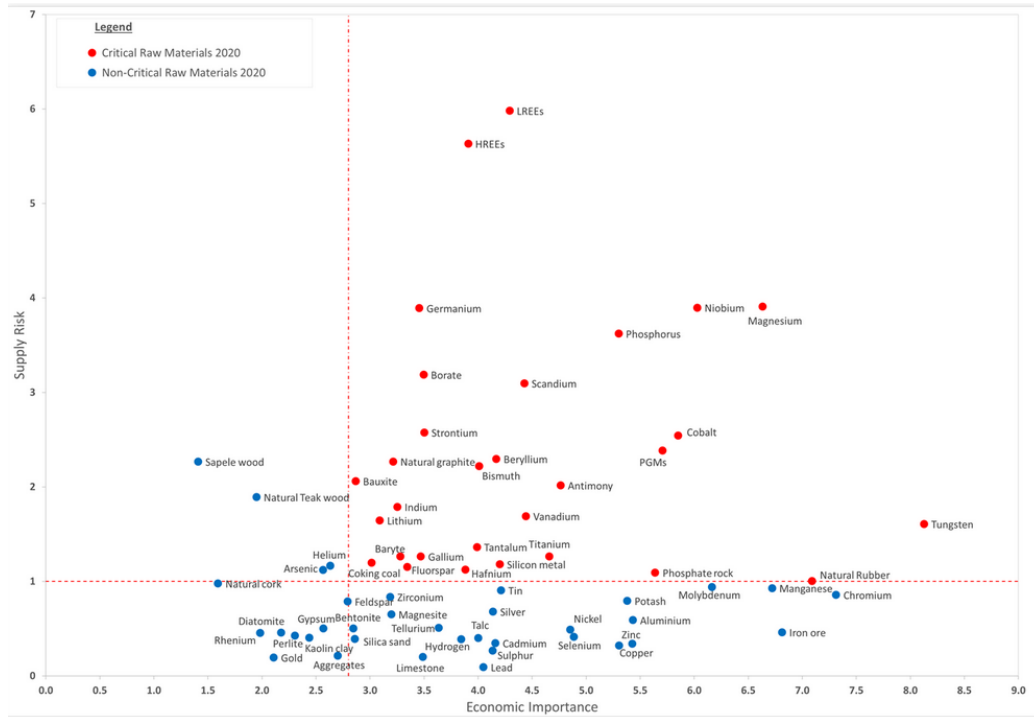
21.yüzyılın başından beri gelişen bilgi teknolojileri sürecinde tüketimlerin sürekli olarak artması nedeniyle gelişmiş ekonomilerin artan talebi dolayısıyla bazı elementlerin stratejik önem kazanmaları kaçınılmaz hale gelmiştir (Şekil 1). Bu elementlerden itriyum (Y); alaşımlarda katkı maddesi olarak, mikrodalga filtrelerinin yapımında, kamera lenslerinin ısıya ve darbeye dayanıklı hale getirmek amacıyla, likit kristal ekran yapımında, enerji tasarruflu lambalar gibi ekipmanlarda, süper

iletken materyal yapımında geniş kullanımı mevcut olup radyoaktif izotopu ise tıbbi amaçlı kullanılabilir. Zirkonyum (Zr); bilgi teknolojilerinde, cam refrakterler ve TV/katot ışını tüplerinde, seramik, döküm sanayii ve aşındırma uygulamalarında, telsiz lambalarında, elektrodarda, döküm, çelik endüstrisi, eczacılıkta, yapı malzemelerinde, kimya sanayinde, sentetik kıymetli taş yapımında, seramik boyasında, optik camları parlatmada, tekstil sanayinde geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Zirkonyum aşınmaya dayanımı,

yüksek erime noktası ve az da olsa ağır nötronları absorbe etme kabiliyeti nedeniyle nükleer reaktör dizaynlarında aranılan bir materyal durumundadır. En büyük kullanım alanı kaplama maddesi olarak kullanıldığı soğutmalı reaktörlerdir. Kalay (Sn); kaplamacılıkta, çeşitli alaşımlar, lehim ve kimyasal madde yapımında, otomotiv, uçak ve gemi endüstrisinde, elektronik, elektrik, kimya, cam sanayinde gibi geniş bir kullanım alanı vardır. Antimon (Sb) ise metalik ve metalik dışı alaşım şeklinde akümülatör, askeri amaçlı malzemeler imalinde, intermetalik alaşım imalatında, lastik endüstrisinde, cephaneye imalatında, metal kaplamada, seramik ve emayede, boya sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Toryum (Th) ise nükleer reaktörlerde elektrik enerjisi elde etmek için geleceğin temiz nükleer yakıtı olarak Hindistan ve ABD gibi ülkelerin araştırmalarına konu olmaktadır (internet kaynağı 2, 3). Bu elementlerin tedarik zincirinin jeopolitik ve ekonomik nedenler ile fiyatlarının ve ulaşılabilirliğinin daimi olarak etkilendiği ve bir stabilite sunmadıkları, zaman içindeki fiyatlarının sürekli dalgalandığı görülmektedir (internet kaynağı 4). Bu anlamda orta vadede bu elementlerin stratejik element olarak karşımıza daha sık çıkacağı düşünülmektedir.

Y, Zr ve Th elementlerinin ana kaynakları alkaleen granitoidlerin pegmatitik zonları ile ilişkili olmakla birlikte işletilen cevherleşmelerin büyük kısmı plaser tipi oluşumlarıdır (Dostal, 2017). Sn alkali veya kıtasal anateksi granitlerinin yoğun hidrotermal aktiviteleri ile gözlemlenmektedir (Lehmann, 2021). Sb ise düşük sıcaklıklı hidrotermal prosesler ile sedimanter kökenli metamorfik kayalardan yıkanarak damarlar şeklinde gözlemlenmektedir (internet kaynağı 5).

Türkiye'nin jeolojik birlikleri içerisinde, Kazdağları masifi ve yakın çevresi sahip olduğu birçok farklı birim, morfoloji, yapısal unsurlar ve önemli element zenginleşmeleri açısından oldukça dikkat çekmektedir. Çalışma alanı Çanakkale ili Bayramiç ilçesinin doğu-güneydoğusunda, Evciler, Dağoba ve Toluklar köyleri civarında yer almakta olup 16 km<sup>2</sup>'lik bir alan kapsamaktadır. Çalışılan bölgenin şekillenmesinde Sakarya kıtası ile Torid platformunun Üst Kretase'de çarpışması ile başlayan süreç ve bu sürecin bir sonucu olan Kuzeybatı Anadolu volkanizması rol oynamaktadır. Çalışmanın konusu olan Hallaçlar Volkanitleri de bu sürecin ürünlerinden biridir.



Şekil 1. Ekonomik öneme sahip kritik hammadde kaynakları (internet kaynağı 1).

Kuzeybatı Anadolu'da ekonomik değeri belirlenmiş olan altın, gümüş, bakır, molibden, demir, volfram, manganez, kurşun ve çinko yataklarının varlığı bilinmekte ve işletilmektedir. Ercan vd. (1995), metalik madenler açısından zengin olan Çan volkanitlerinin aşırı yoğun bir şekilde hidrotermal alterasyona maruz kaldığını ve silişleşmiş zonlar içerisinde Au, Ag, Pb, Cu, As, Mo ve Hg zenginleşmeleri olduğunu belirtmiş olup bu yataklar uzun zamandır işletilmektedir. Ayrıca skarn tipi demir yatakları, hidrotermal ornatma yatakları, porfiri Cu-Mo yatakları, karbonatların ev sahipliği yaptığı Au yatakları, kalkalkali volkanitler ile ilişkili epitermal Au-Sb yatakları, ksenotermal Pb-Zn yatakları, makaslama zonlarında oluşan Pb-Zn-Ba yatakları bu araştırmalardan bazılarının örnekleridir (Yiğit 2006, Özpinar *et al.* 2012, Kuşçu *et al.* 2019).

Bu çalışmada ise bölgede yer alan Hallaçlar Volkanitleri'nin jeolojik, mineralojik-petrografik ve jeokimyasal özellikleri belirlenerek Y, Zr, Th, Sn ve Sb gibi stratejik öneme sahip element içeriklerinin ortaya konması amaçlanmıştır. Böylece potansiyel bölgelerin belirlenmesine katkı sağlanacak olup bu kaynakların ileri teknolojide stratejik hammadde kaynağı açısından değerlendirmesinde yol gösterici olacağı ve dünyada önemi giderek artan bu elementlere dair çalışmalara değerli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışma alanından derlenen 10 adet örnek üzerinde jeokimyasal analizler gerçekleştirilmiş olup seçilen örnekler üzerinde de mineralojik ve petrografik analizler gerçekleştirilmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ/JAL) Jeokimya Araştırma Laboratuvarları'nda agat havanlı öğütme cihazı kullanılarak öğütülen tozlar üzerinde tüm kaya (majör ve iz elementler) analizleri yapılmıştır. SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, TiO<sub>2</sub> ve P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dahil olmak üzere majör elementlerin oksitleri, dalga boyu aralığı 0,01 ila 12 nm ve analiz hata payı genellikle %5'olan Bruker S8 Tiger X-ışını floresan (XRF) spektrometresi analiz cihazı ile belirlenmiştir. İz element analizleri için Perkin Elmer Elan DRC-e İndüktif Eşleşmiş Plazma-Kütle Spektroskopisi (ICP-

MS) cihazı kullanılmıştır. Yaklaşık 50 mg toz numune kullanılan iki aşamalı bir çözündürme işlemi uygulanmıştır; (1) 6 mL %37 HCl, 2 mL %65 HNO<sub>3</sub> ve 1 mL %38-40 HF asit karışımı, (2) 6 mL %5 borik asit solüsyonu kullanılarak 135°C'de basınç ve sıcaklık kontrollü Berghoff marka mikrodalga fırında çözündürme işlemi yapılmıştır. Bu analiz için hata payı %2'dir. Mineral parajenezi, mineral ilişkileri, dokusal özellikler vb. özelliklerin saptanması amacıyla örneklerden elde edilen kesitler Leica DM4500P birleşik mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

## 3. Jeoloji

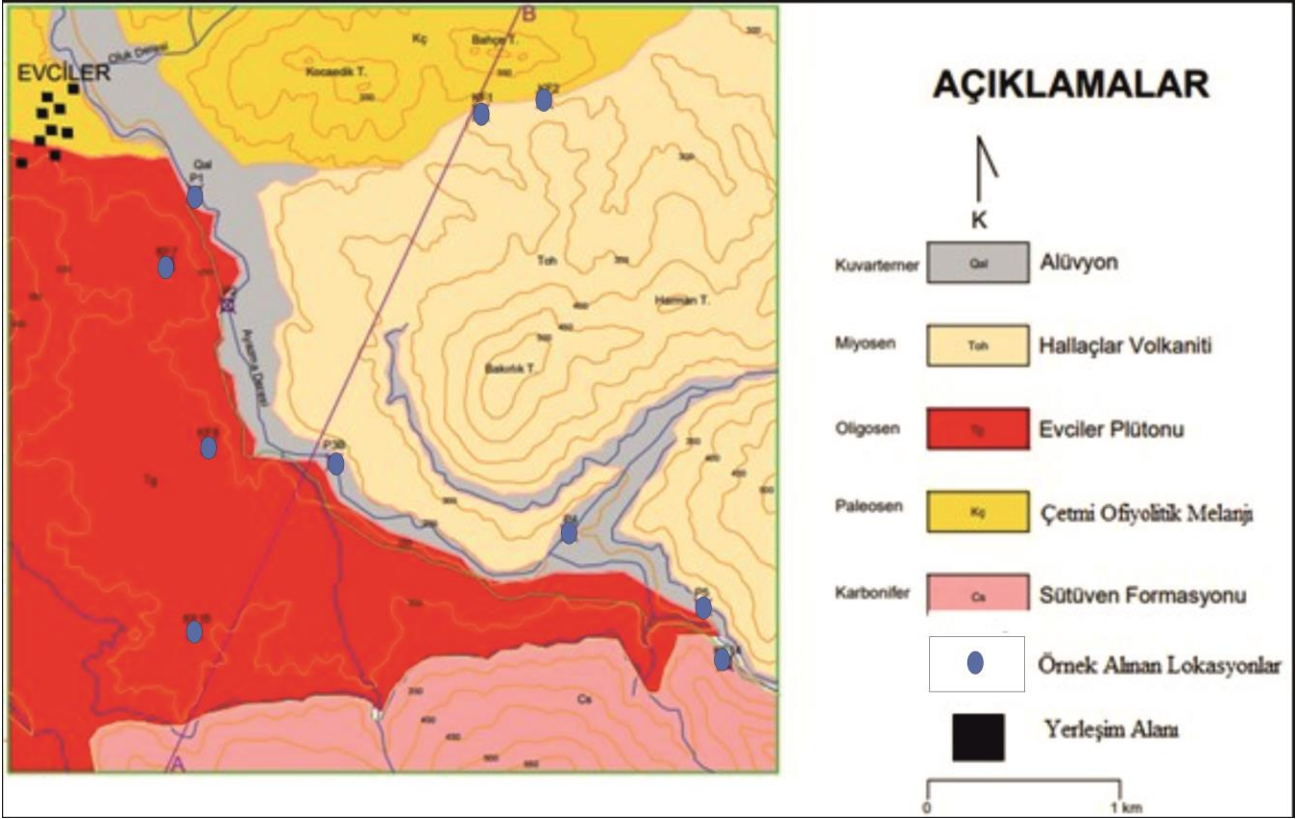
Geç Kretase - Erken Senozoyik döneminde Pontid volkanik yayı ile Anatolid-Torid bloğunun çarpışmasından sonra, Batı Anadolu'da Oligosen-Miyosen periyodunda yaygın bir magmatizma ve Erken Miyosen döneminde büyük ölçekli bir volkanizma meydana gelmiştir (Ercan 1979, Bingöl *et al.* 1982, Innocenti *et al.* 1982, Ercan vd. 1998). Bu magmatizmanın ürünleri B-KB Anadolu'da yoğun olarak görülebilmektedir. Bu çarpışmanın sonucunda I-tipi metaalumina karakterli magmatik kayalar daha yaşlı kayaç topluluklarının içerisine yerleşmişlerdir. Genellikle Eosen ve Oligo-Miyosen yaşlı Batı Anadolu'da kabuğun incelmeye sonrasında yerleşmiş sığ granitoidler suture zonunun kuzeyinde bulunmakla birlikte genellikle I-tipi, yüksek potasyumlu kalkalkalen karakter sunmaktadırlar (Savaşçın ve Güleç 1990, Harris *et al.* 1994, Genç 1998, Karacık and Yılmaz 1998, Yılmaz *et al.* 2001). Çalışma alanındaki birimlerden biri olan Hallaçlar Volkanitleri bu magmatik evrenin ekstrüzyon birliği olarak düşünülebilir.

Bölgede temel kayaç, Karbonifer yaşlı kuvarsofeldispatik gnayslar ve mermerlerden oluşan Sütüven formasyonudur. Üst Kretase yaşlı Çetmi Ofiyolitik Melanj, Sütüven formasyonunu tektonik olarak üzerlemektedir. Evciler Plütunu ile eş yaşlı Hallaçlar Volkanitleri bölgedeki Oligo-Miyosen magmatizmasının temsilcileridir (Şekil 3). Oligo-Miyosen magmatizmasından sonra çökelen Miyosen yaşlı volkano-sedimanter birimler ve Kuvaterner yaşlı alüvyonlar ise örtü birimlerini teşkil



etmektedir. (Okay *et al.* 1991, Şekil 2-4). Erken Miyosen'de başlayan geniş yayımlı volkanizma süreci Üst Miyosen-Pliyosen'e kadar aralıklarla devam etmiş, bu etkin volkanizma sürecinin

ardından gösel volkano-sedimanter kayalar çökelmiştir. Kuvaterner alüvyon ise tüm birimleri uyumsuz olarak örtmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanına ait jeolojik harita

Hallaçlar Volkanitleri'ne ait lav akıntıları, gri, yeşilimsi, kırmızımsı kahve tonlarında andezit ve dasit şeklinde bulunmaktadır. Bölgede sıklıkla görülen bu lav akıntıları ortaç bileşimli olup masif kütleler halindedir ve bazı alanlarda bu lav akıntıları üzerinde bol miktarda eklem ve çatlak sistemleri gelişmiştir.



Şekil 3. Çalışma alanında yer alan a) Hallaçlar Volkaniti b) Evciler Plütonu'na ait arazi görüntüleri.

Siyako vd. (1989), Bayramiç'in kuzeyinde kalan Çan bölgesi ve Edremit Körfezi civarındaki Oligo-Miyosen volkanizmasının yüzleklerini Ezine Volkaniti olarak

tanımlamışlardır. Bu volkanitlerde genellikle dasit-andezit içerikli lavların varlığı ve riyoit içerikli tüfleri içeren piroklastik fasiyeslerin varlığı gözlemlenmektedir (Arık *et al.* 2010, Arık ve Aydın 2011).

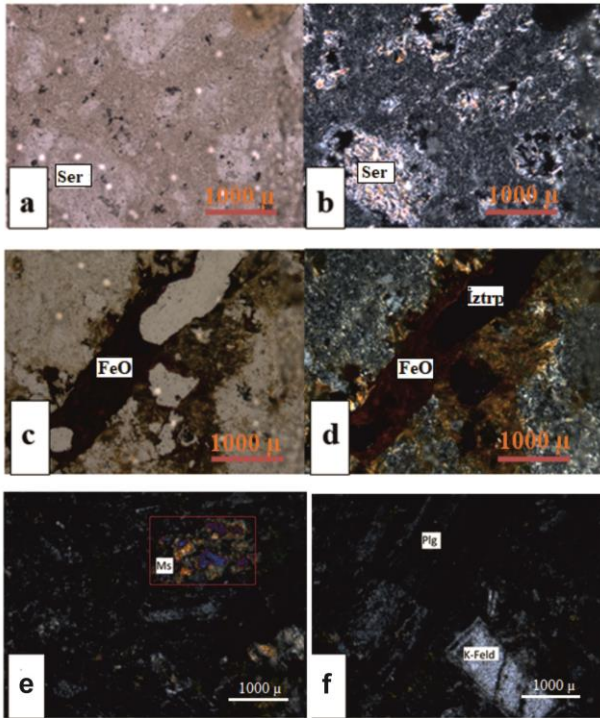
ZAMAN	SİSTEM	SERİ	FORMASYON	LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR
SENOZÖİK	Kuvaterner				Alüvyon: Çakıl, kum, silt, kil
	Miyosen	Alt	HALLAÇLAR VOLKANİTİ		Andezit, bazaltik-andezit lav ve piroklastikler
			EVCİLER PLÜTONU		Granadyorit, mozodiorit, kuvarsdyorit
	Oligosen				Uyumsuzluk
Paleosen			ÇETMİ OFİYOLİTİK MELANJİ		Grovak, fillat, ekojit, spilitik bazalt, radyolarit, kireçtaşı
MESOZÖİK	Karbonifer		SÜTÜVEN FM (Kazdağ Metamorfiti)		Tektonik Dokanak
					Granitik Gnays
					Amfibolit mercikleri ve migmatit

Şekil 4. Çalışma alanına ait stratigrafik kolon kesit.

#### 4. Tartışma ve Sonuçlar

##### 4.1 Mineralojik ve Petrografik İncelemeler

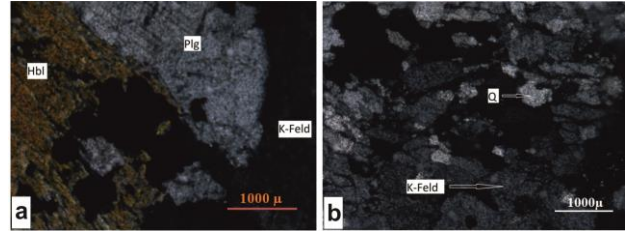
Hallaçlar Volkanitleri'ne ait örnekler polarizan mikroskop altında incelendiğinde, hidrotermal alterasyon sonucu K-feldispat minerallerinin serisitleştiği gözlemlenmektedir (Şekil 5 a-b). Ayrıca ferromagnezyen minerallerin ayrışması sonucu gelişen demiroksitlerin yanı sıra matrikste nispeten az miktarda opak mineraller de görülmektedir (Şekil 5 c-d).



Şekil 5. Hallaçlar Volkaniti'ne ait örneklerin ince kesit görüntüleri (a,b): serisit (Ser), (c): demir oksit (FeO), (d): demir oksit (FeO) ve izotrop mineral (İztrp), (e): muskovit (Ms), (f): Plajiyoklas (Plg) ve potasyum feldspat (K-feld).

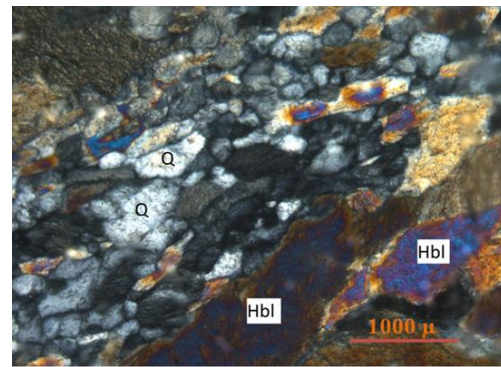
Hallaçlar volkanitlerini etkileyen hidrotermal çözeltilerin çalışma alanındaki temel kayaları teşkil eden metamorfite ve granitik kayaları da etkilemiş olabileceği göz önüne alınarak petrografik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında bulunan Evciler Plütunu'na ait örneklerin ince kesit görüntüleri incelendiğinde, belirgin olarak plajiyoklas, amfibol ve alkali feldispatların yanı sıra opak minerallerin varlığı görülmektedir (Şekil 6). Granüler dokulu olan örnekte plajiyoklaslar, alkali feldispatlara nispeten daha az olup monzodiyorite daha yakın bir içeriğe sahip olduğuna işaret etmektedir (Şekil 6a).

Evciler Plütunu'na ait bir diğer örnek incelendiğinde, alkali feldispatlar ve nispeten daha küçük olan kuvarsların fazlalığı ve sahip olduğu porfiri dokusu sebebiyle magmatik kütlelerin dış kesimlerinden olduğu düşünülmektedir (Şekil 6b). Ayrıca incelenen örnekte belirgin bir yönelme mevcuttur. Kuvarslarda kataklastik dokuların gözlemlenmesi, örneğin tektonizmanın etkin olduğu bir zondan alındığına işaret etmektedir (Şekil 6b).



Şekil 6. Evciler Plütunu'na ait örneklerin ince kesit görünümü (a, b) (Hbl: Amfibol, Plg: Plajiyoklas, K-Feld: Potasyum Feldispat).

Çalışma alanında volkanik ve plütönik kayalar dışında metamorfik kayalar da gözlemlenmiştir. Sütüven formasyonuna ait amfibollü gnays örneğinde yapılan incelemede, metamorfizma etkisi ile yönelmiş kuvars ve amfiboller görülmektedir (Şekil 7). Hallaçlar volkanitlerinde gözlemlenen hidrotermal alterasyonlar, Sütüven formasyonu ve Evciler Plütonu kayalarında gözlemlenmemektedir.



Şekil 7. Sütüven formasyonu içinde yönelmiş kuvars (Q) ve amfiboller (Hbl).

##### 4.2 Jeokimyasal İncelemeler

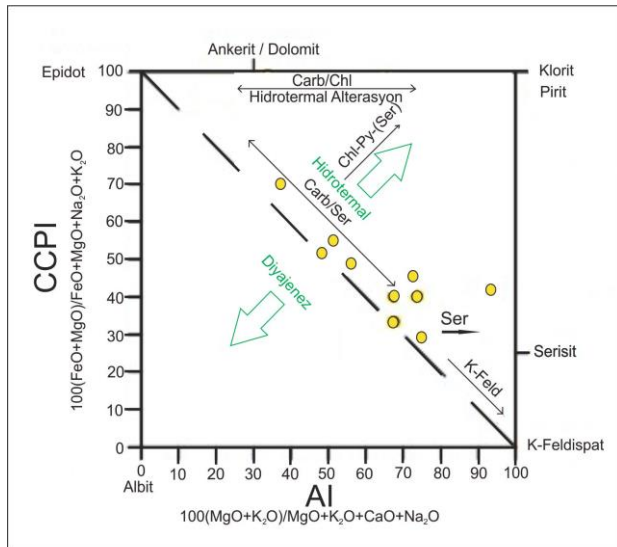
###### 4.2.1 Major Oksit Element Jeokimyası

Hallaçlar Volkanitleri'ne ait kayalardan alınan major oksit element analiz sonuçları Çizelge 1'de

verilmiştir. Buna göre oluşturulan Alterasyon indeksi'ne (AI) karşılık Klorit-Karbonat-Pirit indeksi (CCPI) diyagramında (Large *et al.* 2001) örneklerin konumuna bakıldığında, hidrotermal alterasyon varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum örneklerin ince kesit incelemeleri sonucu ile de desteklenmektedir. Ayrıca Hallaçlar Volkanitleri'nde karbonatlaşma ve serisitleşme görülmekte olup karbonatlı ve alkali çözeltilerin daha etkin olduğu söylenebilmektedir (Şekil 7).

**Çizelge 1.** Hallaçlar Volkanitleri'ne ait örneklerin temsili majör oksit element analiz sonuçları (% wt.).

Element	Minimum	Maksimum	Ortalama
SiO <sub>2</sub>	58.7	60.4	59.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.5	21.6	20.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	4.48	4.31
MgO	0.91	1.12	1.02
CaO	0.30	8.02	6.20
Na <sub>2</sub> O	0.25	2.23	2.01
K <sub>2</sub> O	2.90	6.90	5.80
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.88	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.21	0.18
MnO	0.02	12.0	0.17
LOI	2.47	3.53	3.70
TOTAL	99.13	99.52	99.45



**Şekil 7.** Hallaçlar Volkanitleri'ne ait örneklerin hidrotermal alterasyon ayırım diyagramı (Large *et al.* 2001).

#### 4.2.2 İz Element Jeokimyası

Çalışılan örneklerin iz element analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Hallaçlar Volkanitleri'ne ait örneklerde Y, Zr, Th, Sn ve Sb elementlerinin yüksek anomali sunduğu dikkat çekmektedir (Çizelge 2). Bu zenginleşmenin Hallaçlar Volkanitleri'ne bağlı olarak gelişen hidrotermal alterasyon sırasında, metamorfik kayalar ve üzerinde bulunan ofiyolitik melanj dokanağında zayıf zonlarda gelişmiş olabileceği düşünülmektedir.

**Çizelge 2.** Hallaçlar Volkanitleri'ne ait örneklerin temsili iz element analiz sonuçları (ppm).

Element	Minimum	Maksimum	Ortalama
Rb	35	223	184
Ba	421	849	645
Sr	378	1943	1125
Pb	446	1708	898
Zr	466	<b>2716</b>	1712
Y	38	<b>1910</b>	877
Nb	19	<b>630</b>	193
Sc	4	8	5.7
Ni	93	630	222
Co	0	12	6
V	29	201	62
Zn	14	93	37
Cu	1	249	110
La	13	51	37
Ce	65	104	78
Mo	0	10	3
Sn	3	<b>819</b>	115
Sb	18	<b>6800</b>	218
Th	17	<b>1281</b>	274

## 5. Ekonomik Jeoloji

### 5.1. Bölgedeki Hidrotermal Cevherleşmeler

Çalışma alanını içine alan Evciler bölgesi civarında mevcut olan skarn tipi Cu ve Fe cevherleşmeleri ve önceden açılmış galeriler ile maden pasalarının mevcudu, bölgenin geçmişte de madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğünü göstermektedir. Bakırlı Tepe bölgesinde, henüz girişi kapanmamış eski bir galeri mevcut olup Cu cevheri pasaları gözlemlenmiştir. Bölgedeki Dağoba köyünün

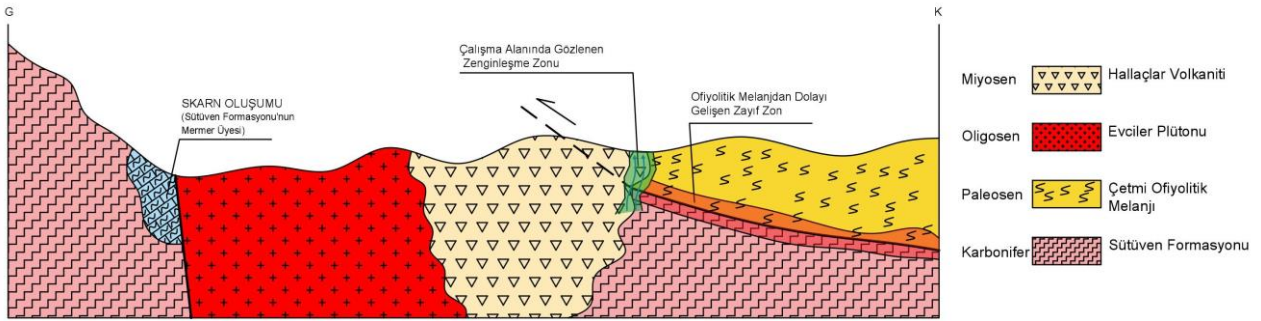


güneyinde kalan Harman tepesinde olan galerinin ise Fe için açıldığını düşündüren emareler vardır. Cu ve Fe dışında Pb ve Zn zuhurları da açılan bazı yarmalarla incelenmiştir (Doğgun 2010).

## 5.2. Cevherleşme Modeli

Çalışma alanında Hallaçlar Volkanitleri'ne bağlı gelişen hidrotermal alterasyon sırasında, metamorfik kayalar ve üzerinde bulunan ofiyolitik melanj dokanağındaki zayıf zonlarda cevher zenginleşmelerinin olabileceği düşünülmektedir. Çalışılan örneklerde Y, Zr, Th, Sn ve Sb elementleri yüksek anomali sunmuş ve bunun üzerine cevherleşmenin jeolojik sınıflaması yapılmaya çalışılmıştır. Önceki çalışmalarda da bahsedildiği üzere Hallaçlar Volkanitleri yüksek oranda hidrotermal alterasyona uğramış zonlar içermektedir (Ercan vd. 1995). Çetmi Ofiyolitik Melanjı'nın Kazdağı metaforfiklerini tektonik olarak

üzerlediği bölgelerde, bindirme cephesi boyunca süreksizlik takımlarının hem metamorfik hem de melanj içerisinde gelişmesi kuvvetle muhtemeldir. Oligo-Miyosen dönemde genişlemeli rejim ile bağlantılı olarak yerleşen magmatik kütlelerin hem hidrotermal çözeltilerin hem de ısı kaynağı olarak bölgeyi etkilemesi beklenen bir sonuçtur (Şekil 8). Jüvenil çözeltilerin farklı litolojik birimlerde ve miktarlarda meteorik çözeltilerle karışarak ve farklı elementleri yeniden hareketlendirerek, süreksizlik düzlemlerinde cevherleşmelere neden olabileceği beklenmektedir. Prenliçat bölgesinde allanit açısından zengin ortognaysların varlığı bilinmektedir (Gözler 1986). Yüksek sıcaklıkta (300°C-400°C) gelişmesi muhtemel Sn anomalisi (Campbell and Panter 1990) ve düşük sıcaklıkta (150°C-200°C) gelişmesi olası Sb (Bailly *et al.* 2000) anomalileri hidrotermal aktivitenin çok fazlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Hallaçlar Volkanitleri'nde görülen cevherleşmelerin oluşum mekanizmasının en kesit modeli

## 6. Tartışma ve Sonuç

Yapılan arazi çalışması ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ışığında aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- Hallaçlar Volkanitleri'nde hidrotermal aktiviteye bağlı olarak K, Rb, Ba, Y, Zr, Th gibi uyumsuz elementlerin yanı sıra Sn ve Sb elementlerinin zenginleştiği görülmüştür. Bu elementlerin ise farklı kökenli yüksek dereceli metamorfik kayaç topluluklarından yıkanarak Hallaçlar Volkanitleri içerisinde zenginleştiği düşünülmektedir.
- Jeokimyasal olarak farklı karakteristikler sunan elementlerin volkanitler içerisinde zenginleşmiş olmaları bölgedeki

hidrotermal aktivitenin çok fazlı ve değişken Eh-Ph koşullarına sahip olarak geliştiğine işaret etmektedir.

- Bunun yanı sıra Hallaçlar Volkanitleri'nde karbonatlaşma ve serisitleşmenin varlığı karbonatlı ve alkali çözeltilerin daha etkin olduğunu göstermektedir.
- Ayrıca cevherleşmenin ofiyolitik melanj ve Hallaçlar volkanitlerinin dokanağına yakın bölgelerde gelişmesi, hidrotermal çözeltilerin rahatlıkla hareket edebileceği tektonik kaynaklı deformasyon yapıları ve süreksizlik takımları ile düzlemlerinin geliştiğine işaret etmektedir.

## Teşekkür

Yazarlar bu çalışma sırasında jeokimyasal analizler sırasındaki çabaları dolayısıyla İstanbul Teknik Üniversitesi Jeokimya Araştırma Laboratuvarı (ITU-JAL) ekibine ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi editörlerine ve bilimsel olarak makalenin gelişmesini sağlayan hakemlere teşekkür eder.

## 7. Kaynaklar

- Arık, F. and Aydın, Ü., 2011. Geochemical features of the Aladag Fe-Cu-Zn-Pb skarn deposit (Ezine/Canakkale-North West Turkey). *Goldschmidt 2011 Conference*, 14-19 August 2011, Prague, Mineralogical Magazine, 452.
- Arık, F., Aydın, Ü. and Bozkır Özen, Y., 2010. Geological Features and Ore Deposits of Aladag (Ezine/Canakkale). International Symposium on Geology of Natural Systems – Geo Iaşi 2010 Alexandru Ioan Cuza University of Iaşi, Romania Dept of Geology, 1 - 4 September 2010, Iaşi, Romania, *Proceedings*, 187-188.
- Bailly, L., Bouchot, V., Bény, C., Milési, J.P. 2000. Fluid inclusion study of stibnite using infrared microscopy: An example from the Brouzils antimony deposit (Vendee, Armorican massif, France). *Economic Geology*, **95(1)**, 221-226.
- Bingöl, E., Delaloye, M. and Ataman, G., 1982. Granitic intrusions in Western Anatolia: A contribution of the geodynamic study of this area. *Eclogae Geologicae Helvetica*, **75**, 437-446.
- Campbell, A.R. and Panter, K.S. 1990. Comparison of fluid inclusions in coexisting (cogenetic?) wolframite, cassiterite, and quartz from St. Michael's Mount and Cligga Head, Cornwall, England. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54(3)**, 673-681.
- Dostal, J. 2017. Rare earth element deposits of alkaline igneous rocks. *Resources*, **6(3)**, 34.
- Doygun, Z., 2010. Evciler (Çanakkale-Bayramiç)- Tepeoba (Balıkesir-Havran) sahalarının jeolojik, minerolojik ve petrografik olarak incelenmesi ve cevherleşme açısından değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 129.
- Ercan, T., 1979. Batı Anadolu, Trakya ve Ege adalarındaki Senozoyik volkanizması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, **9**, 23-46.
- Ercan, E., Satır, M., Steinitz, G., Dora, A., Sarıfakıoğlu, E., Adis, C., Walter, H-J. ve Yıldırım, T., 1995. Biga Yarımadası ile Gökçeada, Bozcaada ve Tavşan adalarındaki (KB Anadolu) Tersiyer volkanizmasının özellikleri, *MTA Dergisi*, **117**, 55-86.
- Ercan, T., Türkecan, A., Guillou, H., Satır, M., Sevin, D. ve Şaroğlu, F., 1998. Marmara Denizi çevresindeki Tersiyer volkanizmasının özellikleri. *MTA Dergisi*, **120**, 199-221.
- Genç, Ş.C., 1998. Evolution of the Bayramiç magmatic complex, northwestern Anatolia. *Journal of volcanology and geothermal research*, **85(1-4)**, 233-249.
- Harris, N.B., Kelley, S. and Okay, A.I., 1994. Post-collision magmatism and tectonics in northwest Anatolia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **117(3)**, 241-252.
- Innocenti, F., Mazzuoli, R., Pasquare, G., Radicati di Brozolo, F. and Villari, L., 1982. Tertiary and quaternary volcanism of the Erzurumkars area (Eastern Turkey): Geochronological data and geodynamic evolution. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **13(3)**, 223-240.
- Karacık, Z. and Yılmaz, Y., 1998. Geology of the ignimbrites and the associated volcano-plutonic complex of the Ezine area, northwestern Anatolia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **85(1-4)**, 251-264.
- Kuşcu, İ., Tosdal, R.M. and Gençlioğlu-Kuşcu, G., 2019. Porphyry-Cu Deposits of Turkey. In Mineral Resources of Turkey. *Springer, Cham*, 337-425.
- Large, R.R., Gemmell, J.B., Paulick, H. and Huston, D.L. 2001. The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, **96(5)**, 957-971.
- Lehmann, B. 2021. Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, **402**, 105756.
- Okay, A., Siyako, M. and Burkan, K.A., 1991. Geology and tectonic evolution of the Biga Peninsula, northwest Turkey. *Bulletin-Technical University of Istanbul*, **44**.
- Özpınar, Y., Kılıç, M., Avşar, M., Sarı, R., Küçükefe, Ş., Agnerian, H., Doygun, Z., Yenigün, K., 2012. A new assessment of the Kısacık gold mineralization (Ayvacık-Çanakkale; NW Anatolia). *Roman J Earth Sci*, **86(2)**, 111-116

Savaşın, M.Y. and Güleç, N., 1990. Relationship between magmatic and tectonic activities in western Turkey. *International Earth Science Colloquium on the Aegean Region (IESCA) Proceedings*, 300-313.

Siyako, M., Bürkan, K.A. and Okay, A.İ., 1989. Biga ve Gelibolu yarımadalarının Tersiyer jeolojisi ve hidrokarbon olanakları. *TPJD Bülteni*, **1(3)**, 183-199.

Yılmaz, Y., Genç, Ş.C., Karacık, Z. and Altunkaynak, Ş., 2001. Two contrasting magmatic associations of NW Anatolia and their tectonic significance. *Journal of Geodynamics*, **31(3)**, 243-271.

Yigit, O., 2006. Gold in Turkey—a missing link in Tethyan metallogeny. *Ore Geology Reviews*, **28(2)**, 147-179.

### **İnternet Kaynakları**

1-<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>, (08.04.2022)

2-<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information>, (25.05.2022)

3-<https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-kullanım-alanları>, (16.08.2022)

4-<https://tradingeconomics.com/commodity>, (16.08.2022)

5-<https://pubs.usgs.gov/pp/1802/c/pp1802c.pdf>, (25.05.2022)

# Modeling the Throughput of Horizontal Shaft Impact Crushers Using Regression Analyses, Artificial Neural Networks and Multivariate Adaptive Regression Spline

Ekin KÖKEN

Abdullah Gul University, Engineering Faculty, Nanotechnology Engineering Department, Kayseri – Turkey

E-mail: ekin.koken@agu.edu.tr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0178-329X>

Geliş Tarihi: 14.05.2022

Kabul Tarihi: 24.10.2022

## Abstract

In this study, the throughput (Q) of horizontal shaft impact (HSI) crushers was investigated using regression analyses, artificial neural networks (ANN) and multivariate adaptive regression spline (MARS). For this purpose, 32 different HSI-type crushers, which operated in the secondary crushing processes of various rock quarries in Turkey, were considered. Various quantitative data (i.e., rotor width ( $R_w$ ), rotor diameter ( $R_d$ ), rotor speed ( $V_r$ ), characterized feed size ( $d_{80}$ ), operating energy ( $O_e$ ), and Los Angeles abrasion value (LAAV) of the crushed stone) were collected from each crushing-screening plant. Linear and nonlinear regression analyses were first conducted using the above-mentioned collected data. Then, different ANN and MARS analyses were carried out to estimate the Q of these crushers. As a result, strong predictive models were developed to estimate the Q of HSI-type crushers. The correlation of determination ( $R^2$ ) of the proposed models (M6–M10) ranged from 0.91 to 0.98, indicating the relative success of the established models. Therefore, the proposed models can reliably be used to estimate the Q of investigated HSI-type crushers. Nevertheless, the number of case studies should be increased to investigate other factors affecting the Q of HSI-type crushers.

## Keywords

Horizontal shaft impact crusher;  
Crushed stone;  
Rock quarry;  
Regression analysis;  
Artificial neural networks

## Yatay Milli Kırıcılarda Kırma Kapasitesinin Regresyon, Yapay Sinir Ağları ve Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Analizi Kullanılarak Modellenmesi

## Öz

Bu çalışmada, yatay milli darbeli kırıcıların (HSI) kırma kapasitesinin (Q), regresyon analizleri, yapay sinir ağları (ANN) ve çok değişkenli uyarlamalı regresyon analizi (MARS) kullanılarak araştırılmıştır. Bu amaçla, Türkiye'deki çeşitli taş ocaklarında ikincil kırma işlemlerinde kullanılan 32 farklı HSI tipi kırıcı ele alınmıştır. Çeşitli sayısal veriler (rotor genişliği ( $R_w$ ), rotor çapı ( $R_d$ ), rotor hızı ( $V_r$ ), karakterize edilen besleme boyutu ( $d_{80}$ ), çalışma enerjisi ( $O_e$ ) ve kırmataşın Los Angeles aşınma değeri (LAAV)) her bir kırma–eleme tesisinden elde edilmiştir. Öncelikle, toplanan veriler kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise, bu kırıcıların Q değerini tahmin etmek için farklı ANN ve MARS analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, kırıcıların Q değerini tahmin etmek için güçlü tahmin modelleri geliştirilmiştir. Önerilen modellerin (M6–M10) belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0.91 ile 0.98 arasında değişmekte olup, söz konusu yüksek  $R^2$  değerleri geliştirilen modellerin göreceli başarısını göstermektedir. Bu nedenle, önerilen modeller, araştırılan HSI tipi kırıcıların Q değerini tahmin etmek için güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Bununla birlikte, HSI tipi kırıcıların Q değerini etkileyen diğer faktörleri araştırmak için örnek çalışmalarının sayısı artırılmalıdır.

## Anahtar kelimeler

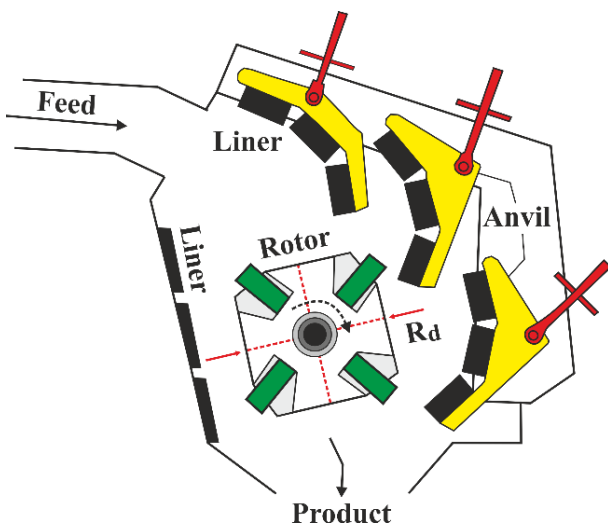
Yatay milli kırıcı;  
Kırmataş;  
Taş ocağı;  
Regresyon analizi;  
Yapay sinir ağları



## 1. Introduction

In crushing–screening plants, rock comminution starts with breaking down huge rock blocks, where jaw crushers and gyratories are mainly used in primary crushing processes. For secondary and tertiary crushing operations, cone, vertical shaft impact (VSI), and horizontal shaft impact (HSI) crushers are mostly preferred with several combinations. In this way, sustainable rock aggregate manufacturing can be achieved based on modern rock aggregate science and technology. Compared with jaw and gyratory crushers, VSI and HSI type crushers can achieve a higher production yield. It should be herein mentioned that since HSI and VSI type crushers wear out more quickly, they can only be used on medium or weak rocks (Duthoit, 2000).

When it comes to the operating mechanism of impact crushers, they use impact forces to break down materials in the crushing chamber. For HSI type crushers, feeding materials enter down an inclined chute on one side of the crusher. The rotor throws feeding material to the anvils endowed with wear liners. In this way, they are broken down and discharged from the crushing medium by gravity (Sinnott and Cleary 2015, Köken and Jili 2020). A typical cross-section of an HSI type crusher is illustrated in Fig 1.



**Figure 1.** Typical cross-section of an HSI type crusher (Rd: Rotor diameter)

The rock-crusher interactions also play an essential role in assessing the rock comminution relative success. Therefore, each crushing–screening plant has its own specifications regarding the crushers and belt conveyors used in the system. In addition to this, the physical and mechanical rock properties such as dry density ( $\rho_d$ ), uniaxial compressive strength (UCS), and Brazilian tensile strength (BTS) influence the size reduction ratio (SRR) and specific energy consumption of the compressive crushers.

More profoundly, the UCS of rocks is an essential parameter to quantify the degree of rock crushability (DRC) in jaw crushing (Korman *et al.* 2015, Kahraman *et al.* 2018, Köken and Özarslan 2018). On the other hand, the BTS of rocks can also be a correlative parameter to evaluate the crushing energy consumption in cone crushing (Köken 2020). However, quite limited information has been documented on the performance of VSI and HSI type crushers as a function of different rock properties. Instead, the performance of these crushers has been mainly investigated using the discrete element method (DEM). Notably, the results of DEM methods can be used to estimate the particle size distribution (PSD) of the product and the specific energy consumption of these crushers (Djordjevic *et al.* 2003, Li *et al.* 2014, Sinnott and Cleary 2015, Grunditz 2015, Quist and Evertsson 2016, Barrios *et al.* 2020, Chen *et al.* 2020).

On the other hand, the throughput (Q) of crushers is another quantity that should be considered in terms of sustainability and engineering economics. In this manner, rock aggregate manufacturers want to know the Q at the end of each crushing–screening shift. For this purpose, the whole crushing–screening plant or a significant part of it can be modeled to observe the variations in Q as a function of different working conditions. This is the description of the problem on which the present study is focused. In this study, a total of 32 HSI-type crushers are used to observe how Q changes as a result of different working conditions. This is done to fill a gap in the relevant literature.

Regression analyses, artificial neural networks (ANN) and multivariate adaptive regression spline (MARS) are adopted as data analysis methods to evaluate the Q based on the collected data from several crushing – screening plants in Turkey. As a result of these analyses, several predictive models are developed to estimate the Q of HSI type crushers. The details and summary of the proposed predictive models are introduced in this study.

## 2. Materials and Methods

A total of 32 HSI-type crushers operating in various crushing–screening plants in Turkey were considered in this study. Different HSI type crushers have been used in these plants as secondary

crushing equipment. Some of the HSI type crushers considered in this study are given in Fig 2.

A similar methodology was followed when obtaining the quantitative data from each crushing–screening plant. More profoundly, quantitative data such as the rotor width ( $R_w$ ), rotor diameter ( $R_d$ ), rotor speed ( $V_r$ ), characterized feed size ( $d_{80}$ ), crusher’s operating energy ( $O_e$ ), and Los Angeles abrasion value (LAAV) of the crushed stone and the corresponding Q were collected from each crushing–screening plant. The determination of Q depends upon the calculation of crushed particles below 50 mm in this study. As a result, a comprehensive database was generated for regression, ANN and MARS analyses. Table 1 and Table 2 list the collected database and the statistics that describe it.



Figure 2. Several HSI type crushers considered in this study.

### 3. Data Analysis Methods

#### 3.1. Regression Analyses

In this study, the Q of HSI-type crushers was first investigated through regression analyses. Single, multiple, and nonlinear regression analyses were performed in this context. Before performing these analyses, the correlations between the independent variables ( $R_w$ ,  $R_d$ ,  $V_r$ ,  $d_{80}$ ,  $O_e$ , and LAAV) and the Q were revealed through Pearson’s correlation and Spearman rho analyses. The correlation analysis results are listed in Table 3. Accordingly, the  $R_w$  and  $R_d$  are moderately correlated with the Q. On the other hand, the  $O_e$  can be declared a highly correlative parameter to assess the Q.

The general form of single and multiple linear regression analyses is given in Eq 1. Nevertheless, a typical nonlinear regression model adopted in this study is described in Eq 2.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \dots a_nx_n \tag{1}$$

where y is the dependent variable,  $x_0$  to  $x_n$  are the independent variables used in the model, and  $a_0$  to  $a_n$  are the numerical constants to be calculated from the analyses.

$$y = a_0x_0^{t_0} x_1^{t_1} x_2^{t_2} \dots x_n^{t_n} \tag{2}$$

where y is the dependent variable,  $x_0$  to  $x_n$  are the independent variables used in the model, and  $t_0$  to  $t_n$  are the numerical exponential constants to be calculated from the analyses.

**Table 1.** Case studies considered in this study.

Case	$R_w$ (mm)	$R_d$ (mm)	$V_r$ (rpm)	$d_{80}$ (mm)	$O_e$ (kW)	LAAV (%)	Q (t/h)
1	670	1030	640	64	80	15	88
2	2000	1400	750	90	315	24	271
3	1340	1030	640	64	175	12	116
4	1340	1340	544	64	275	13	194
5	2000	1340	544	64	400	24	275
6	1330	1150	600	121	150	23	223
7	950	1005	695	63	145	35	202
8	1000	1100	650	79	175	25	163
9	1300	1200	550	86	225	18	189
10	1500	1300	550	86	300	21	233
11	860	1015	575	57	100	17	88
12	1370	1015	575	57	125	12	81
13	1400	1400	680	100	200	18	180
14	2135	1525	400	107	450	13	251
15	1500	1500	500	86	400	20	297
16	2000	1500	550	60	120	34	196
17	1600	1400	680	105	315	20	280
18	1000	1050	375	51	65	28	95
19	2000	1400	750	90	315	24	271
20	1000	1350	304	57	93	26	140
21	1200	1350	304	56	110	25	157
22	2120	1057	336	71	500	29	287
23	2000	1600	336	50	265	15	200

**Table 1.** (continued).

Case	R <sub>w</sub> (mm)	R <sub>d</sub> (mm)	V <sub>r</sub> (rpm)	d <sub>80</sub> (mm)	O <sub>e</sub> (kW)	LAAV (%)	Q (t/h)
24	1500	1300	720	100	250	18	173
25	1330	1150	555	50	220	26	218
26	1900	1390	420	50	330	26	245
27	1000	1030	640	64	125	15	106
28	1525	1295	550	86	300	18	201
29	1340	1030	580	76	225	20	160
30	1340	1340	610	81	325	18	233
31	950	1005	610	63	130	26	148
32	1600	1400	680	120	315	20	285

Explanations: R<sub>w</sub>: Rotor width, R<sub>d</sub>: Rotor diameter, V<sub>r</sub>: Rotor speed, d<sub>80</sub>: Characterized feed size, O<sub>e</sub>: Operating energy, LAAV: Los Angeles abrasion value of the crushed stone, Q: Cumulative throughput below 50 mm.

To activate the nonlinear models like Eq 2, the whole equation system should be linearized, an example of which is given by Eq 3. Eq 3 was then solved using the Cholesky Decomposition method to achieve the nonlinear model constants.

$$\ln(y) = \ln(a_0) + t_0 \ln(x_0) + t_1 \ln(x_1) + t_2 \ln(x_2) \dots t_n \ln(x_n) \tag{3}$$

**Table 2.** Descriptive statistics of the variables considered in this study.

Parameter	R <sub>w</sub> (mm)	R <sub>d</sub> (mm)	V <sub>r</sub> (rpm)	d <sub>80</sub> (mm)	O <sub>e</sub> (kW)	LAAV (%)	Q (t/h)
Min	670	1005	304	50	65	12	81
Mean	1440.6	1249.9	559.2	75.58	234.9	21.27	195.2
Max	2135	1600	750	121.43	500	35	297
Std. dev.	406.6	184.3	128.2	20.63	114.2	5.90	65.2
Q <sub>1</sub>	1050	1035	511	57.86	126.3	17.55	150.3
Q <sub>2</sub>	1355	1300	575	67.86	225	20.35	198
Q <sub>3</sub>	1825	1400	647.5	88.93	315	25.82	249.5
n	32	32	32	32	32	32	32

Explanations: Min: Minimum, Mean: Average, Max: Maximum, Std. dev.: Standard deviation, Q<sub>1</sub>: First quartile, Q<sub>2</sub>: Second quartile (Median), Q<sub>3</sub>: Third quartile.

**Table 3.** Correlation matrices for the evaluation of Q.

Correlation index	R <sub>w</sub>	R <sub>d</sub>	V <sub>r</sub>	d <sub>80</sub>	O <sub>e</sub>	LAAV
Pearson's correlation coefficient (r)	0.729	0.621	0.054	0.504	0.846	0.258
Spearman rho value, (ρ)	0.718	0.601	0.013	0.494	0.869	0.269

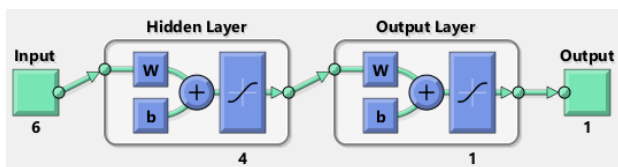
### 3.2. Artificial neural networks (ANN)

The artificial neural network (ANN) has been widely adopted to predict several dependent variables based on complex datasets. It is a well-accepted method in most mining engineering problems.

The ability of ANN is that complex datasets can be modeled by using such ANN methodologies (Mayorga and Arriaga, 2007). In practical ANN applications, neural networks have been trained using a feedforward backpropagation algorithm (Saravanan and Sasithra, 2014) to establish

empirical formulae based on the weights and biases extracted from neural network analyses. In this study, the neural network toolbox (nntool) was used to develop several neural networks in the MATLAB environment.

For this purpose, the database (Table 1) was randomly divided into training (70/100) and testing/validating (30/100) parts. Various ANN network architectures, hidden layers, and neurons were attempted to determine the most suitable and practical structural combination. After 592 neural network simulations, the ANN architecture adopted in this study is illustrated in Fig 3. In the context of the ANN simulations, input parameters were defined as  $R_w$ ,  $R_d$ ,  $V_r$ ,  $d_{80}$ ,  $O_e$ , and LAAV of the crushed stone. Four hidden layers combined the input parameters to the output (Q).



**Figure 3.** ANN architecture adopted in this study.

Before performing the ANN analyses, the database was normalized between  $-1$  and  $1$  using Eq 4. Then, the normalized database was loaded into the MATLAB environment to implement such ANN analyses. As a result, a robust predictive model was developed to estimate the Q of HSI-type crushers. The mathematical expressions of the developed model were revealed by adopting the deterministic approach previously described by Das (2013).

$$V_N = 2 \left( \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right) - 1 \quad (4)$$

where  $x_i$  is the relevant parameter to be normalised,  $x_{\min}$ , and  $x_{\max}$  are the minimum and maximum values in the database (Table 2).

### 3.3 Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS)

The MARS was firstly proposed by Friedman (1991) as a nonparametric regression method, which can be perceived as a hybrid linear model.

There are two important parts in typical MARS models. One is the forward pass and the other one is backward pass. In the forward pass, MARS models are initiated with constant terms, which are called basis functions (BFs). On the other hand, in the backward pass, the BFs are connected with linear regression models. In this study, a novel MARS model was introduced to estimate the Q of HSI type crushers as a function of previously mentioned independent variables. The dataset was divided into training and testing datasets like in the ANN analyses. The MARS analyses were performed using the software R and the details of the proposed MARS model was given in the following section.

## 4. Results and Discussion

Single and multiple linear regression analysis results are listed in Table 4. Accordingly, one can claim that single linear regression-based models (M1-M4) did not yield satisfactory prediction performances to estimate the Q of HSI type crushers. The correlation of determination ( $R^2$ ) values of these models ranged from 0.25 to 0.72. On the other hand, multiple linear regression analysis results provided more consistent results than the M1–M4 models. The  $R^2$  values of the multiple regression models (M5 and M6) were found to be between 0.88 and 0.92, respectively. Of these models, the M6 model can be declared the most feasible model in the context of multiple linear regression analyses. Herein, it should be mentioned that the independent variables of  $R_d$ ,  $d_{80}$ ,  $O_e$ , and LAAV can be reliably considered for the evaluation of Q. Nonlinear regression analysis results are also given in Table 5. It can be seen that two nonlinear models (M7 and M8) also provided consistent  $R^2$  values, ranging from 0.91 to 0.94. Moreover, in the models of M7 and M8, the above-mentioned independent variables ( $R_d$ ,  $d_{80}$ ,  $O_e$ , and LAAV) were also used effectively.

The independent variables of  $R_w$ ,  $R_d$ ,  $V_r$ , and LAAV of the crushed stone were also emphasized by Babele (2016) as some factors which should be considered to assess the performance of the HSI-type crushers. In addition to the regression analyses, the predictive models based on ANN and MARS are also given in

Table 6 and Table 7, respectively. The measured and predicted Q values obtained from the M6 – M10 models are plotted in Fig 4. Accordingly, the performance of these models is satisfactory, and the predicted and measured Q values are in good agreement. Therefore, these models (M6–M10) can

be reliably used to estimate the Q of HSI type crushers. Accordingly, the ANN model can be declared by far the most suitable model in this study. The R<sup>2</sup> for this model is 0.98, which indicates its relative success.

**Table 4.** Single and multiple regression analysis results.

Model No	Empirical formula	Coefficient	Standard error	t value	R <sup>2</sup>
M1	$Q = 26.7 + 0.1169R_w$	26.7	30.2	0.89	0.53
		0.1169	0.02	5.845	
M2	$Q = -79.2 + 0.2196R_d$	-79.2	64.01	-1.237	0.39
		0.2196	0.0507	4.331	
M3	$Q = -74.4 + 1.599d_{80}$	-74.4	39.0	-1.907	0.25
		1.599	0.498	3.210	
M4	$Q = 81.7 + 0.4832O_e$	81.7	14.5	5.634	0.72
		0.4832	0.0555	8.706	
M5	$Q = -98.1 + 0.0912R_d + 0.4272O_e + 3.711LAAV$	-98.1	33.9	-2.893	0.88
		0.0912	0.0268	3.402	
		0.4272	0.0433	9.866	
		3.711	0.727	5.104	
M6	$Q = -140.7 + 0.0789R_d + 0.774d_{80} + 0.3831O_e + 4.175LAAV$	-140.7	28.7	-4.902	0.92
		0.0789	0.0214	3.687	
		0.774	0.184	4.206	
		0.3831	0.0358	10.701	
		4.175	0.585	7.136	

**Table 5.** Nonlinear regression analysis results.

Model No	Empirical formula	Coefficient	Standard error	t value	R <sup>2</sup>
M7	$Q = 0.0295R_d^{0.665}O_e^{0.4832}LAAV^{0.474}$	0.0295	0.033	0.894	0.91
		0.665	0.150	4.433	
		0.4832	0.042	11.504	
		0.474	0.076	6.237	
M8	$Q = 0.0118R_d^{0.627}d_{80}^{0.266}O_e^{0.444}LAAV^{0.555}$	0.0118	0.0109	1.082	0.94
		0.627	0.121	5.181	
		0.266	0.062	4.290	
		0.444	0.035	12.685	
		0.555	0.065	8.538	

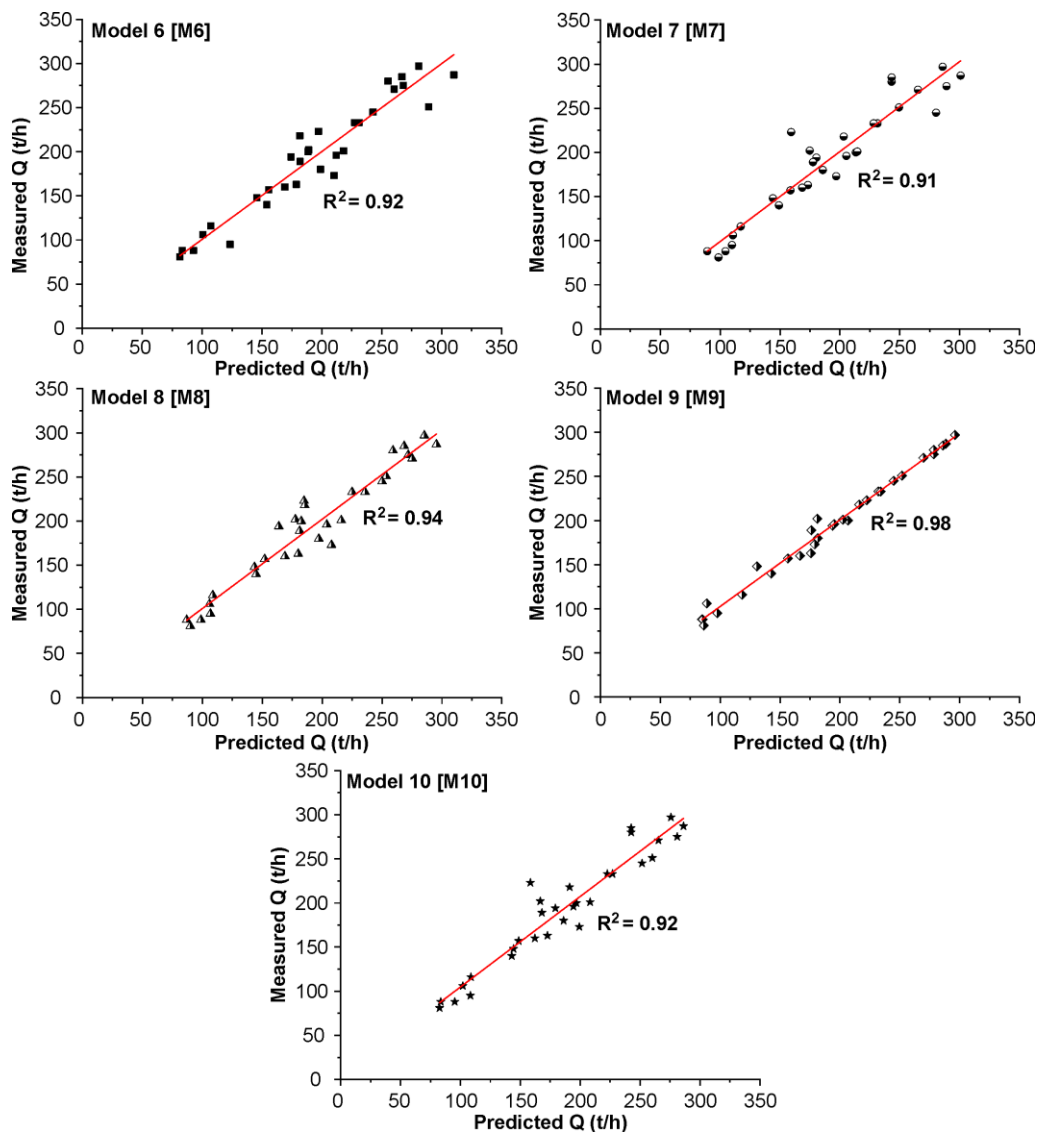


**Table 6.** Empirical formulae of the proposed ANN model

Model 9, M9	$Q = 105.84 \tanh\left(\sum_{i=1}^4 A_i - 0.13313\right) + 189.69, R^2 = 0.98$
	$A_1 = 0.76546 \tanh(2.1677^n R_w + 0.73011^n R_d - 1.1217^n V_r + 2.9732^n d_{80} + 1.8984^n O_e + 1.0837^n LAAV - 1.1457)$
	$A_2 = 1.1042 \tanh(-1.2294^n R_w - 2.1824^n R_d + 1.1466^n V_r + 0.56007^n d_{80} + 1.5385^n O_e + 0.47989^n LAAV + 1.6631)$
	$A_3 = -1.3492 \tanh(0.98166^n R_w - 1.9627^n R_d + 0.79974^n V_r + 0.53444^n d_{80} - 0.48799^n O_e - 0.9131^n LAAV + 0.29478)$
	$A_4 = -0.9252 \tanh(-0.95099^n R_w - 0.55787^n R_d - 0.25184^n V_r - 1.6566^n d_{80} - 3.9728^n O_e - 1.3035^n LAAV - 5.1534)$
<b>Normalization functions</b>	
	${}^n R_w = 0.0014 R_w - 1.9147 \quad {}^n R_d = 0.0034 R_d - 4.3782 \quad {}^n V_r = 0.0045 V_r - 2.3632$
	${}^n d_{80} = 0.0282 d_{80} - 2.4085 \quad {}^n O_e = 0.0046 O_e - 1.2989 \quad {}^n LAAV = 0.087 LAAV - 2.0435$

**Table 7.** Empirical formulae of the proposed MARS model

Model 10, M10	$Q = 40.0244 + 0.417655 BF1 + 3.82068 BF2 + 0.09705 BF3 + 0.07311 BF4, R^2 = 0.92$					
Basis functions (BFs)	BF1	$Max(0: O_e - 65)$	BF2	$Max(0: LAAV - 12)$	BF3	$Max(0: R_d - 1015)$
	BF4	$Max(0: V_r - 304)$				



**Figure 4.** Predicted and measured Q values for the proposed models.



The effectiveness of the parameters used in M6 – M10 models were also investigated through sensitivity analyses. In this study, the cosine amplitude method (CAM) was used to assess the sensitivity degree of each input parameter used in the M6 – M10 models.

Several researchers (Momeni *et al.* 2014, Faradonbeh and Monjezi 2017 and Hosseini *et al.* 2019) also adopted the CAM method to evaluate the sensitivity degree of each input parameter. The correlation degree ( $r_{ij}$ ) for the sensitivity analyses were calculated using Eq 5.

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n (y_i)^2}} \quad (5)$$

where  $x_i$  is the input parameter,  $y_i$  is the output parameter, and  $n$  is the number of datasets used in the analysis.

It is worth reminding that higher the value of  $r_{ij}$ , the greater is the effect of the relevant input parameter. Based on the sensitivity analysis results (Fig 5), it is clear to see that the  $r_{ij}$  of all parameters considered in this study was found to be greater than 0.90, showing their relative importance. However, it should be mentioned that the sensitivity analyses demonstrated that, when input parameters are changed, their effects are also changed for the models introduced in this study. For example, in the M6 model, the  $r_{ij}$  of  $R_d$  and  $O_e$  is 0.96, which shows their relative importance. On the other hand, in the model of M9, the  $r_{ij}$  of  $R_w$  is 0.98, showing the most important parameter of this model. To sum up, the  $R_d$ ,  $d_{80}$  and  $O_e$  were found to be the most important parameters for the evaluation of  $Q$ .

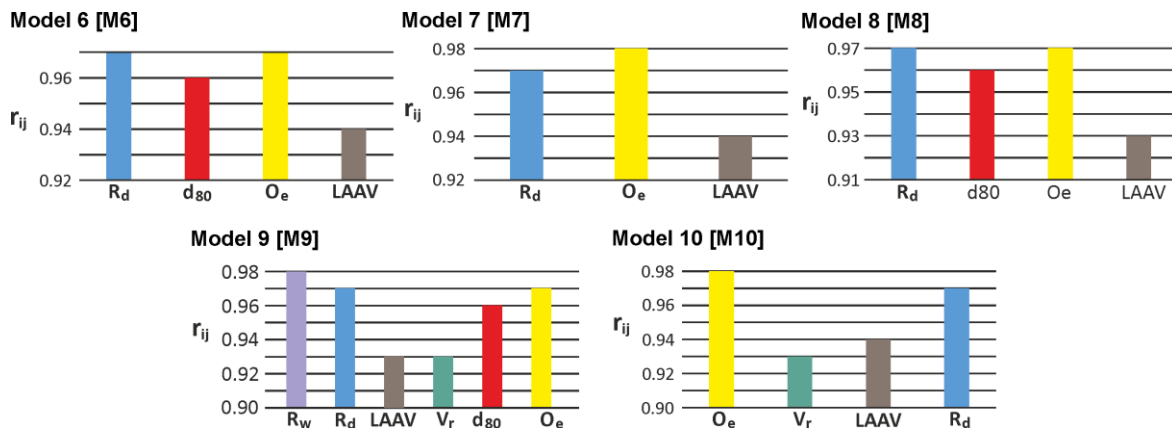


Figure 5. Sensitivity analysis results of the proposed models.

### 5. Conclusions

The present study introduces several predictive models to estimate the  $Q$  of HSI-type crushers from various crushing – screening plants in Turkey. For this purpose, a comprehensive database was generated based on the collected data (Table 1, 2). Regression, ANN and MARS analyses were carried out using the independent variables of  $R_w$ ,  $R_d$ ,  $V_r$ ,  $d_{80}$ ,  $O_e$ , and LAAV.

Regression analysis results indicated that the M6–M8 could be reliably used to estimate the  $Q$  of HSI type crushers. Nevertheless, M4 and M5 models can also be welcome for simple evaluations on the  $Q$ . In addition, the established proposed MARS model (Table 7) was found to present a lower performance than the models of M8 and M9. The ANN-based predictive model (M9) outperformed the other models established in this study. The mathematical formulae of the M9 model are also given to let users implement them more efficiently.

These formulations (Table 6) can be easily coded into any computational language that saves time and reliably estimates the Q of various HSI-type crushers. The sensitivity analyses also revealed the effectiveness of the input parameters used in the proposed models are changeable when the model architecture varies. From this perspective, the number of case studies should be increased to achieve generalized inferences on modeling the Q of various HSI-type crushers as a function of different operational conditions.

#### Acknowledgments

The author is indebted to the mining companies who shared their quantitative data to construct the database for soft computing analyses.

#### Conflict of interest

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

#### References

- Babele, V., 2016. A Review Study on the Proposed Model for a Multilevel Horizontal Shaft Impact Crusher. *International Journal of Engineering Technology and Applied Science*, **2(7)**, 7.
- Barrios, G.K., Jimenez-Herrera, N., Natalia, F.T., Tavares, L.M., 2020. DEM simulation of laboratory-scale jaw crushing of a gold-bearing ore using a particle replacement model. *Minerals*, **10(8)**, 717.
- Chen Z. Wang G. Xue D. and Bi Q., 2020. Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method. *Powder Technology*, **376**, 93 – 103.
- Das, S.K., 2013. Artificial neural networks in geotechnical engineering: modeling and application issues. *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering*, **5**, 231-267.
- Djordjevic, N., Shi, F.N., Morrison, R.D., 2003. Applying discrete element modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers. *Minerals Engineering*, **16**, 983–991.
- Duthoit, V. 2000 Crushing and grinding aggregates, Chapter. 9, (Ed. Louis Primel and Claud Tourenq). Balkema, Rotterdam.
- Faradonbeh, R.S., Monjezi, M. 2017. Prediction and minimization of blast-induced ground vibration using

two robust meta-heuristic algorithms. *Engineering with Computers*, **33**, 835–851.

- Friedman, J., H., 1991. Multivariate adaptive regression splines, *The Annals of Statistics*, **19(1)**, 1–67.
- Grunditz S., 2015. Modeling and optimization of a vertical shaft impactor for production of artificial sand, Master Thesis, Chalmers University of Technology, 54.
- Hosseini, S.A.; Tavana, A.; Abdolahi, S.M.; Darvishmaslak, S. 2019. Prediction of blast-induced ground vibrations in quarry sites: A comparison of GP, RSM and MARS. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **119**: 118–129.
- Kahraman S., Toraman O.Y., and Cayirli S., 2018. Predicting the strength and brittleness of rocks from a crushability index, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **77(4)**, 1639 – 1645.
- Korman, T., Bedekovic, G., Kujundzic, T., & Kuhinek, D., 2015. Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, **51(2)**, 461 – 475.
- Köken, E., Özarslan, A., 2018. New testing methodology for the quantification of rock crushability, compressive crushing value (CCV). *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, **25(11)**, 1227–1236.
- Köken, E., 2020. Evaluation of size reduction process for rock aggregates in cone crusher, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **79**, 4933 – 4946.
- Köken, E. and Jili, Q., 2020. “Comparison of secondary crushing operations through cone and horizontal shaft impact crushers”, In: *20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2020*, pp 789 – 796.
- Li, H. McDowell, G.R., Lowndes, I.S. 2014. Discrete element modelling of a rock cone crusher, *Powder Technology*, **63**, 151 – 158.
- Mayorga, R.V., Arriaga, M., 2007. Non-linear global optimization via parameterization and inverse function approximation: An artificial neural networks approach. *International Journal of Neural Systems*. **17(5)**, 353-368.
- Momeni, E.; Nazir, R.; Armaghani, D.J.; Maizir, H., 2014. Prediction of pile bearing capacity using a hybrid genetic algorithm-based ANN. *Measurement*, **57**: 122–131.

Saravanan, K., Sasithra, S., 2014. Review on classification based on artificial neural networks. *International Journal of Ambient Systems and Applications*, **2(4)**, 11-18.

Sinnott, M.D. Cleary P.W. 2015. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 2– Impact crushers, *Minerals Engineering*, **74**: 163–177.

Quist J. and Evertsson C.M., 2016, “Cone crusher modelling and simulation using DEM”, *Minerals Engineering*, **85**: 92 – 105.

## Araştırma Makalesi / Research Article

# Kesme Parametrelerinin Haynes 242 Nikel Bazlı Süper Alaşım Malzemenin Tornalamasında Güç Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin RSM ve GA ile İncelenmesi

Hakan KAZAN<sup>1\*</sup>, Engin Ufuk ERGÜL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya.

<sup>2</sup> Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Amasya.

\*Sorumlu yazar e-posta: hakan.kazan@amasya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7745-8974>  
engin.ergul@amasya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0100-5199>

Geliş Tarihi: 15.04.2022

Kabul Tarihi: 05.10.2022

## Öz

Talaşlı imalatta yaygın kullanımı nedeniyle tornalama işleminde güç tüketimini azaltmak sürdürülebilir bir üretim süreci için kilit faktörlerden biridir. Nikel bazlı süper alaşımlar, üstün mekanik özelliklerinden nedeniyle endüstride sıklıkla tercih edilirler. Bu çalışmanın amacı işlem parametrelerinin Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin tornalanmasında güç tüketimi üzerine etkilerinin incelenmesidir. Bu kapsamda, yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Method-RSM) ile birleştirilen üç seviye Box-Behnken tasarımı ve genetik algoritma (GA) uygulanarak minimum güç tüketiminin tahmin edilmesinde kullanılan optimum parametre değerlerini belirlemek için regresyon modeli oluşturulmuştur. İlk olarak 3 farklı seviyedeki takım uç radüsü (0.4,0.6 ve 0.8 mm), talaş derinliği (0.2,0.4 ve 0.6 mm), ve ilerleme oranı (0.1,0.2 ve 0.3 mm/rev.) dikkate alınarak Box-Behnken deney tasarımı oluşturulmuştur. Ardından, elde edilen deney setlerine göre AdvantEdge™ vasıtasıyla her bir deney setine ait güç tüketimleri ölçülmüştür. Sonrasında, RSM'den elde edilen matematiksel tahmin modelinden yararlanılarak güç tüketimi tahmini için GA kullanılmıştır. Sonuç olarak, bu yöntemlerle bulunan tahmin değerleri karşılaştırılmış ve birbirlerine çok yakın oldukları görülmüştür. Hem istatistiksel hem de simülasyon programı sonuçları, güç tüketimini minimize etmek için düşük ilerleme oranı ve talaş derinliğine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

### Anahtar kelimeler

Tornalama; Nikel Esaslı Süperalaşım; RSM; Box Behnken; Genetik Algoritma; Güç Tüketimi

## Investigation the Effects of Cutting Parameters on Power Consumption in Turning of Haynes 242 Nickel-Based Super Alloy by RSM and GA

### Abstract

Due to its widespread use in machining, reducing power consumption in the turning process is one of the key factors for a sustainable production process. Nickel-based superalloys are preferred in variable applications due to their superior mechanical properties. This study aims to investigate the effects of process parameters on power consumption in turning of Haynes 242 nickel-based superalloy. In this context, three levels of Box-Behnken design combined with the Response Surface Method (RSM) and genetic algorithm (GA) were applied to find the optimum parameter values used in the estimation of the minimum power consumption to create the regression model. First, the Box-Behnken experimental design was created based on 3 different levels of tool nose radius (0.4,0.6 and 0.8 mm), depth of cut (0.2,0.4 and 0.6 mm), and feed rate (0.1,0.2 and 0.3 mm/rev.). Then, the power consumption of each test measured by AdvantEdge™ based on the obtained experimental sets. Then, GA was used for power consumption estimation by utilizing the mathematical estimation model obtained from RSM. Finally, the estimated values obtained by both methods were compared. Both statistical and simulation results show that low feed rate and depth of cut are needed to minimize power consumption.

### Keywords

Turning; Nickel-Based Superalloy; RSM; Box Behnken; Genetic Algorithm; Power Consumption

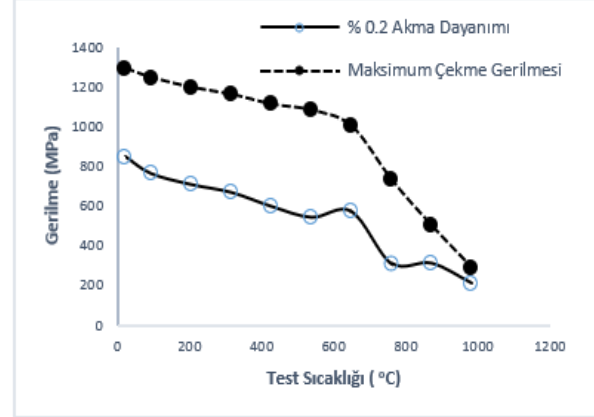
## 1. Giriş

Sınırsız insan ihtiyaçlarının karşılanması, sürekli artan popülasyon, ticari, konut, ulaşım ve endüstriyel kullanım düşünüldüğünde sınırlı enerji kaynaklarının kullanımı hassas bir noktaya ulaşmıştır. Bu alanlar içerisinde de üretim sektörü toplam enerji tüketiminin yaklaşık %50 lik kısmını oluşturmaktadır (Duflou *et al.* 2012). Sürdürülebilir üretim sürecinin sağlanabilmesi adına, imalatta yaygın olarak kullanılan tornalama işlemi sonucu oluşan güç tüketiminin incelenmesi hem akademi hem de endüstride sıklıkla araştırılan bir konudur. Bu bağlamda tornalama işlem parametrelerinin optimizasyonu sonucu güç tüketiminin düşürülmesi, dolayısıyla çevresel etkilerin ve emisyon oranının azaltılması birçok yazar tarafından incelenmiştir (Ma *et al.* 2014, Mativenga and Rajemi 2011, Mori *et al.* 2011, Yuan *et al.* 2012).

Tokluk, sertlik, ısı direnci gibi yüksek mekanik ve ısı özelliklerine sahip nikel bazlı süper alaşımlar havacılık, otomotiv, gaz türbini gibi birçok uygulamada tercih edilmektedirler (Dymek *et al.* 2006). Bununla birlikte yüksek ısı üretimine ve hızlı iş sertleşmesine yol açan östenitik matris içeriği nedeniyle nikel bazlı alaşımlar işlenmesi zor malzemeler olarak bilinirler. Ani işleme sertleşmesi, takım ömründe azalmaya ve aşırı plastik deformasyona neden olur (Choudhury and El-Baradie 1998, Kribes *et al.* 2015). Nikel bazlı süper alaşımların yüksek mekanik özelliklerinden ödün vermeden bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için yüksek sertlikli kesici takım kullanılması, döner işleme gibi ileri tekniklerin uygulanması ve iş parçasının ön ısıtmaya tabi tutulması gibi farklı üretim yöntemleri uygulanmaktadır (Kttagawa and Maekawa 1990, Parida *et al.* 2018, Pérez *et al.* 2000).

Üstün mekanik özellikleri sebebiyle Haynes 242 nikel bazlı süper alaşımlar havacılık ve gaz türbini uygulamaları için tercih sebebi olmuşlardır. Şekil 1, Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin akma ve çekme gerilmelerinin test sıcaklığına bağlı olarak değişimini göstermektedir (Int Kyn. 1). Buna göre en yüksek gerilme noktası oda sıcaklığında olmakla birlikte 650 °C seviyelerinde dahi 1000 MPa

lık bir gerilme elde edilmektedir. Yüksek çalışma sıcaklıklarında yüksek mekanik performans sergilemesi, korozyona karşı gösterdiği direnç ve düşük termal genleşme Haynes 242'nin diğer avantajları arasında gösterilebilir (Habeeb *et al.* 2008, Srivastava 1992).



Şekil 1. Haynes 242 mekanik özellikleri

Mühendislik uygulamalarının birçoğunda olduğu gibi talaşlı imalat alanında da istatistik ve simülasyon programlarına sıklıkla başvurulmaktadır (Esmailpour *et al.* 2020, Özlü and Uğur 2021). Bu durumun temel sebepleri üretim maliyet ve süresinde olduğu kadar takım aşınması ve güç tüketiminde de gereksiz sarfiyatın önüne geçmektir (Aydın *et al.* 2021). Talaşlı imalat sürecinde kesme parametrelerinin takım aşınması, güç tüketimi, kesme kuvvetleri gibi bağımlı değişkenler üzerine etkileri deneysel ve/veya numerik olarak literatürde kapsamlı olarak incelenmiştir (Uğur 2019, Venkatesan *et al.* 2017, Venkatesh and Chakradhar 2017). Bu amaçla çeşitli nikel bazlı süper alaşım malzemelerin, ilerleme oranı, kesme hızı, talaş derinliği ve ön ısıtma sıcaklığı gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi, aşınma gibi değişkenler üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir (Chen and Tsai 2017, Leshock *et al.* 2001, Parida 2019, Parida and Maity 2019, Uğur 2022).

Yalnızca simülasyon programları değil istatistiksel analizler de optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde araştırmacılara yol göstermektedir. Talaşlı imalat alanında Taguchi analizi, ANOVA, yüzey yanıt metodu (RSM) gibi istatistiksel yöntemlere sıklıkla başvurulmakta, bu sayede araştırmacıya optimum işlem parametrelerinin

tahmin ve önem sırasını belirlemede yol göstermektedir (Aydın *et al.* 2021, Özlü and Uğur 2021, Uğur 2019). Son yıllarda mevcut yöntemlere ek olarak, topluluk tabanlı optimizasyon yöntemlerinden biri olan Genetik Algoritma (GA) da talaşlı imalat alanında karar verme sürecinde aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda yapılan bir çalışmada yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma, AISI 316 paslanmaz çeliğin delinmesi işleminde optimum delme parametrelerini bulmak için kullanılmıştır (Kılıçkap ve Hüseyinoğlu 2010). Başka bir çalışmada ise yazarlar, RSM ile birleştirilen üç seviye Box-Behnken tasarımı ve GA uygulanarak transformatör en sıcak nokta sıcaklığı değerinin tahmininde kullanılan optimum parametre değerlerini elde etmek için bir regresyon modeli oluşturmuşlardır (Ergül vd. 2019). Benzer bir biçimde, araştırmacılar tarafından RSM ve GA AISI 1045 çeliğinin tornalanmasında minimum güç tüketimi sağlayan işleme parametrelerinin optimizasyonunda uygulanmıştır (Sangwan and Kant 2017). Ayrıca, lazer kaynak işleminin parametre optimizasyonu için de RSM ve GA uygulanan çalışmalar yapılmıştır (Vijayan *et al.* 2018). Geniş kapsamlı literatür taramalarında, RSM uygulandığında ve bir optimizasyon sürecine ihtiyaç duyulduğunda GA'nın nasıl kullanılabileceği ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır (Alvarez *et al.* 2009). Yüzey pürüzlülüğünün daha düşük değerlerinin tahmin edilebilmesi için GA ve RSM yöntemlerini birlikte dikkate alan modeller de önerilmiş ve optimum kesme koşullarını belirlenmiştir (Öktem *et al.* 2005, Suresh *et al.* 2002). Güncel bir çalışmada ise bir CNC tornalama makinası ve tungsten kaplı karbür sistemi için kesme parametreleri ve yüzey pürüzlülüğü için minimum koşulları RSM ve GA'yı entegre ederek hesaplanmıştır (Panwar *et al.* 2021).

Literatürde Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin mikro yapısı ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili çalışmalar bulunsa da GA ile karşılaştırmalı istatistiksel yöntemler detaylandırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı yüksek mekanik özellikleri sebebiyle tercih edilen Haynes 242 nikel bazlı süper alaşımın tornalama işlemindeki güç tüketimine takım uç radüsü, talaş derinliği ve ilerleme oranı parametrelerinin etkilerinin incelenmesidir. Bu

doğrultuda işlem parametreleri için üç farklı seviyede belirlenen değerler sonlu elemanlar analizi ile incelenmiş ve güç tüketimleri ölçülmüştür. Daha sonra simülasyon sonucu elde edilen güç tüketimleri RSM ve GA modelleriyle karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Deneysel Tasarımı

Bu çalışmada  $\varnothing$  10 mm çapında Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzeme tercih edilmiştir. Üstün mekanik özellikleri nedeniyle gaz türbini uygulamalarında sıklıkla kullanılan Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2' de sırasıyla verilmiştir.

**Çizelge 1.** Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin kimyasal bileşimi (Int Kyn. 1)

Element	Ni	B	Cr	Co	Fe	Mn	Si	Mo	C	Al	Cu
Ağırlık (%)	Bal.	0.006	8	2.5	2	0.8	0.8	26	0.03	0.5	0.5

**Çizelge 2.** Haynes 242'nin fiziksel özellikleri

Dinamik elastiklik modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Elektrik direnci (μohm-cm)	Özısı (J/kgK)	Termal iletkenlik (W/(mK))
229	9.06	122	386	11.3

Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım tornalanmasında elde edilecek güç tüketimin belirlenmesi için kullanılan kesme parametreleri Box-Behnken olarak adlandırılan standart yanıt yüzey yöntemi tasarımı ile analiz edilmiştir. Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon yapılabilmesi için ilk önce kesme parametreleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Güç tüketimine etkili olacak kesme parametreleri Çizelge 3'te görüldüğü gibi üçer seviye olacak şekilde oluşturulmuştur.

**Çizelge 3.** İşlem seviye ve parametreleri

Parametreler	Seviye		
	Düşük (1)	Ortalama (2)	Yüksek (3)
Takım uç radüsü (mm)	0.4	0.6	0.8
Talaş derinliği (mm) (d)	0.2	0.4	0.6
İlerleme oranı (mm/rev) (f)	0.1	0.2	0.3

15 deney seti yanıt yüzey yöntemi ile Box-Behnken tasarımına göre belirlenmiştir. Third Wave AdvantEdge® yazılımı kullanılarak üç seviyedeki kesme parametreleri ve bu seviyelere karşılık gelen ortalama güç tüketim değerleri incelenmiştir.

## 2.2 Nümerik Analiz

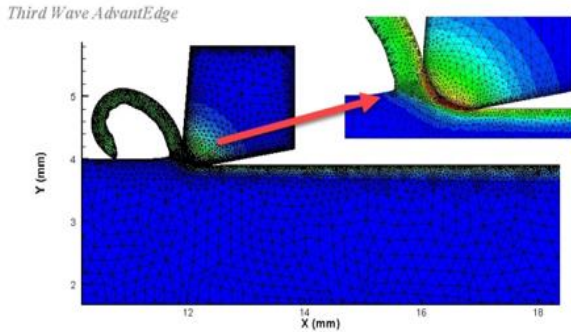
Genel olarak, yüksek plastik gerinim, gerinim oranı ve sıcaklık nedeniyle işleme simülasyonlarında iş parçalarının deformasyonu gözlemlenir. Bu sebeple, iş parçalarının gerilim-gerinim davranışını tanımlamak için gerinim hızına, iş sertleşmesine ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme modelleri kullanılır (Rao *et al.* 2011, Shrot and Bäker 2012). Burada, iş parçasının mekanik davranışını tanımlamak için Johnson-Cook akma yüzeyi oluşturan malzeme modeli kullanılmıştır. Denklem 1, iş parçasının akış gerilimini tanımlamak için kullanılan Johnson-Cook malzeme modelini gösterir.

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastic}} \underbrace{\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right]}_{\text{Thermal Softening}} \quad (1)$$

AdvantEdge™, aşağıdaki denklemde Coulomb sürtünmesi tarafından tanımlanan bir sürtünme katsayısı kullanır:

$$F_f = \mu F_n \quad (2)$$

Tornalama işleminin sayısal analizi (tornalama simülasyonları) Third Wave AdvantEdge® yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde sabit 1 mm kesme derinliğinde 2B orthogonal kesme ve Lagrange yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 2. Ortogonal işleme modeli

Çizelge 4'te gösterilen kesme parametreleri doğrultusunda Şekil 2 ile gösterilen işleme modeli her bir deney seti için çalıştırılmıştır. Sonuç olarak yine Çizelge 4'te gösterilen güç tüketimleri kaydedilmiştir.

Çizelge 4. Optimum deneysel tasarım planı ve kaydedilen güç tüketim değerleri

#	Parametreler			Yanıt
	Takım uç radüsü (mm)	Talaş derinliği (mm)	İlerleme oranı (mm/rev.)	Güç tüketimi (W)
1	0.8	0.4	0.1	821.2
2	0.8	0.4	0.3	1032.54
3	0.6	0.2	0.3	459.58
4	0.4	0.4	0.1	479.84
5	0.6	0.4	0.2	863.4
6	0.6	0.2	0.1	313.6
7	0.6	0.4	0.2	863.4
8	0.6	0.6	0.1	968.65
9	0.8	0.6	0.2	1585.69
10	0.6	0.4	0.2	863.4
11	0.6	0.6	0.3	1525.85 <sup>(1)</sup>
12	0.8	0.2	0.2	419.98
13	0.4	0.2	0.2	502.79
14	0.4	0.4	0.3	953.68
15	0.4	0.6	0.2	1104.5

Çizelge 4 incelendiğinde, 9 ve 11 numaralı deney setlerinde güç tüketiminin arttığı gözlemlenmiştir. 9 numaralı deney setinde takım uç radüsü ve talaş derinliği parametrelerinin yüksek, ilerleme oranının ise orta seviyede olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, 11 numaralı deney setinde ise talaş derinliği ve ilerleme oranının yüksek, takım uç radüsünün de orta seviyede olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Thirdwave Advantage programı kütüphane verileri kullanılarak elde edilen bu veriler literatürde Haynes 242 ile ilgili kapsamlı bir nümerik çalışma bulunmadığından dolayı Inconel 718 üzerine yapılmış olan çalışmaya ait kesme parametreleri ile karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır (Parida and Maity 2019). Sonuç olarak, çalışmada belirtilen kesme kuvveti verileri simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında Çizelge 5'te gösterildiği üzere tüm kesme koşulları için %10'luk hata oranının altında değerler elde edilmiş olması mevcut çalışmada kullanılan kütüphane değerlerinin kabul edilebilir olduğunu ortaya koymuştur.



**Çizelge 5.** FE doğrulama değerleri (Parida and Maity 2019)

Kesme hızı (mm/min)	İlerleme oranı (mm/rev)	Kesme derinliği (mm)	Deneysel kesme kuvveti (N)			FE kütüphane kesme kuvveti (N)			Hata oranı (%)		
			30 °C	300 °C	600 °C	30 °C	300 °C	600 °C	30 °C	300 °C	600 °C
66	0.1	1.5	325	274	268	336.23	288.18	291.74	3.46	5.17	8.85
188	0.15		439	396	389	451.97	423.48	418.26	2.95	6.94	7.52

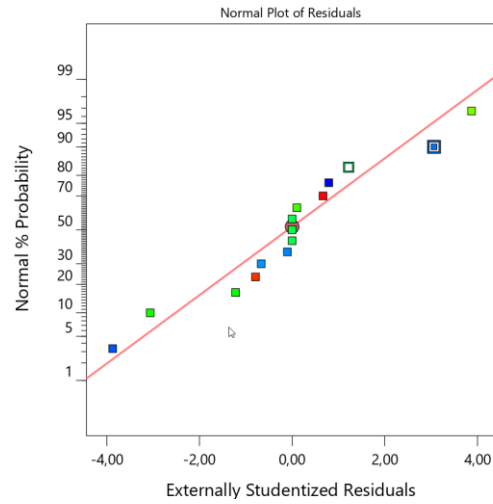
### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 RSM ile Analiz

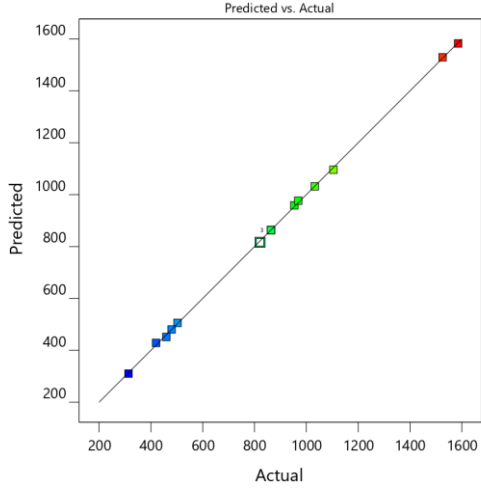
Kesme parametreleri analiz sonuçlarının Box-Behnken tasarımına göre değerlendirilmesi için Design Expert 11.1.0.1 paket programı kullanılmıştır. Design Expert programı ile optimum güç tüketimi için uygun ikinci derecede regresyon modeli kuadratik olarak Denklem 3'te oluşturulmuştur. Katsayılarına göre denklem incelendiğinde güç tüketimine etki eden en etkili kesme parametresinin talaş derinliği olduğu görülmektedir.

$$W = +215.98750 - 913.3 * r - 1311.8875 * d + 4206.6 * f + 3521 * r * d - 3281.25 * r * f + 5140.25 * d * f + 559.4275 * r^2 + 437.0625 * d^2 - 6396.25 * f^2 \quad (3)$$

Şekil 3 ve kuadratik modele göre oluşturulan hata dağılımları incelendiğinde sabit bir varyansla dağıldığı görülmektedir. Bu durum deney tasarımının güvenilirliğini göstermektedir. Analizler sonucunda elde edilen modelin regresyon katsayısı  $R^2$  0.9998,  $R_{Adj}^2$  0.9995 ve  $R_{pred}^2$  0.9971 olduğu görülür.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olması kuadratik modelin yanıtı uygun olduğunu göstermektedir.

**Şekil 3.** Hataların dağılım eğrisi

Güç tüketimine etki eden kesme parametrelerinin etkisini belirlemek için oluşturulan modelin güvenilirliği ve istatistiksel olarak anlamlılığını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Tüm girdi değişkenleri için kareler toplamı (SS), serbestlik derecesi (df), ortalama kare (MS), F değeri ve P değeri ile kareleri ve etkileşim terimleri Çizelge 6'da verilmektedir. Çizelge 6 incelendiğinde güç tüketimine etki eden en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu görülmektedir. 3033.42 Model F değeri  $p < 0.0001$  olduğundan dolayı modelin anlamlı olduğunu gösterir. Talaş derinliğinden sonra en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğu, en son olarak da takım uç radüsü olduğu belirlenmiştir. Kuadratik denklem modellemesine göre oluşturulan denkleme göre elde edilen tahmini sonuçlar ile analiz sonuçları arasında bir uyum olması gerekmektedir. Şekil 4'te analiz sonucunda elde edilen güç tüketimi (yanıt) için tahmini değer ve gerçek değerler arasında uyum olduğu görülmektedir.

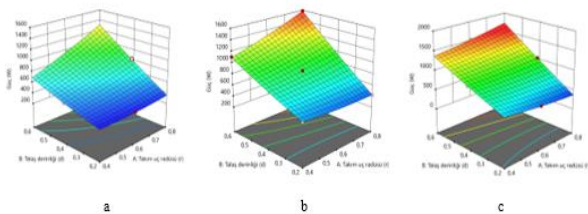


Şekil 4. Deneysel ve tahmin edilen güç tüketimi

Çizelge 6. Güç tüketimi (yanıt) için ANOVA sonuçları

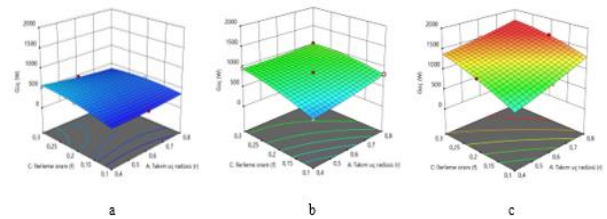
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2,005E+06	9	2,227E+05	3033,42	< 0.0001	significant
A-Takım uç radüsü (r)	83746,87	1	83746,87	1140,55	< 0.0001	
B-Talaş derinliği (d)	1,521E+06	1	1,521E+06	20721,04	< 0.0001	
C-İlerleme oranı (f)	2,409E+05	1	2,409E+05	3281,40	< 0.0001	
AB	79501,44	1	79501,44	1082,73	< 0.0001	
AC	17226,56	1	17226,56	234,61	< 0.0001	
BC	42275,47	1	42275,47	575,75	< 0.0001	
A <sup>2</sup>	1848,93	1	1848,93	25,18	0,0040	
B <sup>2</sup>	1128,51	1	1128,51	15,37	0,0112	
C <sup>2</sup>	15105,97	1	15105,97	205,73	< 0.0001	
Residual	367,13	5	73,43			
Lack of Fit	367,13	3	122,38			
Pure Error	0,0000	2	0,0000			
Cor Total	2,005E+06	14				

Kuadratik modele göre talaş derinliği ve takım uç radüsünün güç tüketimine etkisi Şekil 5'te gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde talaş derinliğinin ve ilerleme oranının artması ile güç tüketimin arttığı ancak takım uç radüsünün artırılması ile güç tüketiminin çok fazla değişmediği kaydedilmiştir.



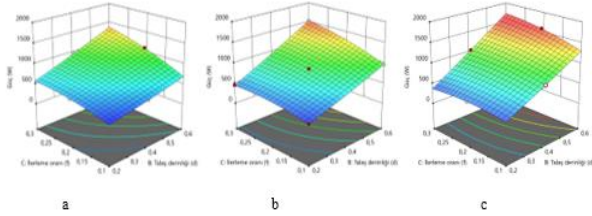
Şekil 5. Talaş derinliği ve takım uç radüsünün güç tüketimi üzerine etkisi a) ilerleme oranı 0.1 b) ilerleme oranı 0.2 c) ilerleme oranı 0.3

Şekil 6' dan da görüleceği gibi farklı talaş derinliklerinde ilerleme ve takım uç radüsünün güç tüketimine etkisi incelenmiştir. Farklı talaş derinliklerinde ilerleme oranının ve takım uç radüsünün değişmesinin güç tüketimine etkisinin çok olmadığı görülmektedir.



Şekil 6. İlerleme oranı ve takım uç radüsünün güç tüketimi üzerine etkisi a) talaş derinliği 0.2 b) talaş derinliği 0.4 c) talaş derinliği 0.6

Farklı takım uç radüslerinde ilerleme oranı ve talaş derinliğinin etkileri Şekil 7’de görülmektedir. Aynı takım uç radüslerinde ilerleme oranının artırılmasının güç tüketimine etkisinin çok olmadığı ancak talaş derinliğinin artırılması ile güç tüketiminde artışın etkili olduğu Şekil 7 a, b, ve c’de görülmektedir.



**Şekil 7.** İlerleme oranı ve talaş derinliğinin güç tüketimi üzerine etkisi a) takım uç radüsü 0.4 b) takım uç radüsü 0.6 c) takım uç radüsü 0.8

### 3.2 Güç tüketiminin GA ile optimizasyonu

Bu çalışmanın amacı, GA entegrasyonu ile güç tüketiminin optimizasyonunu sağlamaktır. Güç tüketiminin tahmini için deney verileri kullanılarak, RSM yöntemi ile bir matematik model oluşturulmuştur. 3 numaralı denklemde gösterilen bu model, güç değerinin; takım uç radüsü, talaş derinliği ve ilerleme oranı ile olan bağlantısını yansıtmaktadır. Modelin amacı güç tüketimi değerini minimize eden optimum parametreleri belirlemektir. GA ile bu problemin çözülebilmesi için ilk önce amaç fonksiyonu belirlenmelidir. Denklem 3’te yer alan ifade amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonundaki parametrelerin alt ve üst sınırları Çizelge 7’de verilmektedir.

**Çizelge 7.** Parametre alt ve üst sınırları

Parametreler	Alt Sınır	Üst Sınır
Takım uç radüsü (mm) ( $r$ )	0.4	0.8
Talaş derinliği (mm) ( $d$ )	0.2	0.6
İlerleme oranı (mm/rev) ( $f$ )	0.1	0.3

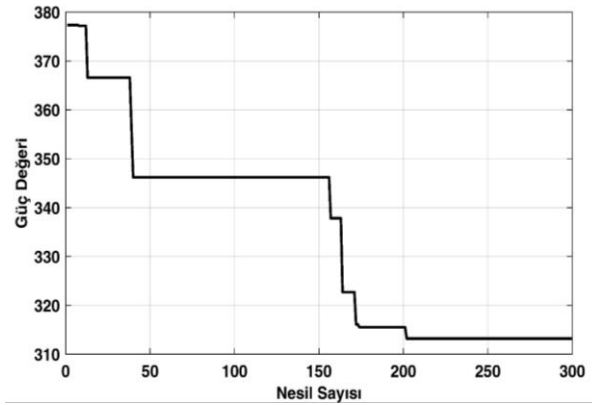
GA, Çizelge 8’de verilen parametrelerle çalıştırılarak minimum yani en iyi güç tüketim değeri ve bu değerdeki parametreler bulunmuştur. GA’da stokastik evrensel örnekleme, iki noktalı çaprazlama ve uniform mutasyon kullanılmıştır. Elitizm mekanizması ile her bir iterasyondaki en iyi bireyler

saklanmış ve bir sonraki nesle aktarılmışlardır. Genetik algoritmanın başarımının artırılması için gamma düzeltmesi tabanlı puan/uygunluk ölçekleme yöntemi (Ergül and Eminoglu 2020) de algoritmaya uygunluk değerinin belirlendiği aşamada eklenmiştir.

**Çizelge 8.** GA parametreleri

GA Parametreleri	Değeri
Birey Sayısı	100
Bit Sayısı	30
Nesil Sayısı	300
Çaprazlama Olasılığı	1
Mutasyon Olasılığı	1/bit sayısı
Gamma	3

Çizelge 8’de verilen parametrelerle GA programı çalıştırılmıştır. Şekil 8’de güç tüketimi değerinin nesil sayısına göre değişimi gösterilmektedir.



**Şekil 8.** Güç tüketimi değerinin nesil sayısı ile değişimi

GA uygulanarak gerçekleştirilen optimizasyon işlemi sonucunda optimum yani minimum güç tüketim değeri 313.1971 W olarak bulunmuştur. Bu değerinde elde edildiği optimum parametre değerleri ise şöyledir: takım uç radüsü 0.4872, talaş derinliği 0.2098 ve ilerleme oranı 0.1002.

Genetik algoritma ile bulunan bu optimum parametre değerleri kullanılarak deney tekrarlanmıştır ve sonuç olarak güç tüketim değeri 307.3 W olarak bulunmuştur.

## 4. Sonuç

Bu çalışmada Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin tornalanma işleminde 3 farklı seviyede takım uç radüsü, talaş derinliği ve ilerleme oranı

parametrelerinin güç tüketimine etkileri incelenmiştir. Bu analizde sonlu elemanlar yöntemiyle ölçülen güç tüketimleri, RSM ve GA yöntemleri ile analiz edilerek optimum kesme parametreleri belirlenmiştir.

Box-Behnken deney mimarisinde tanımlanan deneysel bir veri tabanı kullanılarak, takım uç radüsü, talaş derinliği ve ilerleme oranı kullanılarak güç tüketim modeli oluşturulmuştur. Bu modeli optimize etmek için en iyi tahmin değerlerini belirleyen bir genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmadan Haynes 242 nikel bazlı süper alaşım malzemenin tornalanmasında işlem parametrelerinin güç tüketimi üzerine etkileri için aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Sonlu elemanlar sonuçlarına göre en düşük güç tüketimi, talaş derinliği ve ilerleme oranının minimum olduğu 6 numaralı deney setinde gerçekleşmiştir.
- RSM analizlerine göre, talaş derinliği ve ilerleme oranındaki artışların güç tüketimin arttırdığı ancak takım uç radüsünün değişiminin güç tüketim üzerine etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir.
- GA ile yapılan optimizasyon işleminde minimum güç değeri 313.1971 W olarak bulunmuştur. Bu değer, sonlu elemanlar sonuçlarıyla neredeyse tamamen eşleşmektedir.
- GA ile yapılan optimizasyon işlemine göre, takım uç radüsü 0.4872 mm, talaş derinliği 0.2098 mm ve ilerleme oranı 0.1002 mm/rev. optimum işlem parametreleridir.
- Genetik algoritma ile bulunan bu optimum parametre değerleri kullanılarak deney tekrarlanmıştır ve sonuç olarak güç değeri 307.3 W bulunmuştur. Sonuç olarak, GA ve RSM ile bulunan sonuçların deneysel çalışmalarla bulunan sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 5. Kaynaklar

- Alvarez, M., Ilzarbe, L., Viles, E. and Tanco, M., 2009. The use of genetic algorithms in response surface methodology. *Quality Technology & Quantitative Management*, **6(3)**, 295-307.
- Aydın, K., Akgün, A., Yavaş, Ç., Gök, A. and Şeker, U., 2021. Experimental and Numerical Study of Cutting Force Performance of Wave Form End Mills on Gray Cast Iron. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **46(12)**, 12299-12307.
- Aydın, K., Katmer, S., Gok, A. and Seker, U., 2021. Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **36(4)**, 2225-2238.
- Chen, S.-H. and Tsai, K.-T., 2017. The study of plasma-assisted machining to Inconel-718. *Advances in Mechanical Engineering*, **9(12)**, 1687814017735789.
- Choudhury, I. and El-Baradie, M., 1998. Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology*, **77(1-3)**, 278-284.
- Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M. and Kellens, K., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals*, **61(2)**, 587-609.
- Dymek, S., Wróbel, M., Dollar, M. and Blicharski, M., 2006. Influence of plastic deformation and prolonged ageing time on microstructure of a Haynes 242 alloy. *Journal of Microscopy*, **224(1)**, 24-26.
- Ergül, E. U. and Eminoglu, I., 2020. Power-law fitness scaling on multi-objective evolutionary algorithms: interpretations of experimental results. *Soft Computing*, **24(5)**, 3893-3907.
- Ergül, E. U., Gezegin, C. and YILDIZ, A., 2019. Yanıt yüzey yöntemi ve genetik algoritma kullanılarak transformatör sargı en sıcak nokta sıcaklığının modellenmesi ve optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **10(2)**, 467-480.
- Esmailpour, R., Kim, H., Park, T., Pourboghra, F., Agha, A. and Abu-Farha, F., 2020. Effect of hardening law and process parameters on finite element simulation of single point incremental forming (SPIF) of 7075 aluminum alloy sheet. *Mechanics & Industry*, **21(3)**, 302.
- Habeeb, H., Abou-El-Ho, K., Mohamad, B., Ghani, J. A. and Kadrigama, K., 2008. Investigating of tool wear, tool

- life and surface roughness when machining of nickel alloy 242 with using of different cutting tools. *Asian Journal of Scientific Research*, **1(3)**, 222-230.
- Kılıçkap, E. and Hüseyinoğlu, M., 2010. Tepki yüzey modeli ve genetik algoritma kullanılarak AISI 316'nın delinmesinde oluşan çapak yüksekliğinin modellenmesi ve optimizasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **1(1)**, 71-80.
- Kribes, N., Hessainia, Z. and Yallese, M. A., 2015. Optimisation of machining parameters in hard turning by desirability function analysis using response surface methodology. In *Design and Modeling of Mechanical Systems-II* (pp. 73-81): Springer.
- Kttagawa, T. and Maekawa, K., 1990. Plasma hot machining for new engineering materials. *Wear*, **139(2)**, 251-267.
- Leshock, C. E., Kim, J.-N. and Shin, Y. C., 2001. Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **41(6)**, 877-897.
- Ma, J., Ge, X., Chang, S. and Lei, S., 2014. Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **74(9)**, 1701-1708.
- Mativenga, P. and Rajemi, M., 2011. Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint. *CIRP Annals*, **60(1)**, 149-152.
- Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y. and Oda, Y., 2011. A study on energy efficiency improvement for machine tools. *CIRP Annals*, **60(1)**, 145-148.
- Öktem, H., Erzurumlu, T. and Kurtaran, H., 2005. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*, **170(1-2)**, 11-16.
- Özlü, B. and Uğur, L., 2021. Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, **10(2)**, 1789-1795.
- Panwar, V., Sharma, D. K., Kumar, K. P., Jain, A. and Thakar, C., 2021. Experimental investigations and optimization of surface roughness in turning of en 36 alloy steel using response surface methodology and genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings*, **46**, 6474-6481.
- Parida, A. K., 2019. Analysis of chip geometry in hot machining of Inconel 718 alloy. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, **43(1)**, 155-164.
- Parida, A. K. and Maity, K., 2018. Experimental investigation on tool life and chip morphology in hot machining of Monel-400. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **21(3)**, 371-379.
- Parida, A. K. and Maity, K., 2019. Numerical and experimental analysis of specific cutting energy in hot turning of Inconel 718. *Measurement*, **133**, 361-369.
- Pérez, J., Llorente, J. and Sanchez, J., 2000. Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, **100(1-3)**, 1-11.
- Rao, B., Dandekar, C. R. and Shin, Y. C., 2011. An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, **211(2)**, 294-304.
- Sangwan, K. S. and Kant, G., 2017. Optimization of machining parameters for improving energy efficiency using integrated response surface methodology and genetic algorithm approach. *Procedia CIRP*, **61**, 517-522.
- Shrot, A. and Bäker, M., 2012. Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, **52(1)**, 298-304.
- Srivastava, S., 1992. A Low-Thermal Expansion, High Strength Ni-Mo-Cr Alloy for Gas Turbines. *Superalloys*, **92**, 227-236.
- Suresh, P., Rao, P. V. and Deshmukh, S., 2002. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **42(6)**, 675-680.
- Uğur, L., 2019. 7075 Alüminyum Malzemesinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Yanıt Yüzey Metodu İle Optimizasyonu. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **12(1)**, 326-335.
- Uğur, L., 2022. TI-6AL-4V Sıcak İşlenmesi Üzerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **10(2)**, 532-537.
- Venkatesan, K., Ramanujam, R. and Kuppan, P., 2017. Investigation of machinability characteristics and chip morphology study in laser-assisted machining of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **91(9)**, 3807-3821.

Venkatesh, G. and Chakradhar, D., 2017. Influence of thermally assisted machining parameters on the machinability of Inconel 718 superalloy. *Silicon*, **9(6)**, 867-877.

Vijayan, K., Ranjithkumar, P. and Shanmugarajan, B., 2018. Comparison of Response Surface Methodology and Genetic Algorithm in parameter optimization of laser welding process. *Applied Mathematics & Information Sciences*, **12(1)**, 239-248.

Yuan, C., Zhai, Q. and Dornfeld, D., 2012. A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. *CIRP Annals*, **61(1)**, 39-42.

### **İnternet Kaynakları**

1. <http://www.haynesintl.com/242site/> (2005).

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055902 (1214-1224)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055902 (1214-1224)

DOI: 10.35414/akufemubid.1024495

Araştırma Makalesi / Research Article

## Buji Ateşlemeli Bir Motorda Ultrasonik Yakıt Sistemi Kullanılmasının Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Cengiz ÖNER\*<sup>1</sup>, Gökhan ÖZTÜRK<sup>2</sup>, Burak TANYERİ<sup>3</sup><sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl.<sup>2</sup> Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Batman.<sup>3</sup> Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Bakım ve Onarım Bölümü, Elazığ.

Sorumlu yazar e-posta: coner@bingol.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3278-2831>

gokhan.ozturk@batman.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-6966>

burak.tanyeri@firat.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-9755>

Geliş Tarihi: 17.11.2021

Kabul Tarihi: 14.10.2022

### Öz

Buji ateşlemeli motorlarda kullanılan yakıtın parçalanıp hava ile karıştırılması, yanma ve egzoz emisyonu üzerinde oldukça etkilidir. Motorun farklı çalışma koşullarına uygun ideal hava-yakıt karışım oranını hazırlamak için yakıt sistemleri üzerinde çalışılmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada buji ateşlemeli motorlarda kullanılan geleneksel yakıt sistemlerine alternatif olarak ultrasonik yakıt sistemi kullanılmıştır. Buji ateşlemeli motorlarda kullanılan enjektörlü yakıt sisteminde 20-30 µm olan ortalama damlacık çapı, ultrasonik parçalama ile ortalama damlacık çapı 12 µm olarak gerçekleşmiştir. Motor ½ sabit yükte farklı devirlerde ultrasonik, karbüratörlü ve enjeksiyonlu yakıt sistemleri ile çalıştırılıp egzoz emisyonları ölçülmüştür. Üç yakıt sistemi için ölçülen egzoz emisyonlarının maksimum değerleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında, karbüratörlü sisteme göre CO da %99, HC de %60, NO<sub>x</sub> de %18 azalma, CO<sub>2</sub> de % 10 ve artış olduğu, enjektörlü sisteme göre CO da %99, CO<sub>2</sub> de %12, HC de %45 azalma, NO<sub>x</sub> de % 55 artış olduğu görülmüştür. Genel olarak ultrasonik yakıt sisteminin egzoz emisyonları üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirlenmiştir.

### Anahtar kelimeler

Ultrasonik parçalama;  
Yakıt;  
Yanma;  
Emisyon

## Investigation of the Effect of Using Ultrasonic Fuel System on Exhaust Emissions in a Spark Ignition Engine

### Abstract

Fragmentation and mixing of the fuel used in spark ignition engines with air is highly effective on combustion and exhaust emissions. Studies are carried out on fuel systems in order to prepare the ideal air-fuel mixture ratio suitable for different operating conditions of the engine. In this study, ultrasonic fuel system was used as an alternative to the traditional fuel systems used in spark ignition engines. The average droplet diameter of 20-30 µm in the injector fuel system used in spark ignition engines has been realized as 12 µm with ultrasonic fragmentation. The engine was run at ½ constant load at different speeds with ultrasonic, carburetor and injection fuel systems, and exhaust emissions were measured. The maximum values of the measured exhaust emissions for the three fuel systems were examined comparatively. When the ultrasonic fuel system is used, there is a 99% reduction in CO, 60% in HC, 18% in NO<sub>x</sub>, 10% and an increase in CO<sub>2</sub> compared to the carburetor system, 99% reduction in CO, 12% in CO<sub>2</sub>, and 45% in HC compared to the injector system. It was observed that there was a 55% increase in NO<sub>x</sub>. In general, it has been determined that the ultrasonic fuel system has a positive effect on exhaust emissions.

### Keywords

Ultrasonic shredding;  
Fuel;  
Combustion;  
Emission



## 1. Giriş

Dünyadaki nüfus artışına bağlı olarak araç sayısının artması, çevreye zararlı etkilerin önemli boyutlara ulaşmasına sebep olmuştur. Günümüzde motorlu taşıtlar için enerji çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Dünya da petrol ürünlerinin kullanımı arttıkça petrol rezervlerinin azaldığı bilinmektedir (Liao *et al.* 2016). Fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan çevre kirliliği önemli sorun olarak kabul edilmektedir. İçten yanmalı motorlar sera gazı salınımının önemli bir kaynağı olarak küresel ısınmanın başlıca sebebi olarak görülmektedir (Sagar 1995). Yapılan çalışmalarda dünyada sera gazının yaklaşık %20 taşıt kaynaklı olduğu bilinmektedir (Çalışkan vd. 2017). Avrupa Birliği, ABD ve Japonya gibi ülkeler emisyon standartlarını yükselterek bu soruna karşı önlemler almaktadır (Batmaz 1996). Otomotiv firmaları, motor üreticileri ve yakıt sistemi parçaları alt sanayi imalatçıları, egzoz emisyonlarının çevresel etkilerini azaltmak için (EURO 6 Tier 2 gibi) standartlara uygun üretim yapmaktadırlar (Twigg 2003).

Geçmiş yıllarda buji ateşlemeli motorlarda kullanılan karbüratörlü yakıt sisteminin birçok dezavantajları olduğu bilinmektedir. Hava yakıt karışımını yeterince homojen olmaması, zengin karışım oluşturması ve bu karışımın yanması sonucunda yüksek değerlerde egzoz emisyonların ortaya çıktığı yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur (Salman vd. 2003).

Günümüzde karbüratörlü sistemlerin eksikliklerini gidermek ve yüksek emisyon değerlerini azaltmak için enjeksiyonlu sistemlere geçilmiştir. Buji ateşlemeli motorlarda kullanılan enjeksiyonlu yakıt sistemleri, yakıtı pompa ve enjektörler aracılığıyla emme manifolduna, supap arkasına veya direkt silindir içerisine göndermektedir (Çelik ve Özdalyan 2010, Song *et al.* 2016). Yakıtın emme manifolduna veya supap arkasına püskürtülmesi halinde; yakıtın silindire girmeden buharlaşması sonucu daha homojen hava yakıt karışımı hazırlanmaktadır. Bu enjeksiyon sistemlerinde yakıtın püskürtüldüğü yüzeylerde bir yakıt filmi oluşur. Özellikle motorun soğuk çalışma şartlarında daha fazla yakıt püskürtülür ve karışım zenginleşir. Zengin karışım yakıt tüketimi ve hidrokarbon emisyonlarını önemli

ölçüde arttırmaktadır. Bu sorunu çözebilmek için direkt yakıt enjeksiyon sistemi geliştirilmiştir. Yakıtın direkt silindir içerisine püskürtülmesi, enjeksiyon sisteminin daha iyi kontrol edilmesini sağlar. Özellikle yakıtın geç püskürtülmesi sırasında emme supaplarının kapalı olması sıkıştırma sonu basıncının daha yüksek olacağı anlamına gelir (Çelik ve Özdalyan 2010). Direkt enjeksiyonlu sistemlerde yakıtın buharlaşması için yeterli sürenin olmaması nedeniyle parçalanmayı iyileştirmek için, yakıt silindir içerisine yüksek basınçla püskürtülür (Çelik ve Özdalyan 2010, Iwamoto *et al.* 1997, Scholar 2016, Zhao *et al.* 1999, Geiger *et al.* 1999). Bir enjeksiyon sisteminin maksimum püskürtme basıncı, silindir çapı/strok boyu oranı, sıkıştırma oranı ve karışım oranına bağlı olarak 50 ile 150 bar arasında değişir. Bu tür enjeksiyon sistemlerinde yakıt demetindeki yakıt damlacıklarının hızı 30-70 m/s, büyüklüğü 20-30 µm arasında olup 80 mm'nin üzerinde derinlik nüfusuna sahip olduğu görülmüştür (Ohsuga *et al.* 1997).

Son yıllarda buji ateşlemeli motorlarda direkt püskürtme sistemleri oldukça popüler hale gelmiştir. Direkt püskürtmeli sistemlerde homojen ve kademeli olmak üzere iki temel prensiple karışım oluşturulur. Hava yakıt karışımının hazırlanmasında yakıtın parçalanması büyük önem taşımaktadır (Postrioti *et al.* 2016).

Yakıt atomizasyon kalitesinin yüksek olması hava yakıt karışımının daha homojen olacağı anlamına gelir. Homojen karışım, termik verimi arttıracak gibi egzoz emisyon değerlerini de düşürmektedir (Groff 2016).

Ultrasonik transduser kullanarak elektrik enerjisi mekanik enerjiye veya mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülebilir (Zhang *et al.* 2012). Piezoelektrik dönüştürücüler, yüksek frekanslı ses dalgaları üretmek için kullanılır. Bu dalgalar, ultrasonik atomizasyonda akustik kavitasyonu sağlar. Çoğunlukla, akustik kavitasyon, görülmeyecek kadar küçük kabarcıkların veya sıvı damlacıklarının oluşturulması anlamına gelir (White 1962).

Ultrasonik atomizasyon yöntemi, içten yanmalı motorlarda atomizasyon kalitesini ve dolgu homojenliğini arttırmaya dönük yeni bir yöntem olarak düşünülebilir. İlk olarak Wood ve Lommis

tarafından keşfedilen Ultrasonik atomizasyon, yüksek yoğunluklu ultrasonik ses dalgalarıyla sıvıların parçalanmasını sağlayarak, sıvı-gaz arası özellikler taşıyan damlacıklar oluşturmak için kullanılmaktadır (Neppiras 1980). Ultrasonik atomizasyonda 100 µm den daha düşük çaplı sıvı damlacıklar oluşturulabilir. Bu değerler, en küçük damlacık çapı üretebilen sprey nozllardan çok daha küçüktür ve herhangi bir termal değişim gerektirmemektedir. Ayrıca ultrasonik atomizasyon için ısı girişine de ihtiyaç yoktur. Ultrasonik atomizasyonda sıvıları parçalamak için yüksek yoğunluklu ses dalgaları kullanılır. Bu teknik inhilasyon ilaçlarının hastaya verilmesinde, yakıtların parçalanmasında, analitik nebulizerlerde hava pürifikasyon teknolojilerinde kullanılmaktadır (Neppiras 1980). Bu teknikte damlacık oluşumunun altındaki mekanizma tam olarak anlaşılmasına rağmen bu alanda iki teori kabul görmüş durumdadır.

Bunlardan ilki kavitasyon teorisidir. Bu teoride ultrasonik ses dalgaları sıvı üzerinde hidrolik titreşimler oluşturur. Bu hidrolik titreşimler kavitasyon olarak bilinen mikro kabarcık oluşumuna neden olur. Mikro kabarcıklar, ultrasonik enerji tarafından çok hızlı bir şekilde genişletilir ve kasılır ve sonunda patlar. Damlacıklar mikro kabarcıkların patlaması ile meydana gelen şok dalgasıyla sıvı yüzenden koparak ayrılır. Yapılan gözlemler kavitasyonun, sıvı üzerinde sis damlacıkları yaratmak için yeterli enerjiye sahip olduğunu göstermiştir (Wood and Loomis 1927, Eknadiosyants 1968).

İkinci teori ise kılcal dalga teorisidir. Yüksek frekanslı ultrasonik ses dalgaları sıvının üzerinde durgun olmayan salınımlar oluşturur. Kılcal dalga teorisi, durgun olmayan bu salınımların sıvı yüzeyinden uzaklaştığı, pik noktasında parçalanarak sıvıdan ayrılan damlacıkların nano boyutlu sis bulutu oluşturduğu söylemektedir. Bu nedenle üretilen damlacıkların boyutu, kılcal dalga teorisinde dalga boyuna bağlıdır. Ultrasonik dalganın frekansı arttıkça kılcal dalga boyu azalır. Bu nedenle yüksek frekanslarda daha iyi sis bulutu üretilir. Kılcal dalgaların dalga boyu kelvinin denklemi (1) ile hesaplanabilir (Çiçekdağı 2011).

$$\lambda = \left( \frac{8 \pi T}{\rho F^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

(1)

Bu denklemde,  $\lambda$  kılcal dalganın dalga boyu (cm),  $T$  sıvının yüzey gerilimi (dyne/cm),  $\rho$  sıvının yoğunluğu (g/ml),  $F$  ultrasonik frekans (Hz) göstermektedir. Lang çalışmalarında 10-800 kHz frekanslar için, ultrasonik olarak üretilen damlacıkların ortalama çapı (CMD), dalga boyu ( $\lambda$ ) ile orantılı olduğunu söylemektedir ve korelasyon (2) önermektedir (Çiçekdağı 2011).

$$D_p = 0,34\lambda \quad (2)$$

Burada  $D_p$  oluşan sisin ortalama damlacık çapını (cm) ifade etmektedir. Böylelikle oluşan sisin ortalama damlacık çapı ile ultrasonik frekans arasındaki ilişki Lang denklemi (3) ile aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Çiçekdağı 2011).

$$D_p = 0,34 \left( \frac{8 \pi T}{\rho F^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

(3)

Denklemden de anlaşılacağı gibi damlacık boyutları üzerinde ultrasonik frekansın etkisi büyüktür. Fakat Lang denklemdeki gözlemler, damlacık boyutlarının optik olarak ölçümlerinin karşılaştırılmasından elde edilen bir sabit sayı içermektedir. Bu nedenle damlacık bulutu mikroskopta görülemeyecek kadar küçük damlacıklar içeriyorsa, damlacık boyutunun doğru tahmini mümkün olmayabilir (Çiçekdağı 2011).

Ultrasonik boyutta damlacık üretmek için farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı mikron ve mikron altı damlacık üretmek için yapılan ultrasonik jeneratörler iken, diğer bir kısmı da üretilen mikron veya nano boyutu damlacık boyutlarının doğru ölçülmesi üzerine yapılan çalışmalardır (Çiçekdağı 2011).

Yanma, püskürtme özelliklerine duyarlıdır. Mevcut spreyler mükemmel bir yanma için ideal değildir. Klasik enjeksiyonlu sistemlerde sprey gerçek zamanlı bir olay olduğu için, hız ve yük aralığı üzerinden optimizasyon zordur, soğuk ve ağır yüklü çalışma sırasında silindir cidarının ıslanması HC emisyonlarına neden olur. Soğukta motoru ilk çalıştırma sırasında yakıt zenginleştirilmesine

ihtiyaç duyulur. Karbüratörlü yakıt sistemine sahip motorlarda önemli ölçüde daha yüksek NOx emisyonları oluşur.

Bu çalışma, buji ile ateşlemeli motorların hava yakıt karışımı hazırlama sistemlerine alternatif yeni bir yöntem olarak ultrasonik atomizer kullanımının egzoz emisyonları üzerine etkilerini belirlemek üzere yapılmıştır. Önce yakıt, yüksek frekanslı ses dalgası ile atomize edilerek, atomizasyon performansı belirlenip yakıt atomizasyonu için en uygun frekans tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada buji ateşlemeli tek silindirli karbüratörlü bir motorda esas bir değişiklik yapmadan enjeksiyonlu ve ultrasonik yakıt sistemleri ile çalışması sağlanmıştır. Yakıt sistemini motora uygulamak ve sistemin konfigürasyonunu gerçekleştirmek yeterli olmuştur. Ultrasonik yakıt sistemi kullanılarak GDİ motorlarından daha küçük yakıt atomizasyonu (12 mikron) ile homojen hava/yakıt karışımı sağlamak ve egzoz gazı emisyonlarının düşürülmesi amaçlanmıştır. Ultrasonik yakıt sisteminin soğuk çalıştırma sırasında yakıt zenginleştirmeden çalışma potansiyeline sahip olduğu öngörülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ultrasonik atomizerin, içten yanmalı motorların yakıt sistemine alternatif olarak kullanımı araştırılmıştır. Bu amaçla Piezoelektrik seramik transducer içeren 1.6 MHz frekanslı ultrasonik atomizer tasarlanıp üretilmiştir. Ultrasonik atomizer karbüratörlü tek silindirli bir motorun yakıt sistemine uygulanmıştır. Ultrasonik atomizerin oluşturduğu sis bulutunun içerdiği damlalar yüksek çözünürlüklü dijital mikroskoplar tarafından fotoğraflanıp görüntü işleme yöntemiyle damlacık boyutları hesaplanmıştır. Ultrasonik jeneratörün frekansı ayarlanarak ortalama yakıt damlacık çapının 12 mikron civarında olması sağlanmıştır. Testlerde Şekil 1'de görülen 4 zamanlı, tek silindirli, karbüratörlü, buji ateşlemeli bir motor kullanılmış olup teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Kama By Reis KGP20 motor

**Çizelge 1.** Deney motoru özellikleri

Motor Tipi	4 Zamanlı tek silindirli karbüratörlü benzin motoru
Çap X Strok	68 x 45 mm
Silindir Hacmi	163 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma Oranı	9,0 : 1
Net güç	3,6 kW (4,8HP) / 3600 rpm
Max. Net Tork	10,3 Nm / 1,05 kgfm / 2500 rpm
Ateşleme Sistemi	Manyetik ateşleme
Çalışma Şekli	Marş motoru /el ile
Yakıt deposu kapasitesi	3,1 lt.
Yakıt tüketimi	1,4 lt/h
Yağ Kapasitesi	0,6 lt.
Boyutlar(L x W x H)	312 x 362 x 346 mm
Motor Gücü	5,5 HP
Ağırlık	24 kg.
Yakıt Tipi	Kurşunsuz Benzin

Deney motorunu yüklemek için kullanılan su pompası, motor seviyesindeki su deposundan çektiği suyu 3,5 m yüksekliğindeki su deposuna basmaktadır. Bu sayede motorun sabit bir kısmı yük altında çalışması sağlanmıştır. Motor 1500-3000 1/dak devir aralığında üç farklı yakıt sistemi ile çalıştırılıp egzoz gazı emisyonları ölçülerek karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda Bosch BAE 350 marka egzoz analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz hem dizel motor egzoz emisyonlarını hem de buji ateşlemeli egzoz emisyonlarını ölçebilmektedir. Cihazın görüntüsü Şekil 2'de, benzin ölçüm modunda ölçebildiği emisyonlar ve hassaslık derecesi çizelge 2'de verilmiştir.

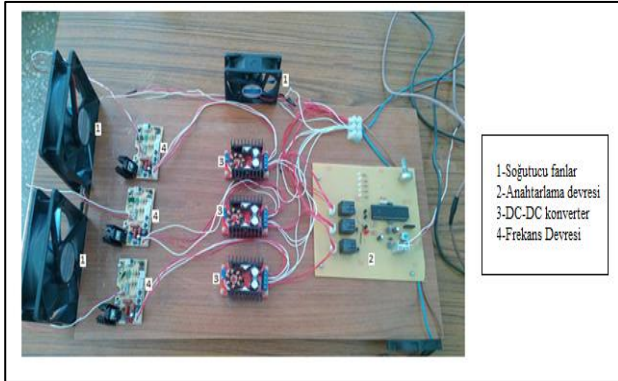


Şekil 2. Bosch BEA 350 egzoz emisyon analiz cihazı

Çizelge 2. Bosch BAE 350 Benzin modu emisyon değerleri ve hassasiyeti

Emisyon	Ölçüm Aralığı	Hasasslık
CO	0,000–10,00 %vol	0,001%vol
CO2	0,00–18,00 %vol	0,01 %vol
HC	0–9,999 ppm vol	1 ppm vol
O2	0,00–22,00 %vol	0,01 %vol
$\lambda$	0,500–9,999	0,001
NO	0–5000 ppm vol	<=1 ppm vol

Şekil 3’de Ultrasonik yakıt sistem elemanları görülmektedir. Ultrasonik atomizer pasif durumda iken motor klasik karbüratörlü yakıt sistemi ile çalışmaktadır. Bu durumda yakıtın tamamı sıvı haldedir ve yakıt karbüratör ve emme manifoldunda hava ile karışarak buhar formuna dönüşmektedir.



Şekil 3. Ultrasonik yakıt sistemi generatör devresi

Ultrasonik yakıt sistemi dönüşümü yapmak için karbüratörlü sistemin karbüratör çanağı ve yakıtın geçtiği şamandıra iğnesi sökülüp, yerine ultrasonik atomizasyonun yapıldığı yakıt deposu bir hortum ve vana ile bağlanmıştır. Motorun hava yakıt oranları bu vanalar yardımıyla ayarlanmaktadır. Ultrasonik

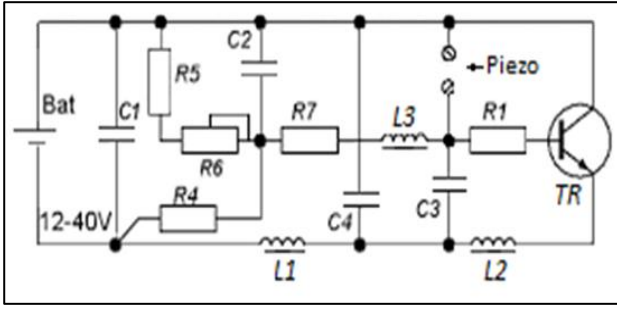
yakıt sisteminde parçalanmış yakıt vakum etkisiyle çekilmekte ve emme manifoldunda hava ile karıştırılarak silindire gönderilmektedir.

Ultrasonik atomizerin jeneratör devresine enerji verildiğinde sistem aktif duruma geçmektedir. Aktif durumda depoda bulunan yakıtın bir kısmı sis bulutuna dönüşüp yakıt deposunun üst kısmında toplanmakta, yakıt karbüratöre buhar fazında gönderilmektedir. Şekil 4’de atomizerin aktif ve pasif durumları için depodaki yakıt görülmektedir. Ultrasonik generatör 1,6 Mhz frekans üretebilen 180 W gücünde olup 12 V batarya gerilimi ile çalışmaktadır. Maksimum frekans ile çalışma durumunda sistem 72 A akım çekmektedir.



Şekil 4. Atomizerin aktif ve pasif durumları için depodaki yakıtın görünüşü

Şekil 5’de Frekans devresi üzerinde görülen açma kapama anahtarı açık konuma geçtiği anda 12 V DC gerilimi, giriş soketi üzerinden sistemi aktif duruma geçirir. Bu durumda mikro işlemci tarafından aküden gelen 12 V’ luk gerilimi kontrol eden birinci röleye akım gönderilerek rölenin açık konuma geçmesi sağlanır. 12 V’ luk akü gerilimi yükselteç devresinin giriş soketinden sisteme giriş yapar. Yükselteç devresinde gerilim önceden ayarlanmış olan 30 V’a çıkarılarak frekans devresine gönderilir. Ultrasonik atomizerin elektronik frekans devresi basit olup sistemde sadece bir transistör kullanır. sistemdeki R6 potansiyometre veya trimpot, ultrason frekansını ayarlar. Besleme, 12 ila 40 Voltluk bir pil ile yapılabilir.



Şekil 5. Frekans devresinin şematik gösterilişi

Frekans devresine gelen 30 V' luk gerilim 1,6 MHz frekansa çevrilerek AC dalga şeklinde piezoelektrik seramik transducer üzerine gönderilir. Yüksek frekans, ses osilatörü olarak görev yaparak tek taraflı darbeler oluşturur. Böylece transducer üzerinde mekanik titreşimler oluşturularak ultrasonik ses dalgası üretilir. Deney motorunu enjeksiyonlu sistemine dönüştürmek için, Howdytubor marka tek silindirli motorlar için üretilen enjektör kiti tedarik edilmiştir. Motordan karbüratörün takılı olduğu kısım sökülerek yerine enjektör sistemi takılmıştır. Şekil 6'da sistemin tüm parçaları gösterilmiştir. Enjeksiyon sisteminin gaz kelebeği gövdesi, karbüratörün yerine monte edilmiş, üzerine hava filtresi, enjektör ve entegre sensör (TPS, MAP, MAT) takılmıştır.



Şekil 6. Enjeksiyon sistemi parçaları

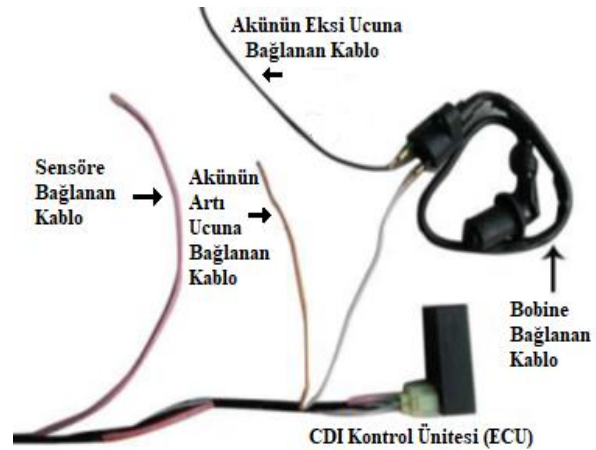
Yakıt basıncını yükseltmek için yakıt pompası kullanılmıştır. Pompa üzerinde bir basın regülatörü bulunmakta ve yakıt basıncı 3 bara ayarlanmaktadır (Şekil 7). Yakıtı püskürtmek atomizasyonu sağlamak için emme manifolduna sistemin bir parçası olan enjektör yerleştirilmiştir. Enjeksiyon sisteminde kullanılan elektronik ateşleme sistemi şekil 8'de gösterilmiştir. Sistemde primer ve sekonder sargılar

ve direkt bujiye bağlanabilen buji kablosu görevi yapan başlıklar kullanılmaktadır. Sistemdeki ECU motorun o anki çalışma koşullarına göre en uygun ateşleme avansını belirleyerek, bobinin primer devre akımını keser ve bobinin sekonder devresinde yüksek gerilimin oluşmasını sağlar. Ateşleme zamanlaması volan üzerinde bulunan manyetik sensör üzerinden alınır.

Ayrıca sistemde kullanılan oksijen sensörü ve Emme manifoldu basıncını ölçmek için MAP (Mutlak basınç) kullanılmıştır. Sensör verileri ile ECU tarafından ateşleme avansı, hava/yakıt oranı ve yakıt enjeksiyon miktarı ayarlanır. Pickup sensörü (Manyetik devir sensörü) volanın hareketiyle oluşan manyetik alan değişimini algılar ve devri belirleyerek ECU'ya bildirir.



Şekil 7. Yakıt pompası



Şekil 8. Elektronik ateşleme sistemi (CDI)

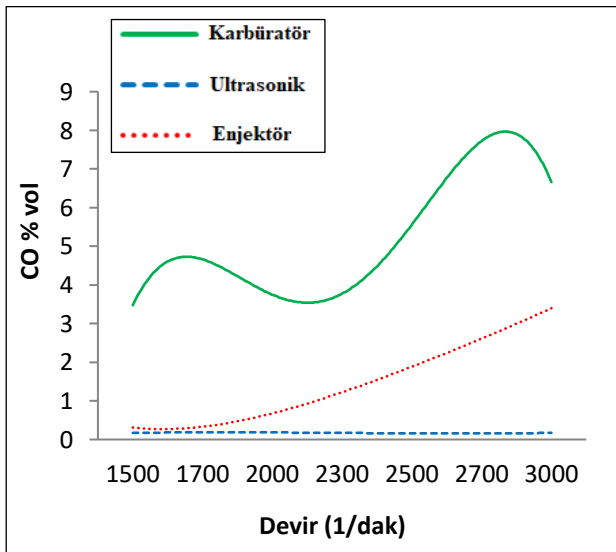
Motorun püskürtmesi gereken yakıt miktarını ve ateşleme zamanını ECU belirler. Bu zamanlamayı mükemmel hale getirmek için motordan gelen tüm sinyalleri yazılımla değiştirilebilir. Enjektör sistemini deney motoruna uygun hale getirmek ve ECU'ya müdahale etmek için sistemle birlikte EFITune 2.25 ara yazılım programı alınmıştır.



### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. CO Emisyonları

CO emisyonları eksik yanma ürünüdür (Rayleigh 1945). Şekil 9’ da farklı yakıt sistemlerine ait CO emisyon değerleri grafik olarak gösterilmiştir. Karbüratörlü sistem için CO emisyonları düşük devirlerde düşük, devir yükseldikçe arttığı 2000-2300 1/dak devir aralığında minimum değerini aldıktan sonra devir artışı ile tekrar yükseldiği görülmektedir. Düşük devirlerde volümetrik verimin düşük olması yanında hava hareketlerinin zayıf olması nedeniyle CO emisyonlarının yüksek çıktığı söylenebilir. Devir arttıkça volümetrik verimin artması, hava hareketlerinin yükselmesi neticesinde daha homojen bir karışım hazırlandığı buna bağlı olarak yanmanın iyileştiği, sonuçta CO emisyonlarının azaldığı düşünülmektedir. İçten yanmalı motorlarda yanma koşullarının en iyi olduğu devir sayısı aralığı bulunmaktadır. Deney motoru, karbüratörlü yakıt sistemi ile çalıştırıldığında, 2000-2300 1/dak devirleri arasında en ideal çalışma koşullarının sağlandığı anlaşılmaktadır. Yüksek devirlerde CO emisyonunun artması, kimyasal reaksiyonlar ve yanma için yeterli zaman olmayışının doğal sonucudur.



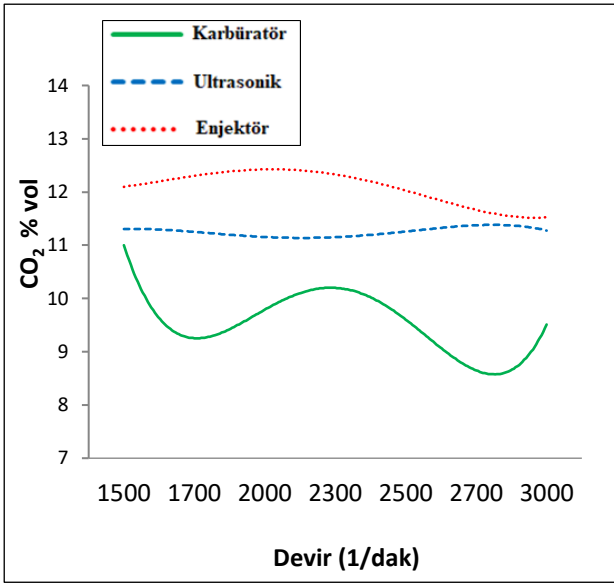
Şekil 9. Farklı yakıt sistemlerine ait CO emisyonları

Buji ateşlemeli motorlarda kimyasal reaksiyon ve yanma hızının en yüksek olduğu karışım oranının stokiyometrik karışım olduğu bilinmektedir. Ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında bütün çalışma koşullarında stokiyometrik karışım

hazırlanabilmekte ve hava fazlalık katsayısı sabit tutulabilmektedir. CO emisyonlarının çok düşük ve devir sayısı ile değişmemesinin bütün motor devirlerinde stokiyometrik karışım hazırlamanın doğal bir sonucu olduğu söylenebilir (Gottuk and Lattimer 2016, Çelik vd. 2015). Ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında CO emisyon değerlerinin sifıra yakın olduğu ve devir sayısı ile değişmediği görülmektedir. Ultrasonik yakıt sisteminin oluşturduğu rezonans etki ile yakıtın bağ yapısının zayıflayıp daha küçük parçalara ayrılarak yanmanın hızlandığı, yanmanın iyileşmesinin bir sonucu olarak CO emisyon değerlerinin düştüğü söylenebilir. Maksimum CO emisyon değerleri karşılaştırıldığında ultrasonik sistemin CO değerinin enjektörlü ve karbüratörlü sisteme göre yaklaşık %99 azaldığı görülmektedir.

#### 3.2. CO<sub>2</sub> Emisyonları

Tam yanma ürünü olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) yanma kalitesinin bir göstergesi olarak değerlendirilir. CO<sub>2</sub> tam yanmanın doğal bir sonucu olsa da, çevreye salınan diğer zararlı gazlarda olduğu gibi yanma ürünleri içerisinde düşük olması istenir (Tanyeri 2015). Stokiyometrik hava/yakıt oranı yüksek olan yakıtlar yakıldığında CO<sub>2</sub> salınımı daha fazladır. Şekil 10’ da üç yakıt sistemi için CO<sub>2</sub> emisyon salınımı grafik olarak verilmiştir. Karbüratörlü sistemde yanmanın enjektörlü ve ultrasonik yakıt sistemlerine göre daha kötü olduğu söylenebilir. Karbüratörlü yakıt sistemi kullanıldığında, 2000-2400 1/dak devir aralığında yanmanın, düşük ve yüksek devirlere göre daha iyi olduğu, buna bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı görülmektedir. Yakıt parçalanıp küçüldükçe daha homojen bir karışım oluşur, oksijenle temas yüzeyi artarak yanma hızlanır (Groff 2016).



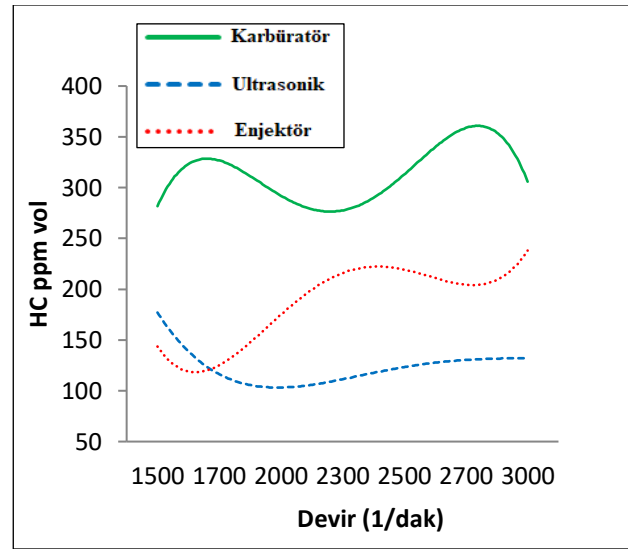
Şekil 10. Farklı yakıt sistemlerine ait CO<sub>2</sub> emisyonları

Ultrasonik yakıt sistemi ile çalışmada CO<sub>2</sub> emisyonunun motor devir sayısı ile değişmediği görülmektedir. CO<sub>2</sub> değerlerindeki bu kararlılık, ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında yakıt atomizasyonu ve karışım homojenliğini motor devir sayısının etkilemediğinin bir kanıtı olarak ileri sürülebilir. Enjeksiyonlu ve ultrasonik yakıt sistemleri kullanıldığında CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin motor devrine göre değişim trendlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Motor 2300 1/dak devirde çalışırken üç yakıt sisteminde maksimum CO<sub>2</sub> oluşmaktadır. Ultrasonik yakıt sistemi ile çalışmada CO<sub>2</sub> emisyonunun karbüratörlü sisteme göre % 10 daha fazla, enjeksiyonlu yakıt sistemine göre % 12 daha düşük olmaktadır. 2700 1/dak motor devrinde ultrasonik yakıt sistemi ile enjeksiyonlu yakıt sisteminin CO<sub>2</sub> değeri arasında kayda değer bir değişim olmadığı, ultrasonik ve enjektörlü sistemin karbüratörlü sisteme göre CO<sub>2</sub> değerinde yaklaşık % 35 artış olduğu görülmektedir.

### 3.3. HC Emisyonları

Hidrokarbonlar (HC) yakıtın kimyasal yapısını oluştururlar ve yanma sırasında oksijenle reaksiyona girerek ısı enerjisi üretirler. Teorik olarak hesaplanan yanma olayında yanma sonu ürünleri arasında HC bulunmaz. Bu durum yanmanın %100 verimle gerçekleştiği anlamına gelir Fakat gerçekte yanma verimi hiçbir zaman %100 gerçekleşmez ve yanma sonu ürünleri

arasında HC'na rastlamak çok olasıdır. Yani motor silindirene alınan yakıt moleküllerinin bir kısmı yanmadan HC emisyonu olarak egzozdan atılırlar (Li et al. 2016). Motordan çıkan hidrokarbon emisyonlarının ana kaynağı, yakıt-hava bulutunun aşırı zayıf kenarlarındaki alevin söndürülmesinden kaynaklanmaktadır. Aşırı zayıf karışım kısımları, sönerken HC emisyon sorununa neden olur. Şekil 11'de üç yakıt sistemi için egzoz gazı emisyonlarının motor devri ile değişimi gösterilmiş olup en düşük HC emisyon değerleri ultrasonik yakıt sisteminde olduğu görülmektedir. En yüksek HC emisyonu motor 2800 1/dak ile çalışırken karbüratörlü yakıt sisteminde oluşmaktadır.



Şekil 11. Farklı yakıt sistemlerine ait HC emisyonları

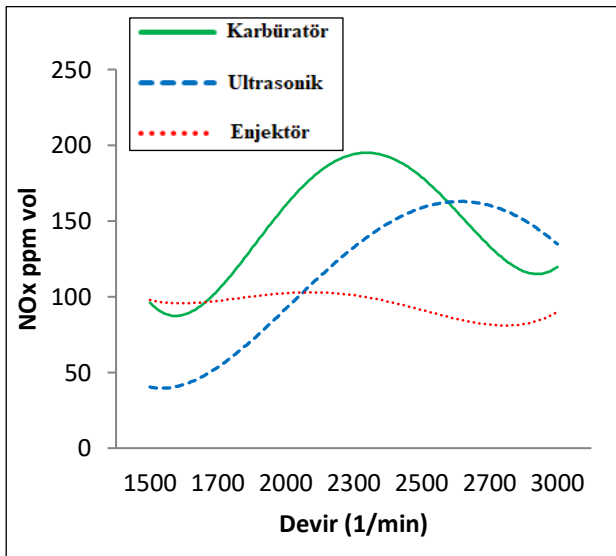
Üç yakıt sistemi ile çalışmada en yüksek HC emisyonları karşılaştırıldığında; ultrasonik yakıt sistemi HC emisyonunun karbüratörlü sisteme göre % 60, enjeksiyonlu yakıt sistemine göre % 45 daha düşük olduğu görülmektedir. Ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında HC emisyonlarının devir sayısı ile fazla değişmemesi bütün devirlerde yanma prosesinin kararlı olduğunu göstermektedir. CO ve CO<sub>2</sub> emisyonunun kararlı ve düşük çıkması da bu fikri desteklemektedir. Enjektörlü yakıt sistemi ile çalışmada ultrasonik yakıt sistemine göre HC emisyonlarının daha fazla olduğu ve devir sayısı ile arttığı görülmektedir. Yük altında devir sayısının artması yakıt tüketimini de artırmaktadır. Fazla yakıtın yanması için daha fazla zamana ihtiyaç duyulur. Devir sayısının yükselmesi ile tam yanma için ihtiyaç duyulan zaman yetersiz kalmaktadır.



Sonuçta yetersiz yanmanın HC emisyonlarını artırdığı söylenebilir. Karbüratörlü yakıt sisteminde, motorun orta devirlerde çalışması durumunda HC emisyonları düşmektedir. Orta devirlerde CO<sub>2</sub> nin yüksek CO nun düşük çıkması yanmanın daha iyi olduğunun bir kanıtı olarak ileri sürülebilir. Ultrasonik yakıt sisteminde HC emisyonunun karbüratörlü ve enjeksiyonlu yakıt sistemlerine göre daha kararlı olduğu görülmektedir. Ultrasonik yakıt sisteminde yakıt atomizasyonu ve karışım hazırlamanın motor devir sayısı ile fazla etkilenmediği söylenebilir.

### 3.4. NOx Emisyonları

Buji ateşlemelilerde NOx önemsiz bir kirlenici emisyonudur. Motordan çıkan nitrik oksit emisyonlarının ana kaynağı hava içerisindeki azottur. Yanma odası içindeki yerel bölgelerde stokiyometrik yanma sırasında meydana gelen yüksek sıcaklıklarda oluşur. İçten yanmalı motorlarda reaksiyon sıcaklığı yükseldikçe NOx emisyonları da artar (Aydın vd. 1999, Haşımoğlu vd. 2002). Şekil 12’de farklı yakıt sistemlerine ait NOx emisyon değerleri grafik olarak verilmiştir. Buji ateşlemeli motorların genel emisyon karakterine uygun olarak üç sistemde de NOx emisyonları oldukça düşük çıkmıştır.



Şekil 12. Farklı yakıt sistemlerinin NOx emisyonları

Üç yakıt sistemi içerisinde en yüksek NOx emisyon sonuçları karbüratörlü yakıt sisteminde en düşük sonuçlar ise enjektörlü yakıt sisteminde olduğu görülmektedir. Üç yakıt sisteminde de düşük motor devirlerinde NOx emisyonlarının düşük olduğu,

devir artışı ile karbüratörlü yakıt sistemi ve ultrasonik yakıt sistemi kullanımlarında NOx değerinin arttığı belirli bir devirden sonra tekrar düştüğü görülmektedir. Karbüratörlü sistemde maksimum NOx 190 ppm olup 2300 1/dak devirde, ultrasonik yakıt sisteminde maksimum NOx 155 ppm olup 2600 1/dak devirde meydana gelmektedir. Enjeksiyonlu yakıt sistemi kullanıldığında ise 100 ppm civarında olduğu ve devir artışı ile kayda değer bir değişim olmadığı görülmektedir. Maksimum NOx emisyonları dikkate alındığında ultrasonik yakıt sisteminde karbüratörlü sisteme göre %18 azalma, enjeksiyonlu yakıt sistemine göre %55 artış olmaktadır. Karbüratörlü çalışmada orta motor devirlerinde CO ve HC nin düşük CO<sub>2</sub> nin yüksek olması, orta motor devirlerinde yanmanın daha iyi olduğu buna bağlı olarak daha yüksek sıcaklıklara çıktığı anlaşılmaktadır. Orta devirlerde NOx in yüksek çıkmasının, yanma sıcaklığının yüksek olmasının bir sonucu olduğu şeklinde açıklanabilir. Ultrasonik yakıt sisteminde CO, CO<sub>2</sub> ve HC değerlerinin değişmediği, bu açıdan bakıldığında NOx değerinde de bir değişim olması beklenilmez. Ancak yük altında motor devri arttığında her çevrimde tüketilen yakıt miktarı artmakta ve yanma odası sıcaklığı yükselmektedir. NOx değerindeki artış bu sıcaklık yükselmesi ile ilişkili olduğu söylenebilir.

### 4. Sonuçlar

Karbüratörlü buji ateşlemeli bir motorda, egzoz emisyon değerlerini düşürmek amacıyla enjektörlü yakıt sistemi ve ultrasonik atomizer sistemi geliştirilip kullanılmıştır emisyon sonuçları aşağıya çıkarılmıştır.

CO emisyon değerlerine bakıldığında ultrasonik yakıt sisteminin CO emisyonları sifıra yakın değerlerde olduğu ve devir arttıkça kayda değer bir değişiklik göstermediği görülmüştür. Çalışmada kullanılan üç yakıt sistemi karşılaştırıldığında en iyi sonuçlar ultrasonik sistemde en kötü sonuçlar karbüratörlü yakıt sisteminde olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik yakıt sistemi ve enjeksiyonlu yakıt sistemi ile çalışmada CO<sub>2</sub> emisyon değerlerinin yüksek ve birbirine yakın olduğu, karbüratörlü yakıt sisteminde ise daha düşük olduğu görülmüştür.

Ultrasonik yakıt sistemi kullanıldığında yanmanın iyileşmesi sonucu HC emisyon değerlerinin karbüratörlü yakıt sistemine göre oldukça düşük çıktığı görülmüştür.

NO<sub>x</sub> emisyon sonuçlarına bakıldığında en yüksek değerler karbüratörlü yakıt sisteminde en düşük değerler ise enjektörlü yakıt sisteminde olduğu görülmüştür. Ultrasonik yakıt sistemi ve karbüratörlü yakıt sistemi kullanıldığında devir yükseldikçe NO<sub>x</sub> değerlerinin arttığı, enjektörlü yakıt sistemi kullanıldığında kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür.

## 5. Kaynaklar

- Aydın, Ö., Köse, R., & Ceylan, N. 1999. Benzinli Motorlarda Egzoz Emisyonlarını Azaltma Kriterleri. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, **001**) 205-214.
- Batmaz İ., 1996. Experimental Investigation of the Relation Ship Between the Vehicle Speed and Fuel Economy. *Ph. D. Thesis, Gazi University Institute of Science and, Ankara/TURKEY*.
- Çalışkan, Z. D., Kurt, Ü., & Timur, M. C. 2017. İklim Değişikliği ve Ulaşım Sektörü İlişkisinin Ekonometrik Analizi: Türkiye Örneği. *International Congress of Energy, Economy and Security Proceedings ENSCON'17* (p. 78).
- Çelik, M. B., & Ozdalyan, B. 2010. Gasoline direct injection. *Fuel Injection*, 1-17.
- Çelik, M., Solmaz, H., & Yücesu, H. S. 2015. Pamuk Metil Esterine N-Heptan Katkısının Motor Performansı Ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **30(3)**.
- Çiçekdağı, F. 2011. Ultrasonik Ses Dalgalarının Oluşturduğu Akustik Kaviteyi Etkileyen Değişkenler Ve Kavite Enerjisi Ölçümü (Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 101.
- Eknadiosyants O. K. 1968. Role of cavitation in the process of liquid atomization in an ultrasonic fountain. *Sov Phys Acoust* **14**: 80–84.
- Geiger J, Grigo M, Lang O, Wolters P. and Hupperich P. 1999. Direct Injection Gasoline Engines. *Combustion and Design* **1999**, 01-0170.
- Gottuk D. T. and Lattimer B. Y. 2016. Effect of combustion conditions on species production. *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer New York 486-528.
- Groff E. G. 2016 Automotive Direct-Injection Stratified-Charge Engine Development in the 1970-1980's. *SAE Technical*, No. 2016-01-0175.
- Haşimoğlu, C., İçingür, Y., & Ögüt H. 2002. Dizel motorlarında egzoz gazları resirkülasyonunun (EGR) motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi. *Turkish J. Eng. Env. Sci*, **26**, 127-135.
- Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T., & Ando, H. 1997. Development of gasoline direct injection engine. *SAE transactions*, 777-793.
- Liao, S., Wang, F., Wu, T., & Pan, W. 2016. Crude oil price decision under considering emergency and release of strategic petroleum reserves. *Energy*, **102**, 436-443.
- Li, Y. H., Chen, G. B., Wu, F. H., Hsieh, H. F., & Chao, Y. C. 2016. Effects of carbon dioxide in oxy-fuel atmosphere on catalytic combustion in a small-scale channel. *Energy*, **94**, 766-774.
- Neppiras, E. A. 1980. Acoustic cavitation. *Physics reports*, **61(3)**, 159-251.
- Ohsuga, M., Shiraishi, T., Nogi, T., Nakayama, Y., & Sukegawa, Y. 1997. Mixture preparation for direct-injection SI engines. *SAE transactions*, 794-801.
- Postrioti, L., Cavicchi, A., Paolino, D., Guido, C., Parotto, M., & Di Gioia, R. 2016. An experimental and numerical analysis of pressure pulsation effects of a Gasoline Direct Injection system. *Fuel*, **173**, 8-28.
- Rayleigh W. J. S. 1945. The Theory of Sound. Vol. 2, *Dover Publications*, **344**.
- Sagar A. D., 1995. Automobiles and global warming: Alternative fuels and other options for carbon dioxide emissions reduction. *Environmental Impact Assessment Review* **15.3**: 241-274.
- Salman, S., Çınar, C., & Sekmen, Y. 2003. Buji İle Ateşlemeli Motorlarda Tek Nokta Yakıt Enjeksiyon Ve Karbüratör Sistemlerinin Performansa Etkileri Üzerine Deneysel Bir Araştırma. *Politeknik Dergisi*, **6(1)**, 391-395.
- Scholar U. G. 2016. Fuel Vapour System for SI Engine Using Bubble Creation Method. *International Journal of Engineering Science*, **2770**.
- Song, H., Xiao, J., Chen, Y., & Huang, Z. 2016. The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector. *Fuel*, **180**, 506-513.

- Tanyeri, B. 2015. Benzinli bir motorda ultrasonik atomizer kullanımının motor performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisinin deneysel incelenmesi Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 122.
- Twig, M. V. 2003. Vehicle emissions control technologies. *Platinum Metals Review*, **47(1)**, 15-19.
- White, D. L. 1962. Amplification of ultrasonic waves in piezoelectric semiconductors. *Journal of Applied Physics*, **33(8)**, 2547-2554.
- Wood R. W, Loomis A. L. 1927. The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, **4(22)**, 417-436.
- Zhang, G., Qiao, X., Miao, X., Hong, J., & Zheng, J. 2012. Effects of highly dispersed spray nozzle on fuel injection characteristics and emissions of heavy-duty diesel engine. *Fuel*, **102**, 666-673.
- Zhao F. Q, Lai M.C., Harrington D. L. 1999. Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines. *Progress in Energy and Combustion Science* **25**, 437-562.

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 055903 (1225-1237)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 055903 (1225-1237)

DOI: 10.35414/akufemubid.1108677

Araştırma Makalesi / Research Article

# AISI 1040 Malzemesinin Yüksek Performanslı Otonom Daire Testere Makinesi ile Kesiminde Kesme Parametrelerinin Talaş Sıcaklığına Etkisi

Seda YILDIZ<sup>1</sup><sup>1</sup>Kar Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, Sakarya.<sup>1</sup>Sorumlu yazar e-posta: sedayildizsau@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5828-4486>

Geliş Tarihi: 26.05.2022

Kabul Tarihi: 18.10.2022

## Öz

Testere çeşitli endüstrilerde, özellikle ikincil işlemler için hammaddeyi kesmesi gereken çelik tedarikçilerinde önemli bir birincil işlemdir. Şerit testere ve demir testeresine göre daha yüksek özelliklere göre üretilen, çevresine yerleştirilmiş çok sayıda kesme dişlerine sahip dairesel bir testere plakasından (daire testere gövdesi) oluşan dairesel testere bıçakları yüksek derecede boyutsal doğruluk gerektiren endüstriyel kesme işlemleri için kullanılmaktadır. Talaşlı imalatta harcanan gücün neredeyse tamamı ısıya dönüşmektedir. Kesme işleminde testere bıçağı, sürtünmeden kaynaklanan ısı ile ısınır. Kesme sırasında oluşan sıcaklıkların ölçülmesi oldukça zahmetli bir iştir, termal kameralar bu zahmetli iş için en gelişmiş araçlar olarak öne çıkmaktadırlar; ancak bu gelişmiş teknolojilerin kesme tezgâhları ile bütünleşmesi için hala araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu çalışmada kesme parametrelerinin talaş sıcaklığı açısından optimizasyonu amaçlanmıştır. Çalışmada iki seviyeli dört farklı parametre seçilmiştir. Çalışma parçası olarak endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 1040 tercih edilmiştir. Kesme deneyleri Taguchi metoduyla tasarlanmıştır. Yapılan deneyler sonunda kesim sıcaklığı talaşlar üzerinden alınan sıcaklıklar ile incelenmiştir. Sermet bıçak ile yapılan kesimlerde daha yüksek hızlara çıkması sebebiyle daha yüksek kesim sıcaklıklarına ulaşılmıştır.

### Anahtar kelimeler

Otonom Daire Testere Makinesi; Talaş Sıcaklığı; Taguchi Metodu; Kesim

## The Effect of Cutting Parameters on Chip Temperature in Cutting of AISI 1040 Material with a High Performance Autonomous Circular Saw Machine

### Abstract

Sawing is an important primary operation in various industries, especially in steel suppliers that need to cut raw material for secondary processes. Manufactured to a higher specification than band saws and hacksaws, circular saw blades consisting of a circular saw plate (circular saw body) with multiple cutting teeth located around it are used for industrial cutting operations that require a high degree of dimensional accuracy. Almost all of the power consumed in machining is converted into heat. In the cutting process, the saw blade is heated by the heat caused by friction. Measuring the temperatures during cutting is a very laborious task, thermal cameras stand out as the most advanced tools for this demanding task; however, research is still needed to integrate these advanced technologies with cutting machines. In this study, it is aimed to optimize the cutting parameters in terms of chip temperature. In the study, four different two-level parameters were selected. AISI 1040, which is widely used in the industry, was preferred as the working piece. Shear experiments were designed using the Taguchi method. At the end of the experiments, the cutting temperature was examined with the temperatures taken from the chips. Higher cutting temperatures have been achieved due to higher speeds in the cuts made with cermet blades.

### Keywords

Autonomous Circular Saw Machine; Chip Temperature; Taguchi Method; Cutting

## 1. Giriş

Hammaddeyi istenilen boyutlara getirmek için kullanılan testere makinelerinin endüstriyel imalat firmalarında yeri azımsanmayacak kadar çoktur. Şerit testere veya demir testeresi bıçaklarından daha yüksek özelliklere göre üretilen farklı tasarım versiyonlarına sahip dairesel testere, metal işleme şirketlerinde, şekillendirme işlemleriyle (haddeleme ve çekme gibi) üretilen malzemeleri işleme operasyonlarına tabi tutulmadan önce daha küçük parçalara kesmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek hız çeliği, dairesel testere bıçaklarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek boyutsal doğruluk ve iyi kalitede bir yüzey kalitesi kombinasyonu gerektiren kesim işlemlerinde tercih edilen daire testere yüksek hız çeliği gövde üzerine lehimlenmiş tungsten karbür ve sermet uçlar, takım tezgâhı minimum titreşimle çalıştığı ve kesici takım kalitesi ve geometrisi doğru seçildiği sürece yüksek üretim hızları sunabilmektedir. Talaşlı imalatta harcanan gücün neredeyse tamamı ısıya dönüşmektedir. Testere bıçağı, öncelikle dişlerin veya bıçağın yan yüzeylerinin iş parçası ile sürtünmesinden kaynaklanan ısı ile ısıtılır. Üretilen ısı daha sonra ortam havasına, iş parçasına, talaşlara ve testere bıçağının dişlerine dağıtılır. Kesme sırasında oluşan bu sıcaklıkların ölçülmesi oldukça zahmetli bir iştir, termal kameralar bu zahmetli iş için en gelişmiş araçlar olarak öne çıkmaktadırlar. Kesme hızı ve sıcaklığı arttıkça iş malzemesinin kesme dayanımının azalmasına bağlanmaktadır. Bununla birlikte, kesme hızındaki artış muhtemelen termal olarak etkinleşen takım aşınma mekanizmalarını hızlandıracaktır. Sıcaklığın işleme üzerinde kritik etkileri vardır: takım aşınmasını hızlandırır ve takım ömrünü kısaltır; iş parçasının, kesici takımın ve takım tezgâhının ısıl deformasyonuna neden olur ve bu da işleme hassasiyetini düşürür. Takım-talaş temas yüzeyindeki sıcaklığı ölçmek için birçok deneysel yöntem geliştirilmiştir.

Lu vd. (2021) kesme sıvısı koşullarında mikro dokulu dairesel testere bıçağı (TCS) ile 304 paslanmaz çelik boruların kesilmesi testleri gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma il, daire testere bıçağının aşınmasını azaltmak, işleme yüzeyi kalitesini iyileştirmek ve takımın ömrünü uzatmak için iyi bir referans sağlayabilir. Kesme konumu sıcaklığının ve daire testere bıçağının çevresinin daha yüksek olduğu görülebilir. Mikro dokulu katkılı bıçaklarda geleneksel bıçaklara göre daha düşük sıcaklık gözlenmiştir. Daha iyi yağlama ve soğutma sağlayan mikro dokular aracılığıyla alet-talaş temas alanına nüfuz eder ve böylece kesme sıcaklığını düşürür.

Bradbury ve Lewis (2000) kesilmesi zor bazı malzemelerin işlenmesinde kullanılan yüksek hızlı çelik daire testere bıçaklarının kesme performansını ve aşınma özelliklerini araştırmaktadır. Nimonic PK31 alaşımını ve AISI O1 takım çeliğini kesmek için yüksek bir özgül enerji gerekli olmuştur, bu da malzemeyi keserken ciddi takım aşınmasına ve maksimum 900°C sıcaklığa neden olmuştur. İşlenen duvarın yüzey pürüzlülüğü, kesici uç malzemesinden bağımsız olarak talaş kırıcı oluk geometrisi kullanan uçlarla kesim yaparken kesme hızı ve ilerleme hızından istatistiksel olarak etkilenmemiştir. Bununla birlikte, en iyi yüzey kalitesi talaş kırıcı kanallı sermet tarafından sağlanmıştır. Kesme öncesi ve sonrası dişlere sahip tungsten karbür kesici uç durumunda, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azaldı ve ilerleme hızı ile artmıştır. Mohammadpanah vd.(2017), çalışmasında testere kılavuzlarına veya kılavuzlarına monte edilebilen testere sapmasını gösterme olasılığı olan bir mikrofona, bir ivmeölçer, sıcaklık sensörü, bir akustik emisyon (AE) sensörü geliştirmiştir. Testere sıcaklığı, testere sapmasından daha yavaş değiştiğinden, sıcaklık sensörü besleme hızı kontrolü için kullanılmadığını ancak sensörün, yüksek kesim sapmasını uyararak, kılavuzların soğutma kapasitesini ve ısı üretiminin soğutma kapasitesine toplam oranını ölçmek için kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Sıcaklık sensörleri kesim sırasında daire testere sıcaklığının ölçülmesinin uygulanabilirliğini doğrulamıştır. Sıcaklık ölçümünün kılavuz yağlama etkinliği ve sistem yanlış hizalaması gibi sorunları izleyebildiğini ve tanımlayabildiğini göstermiştir. Basti vd. (2007) çalışmasıyla takım-talaş termokupl tekniği, gömülü termokupl tekniği, kızıl ötesi radyasyon ölçümü, metal mikro yapı ve mikro sertlik varyasyonunun ölçümü, termo duyarlı malzemelerin erime noktalarının kullanımı ve ince film sensör tekniği, saf platin filmin omik direncinin sıcaklıkla değişmesi gibi çalışmaları incelemiştir. İnce film sıcaklık sensörleri (TFT'ler) biçimindeki cihazlar, yazarlar tarafından yüksek sıcaklık ve basınç altında alet-talaş temas bölgesindeki sıcaklığı ölçmek için geliştirilmiştir. Nasir vd (2021) çalışmada, ahşap dairesel testere işleminde temaslı termokupl sıcaklık ölçümleri kullanılmış ve testere sıcaklığı, biri kesici kenara yakın diğeri bıçak merkezine yakın olmak üzere iki konumda izlenmiştir. Kesme derinliği, dönüş hızı ve ilerleme hızının takım sıcaklığı üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Kesme parametrelerinin takım sıcaklığını önemli ölçüde etkilediğini ve dönüş hızının bıçak sıcaklığı üzerinde en karmaşık ve doğrusal olmayan etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Testere kenarının sıcaklığı, kesici kenara daha yakın olduğu için testere gözünden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kesme faktörleri takım sıcaklığını oldukça etkilemiştir ve kesme derinliği ve ardından dönüş hızı testere sıcaklığı üzerinde en önemli etkiye sahiptir.

Karagüzel (2019) Ti6Al4V alaşımının tornalanması sırasında ortaya çıkan kesme sıcaklıkları hem deneysel hem de teorik olarak incelemiştir. Bu amaçla termal kamera ile kesme sıcaklıkları ölçülmüş ve ayrı bir deney düzeneği ile analizlerde kullanılan yayma katsayısı kalibre edilmiştir. Dhananchezian, (Dhananchezian 2021) kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak Inconel 600'ün tornalanması sırasında kesme hızının maksimum kesme bölgesi sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Ölçülen deneysel verilerden, kesme hızındaki artışın kesme noktasında ısı oluşumunu arttırdığı ve bunun da kesme bölgesindeki kesme sıcaklığını daha da arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde ise kesim hızının artmasıyla yüzey kalitesinin iyileştiği gözlenmiştir. Takımın iş parçası yüzeyi ile sürtünmesinin temas alanı nedeniyle sıcaklık artışı ile deformasyonda bir değişime uğradığı söylenebilmektedir. Hattori vd. (1999) dairesel testelerde yalnızca rölantideyken üretilen ve kesme başladığında kaybolan gürültüyü incelemiş, testere gövdesine açılan yarıklarla bu probleme çözüm aramıştır. Altan ve ark. (2003) çalışmalarında PP/TiO<sub>2</sub> kompozitlerin testere kesiminde çeşitli kesim parametreleri altında yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek için Taguchi yöntemi kullanılmış ve en uygun parametre setinin bulunması amaçlanmıştır. Chang ve Chen (2015) çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemine göre lazer şoku ile gerilmiş dairesel testere bıçağının germe stres alanı ve doğal frekansı, teorik analiz ve ölçülen sonuçlarla birlikte sistematik olarak analiz edilmiştir. Mikael vd. (2021) Mohs sertliği ve elastisite modülü dâhil olmak üzere dört ana fiziksel ve mekanik özelliği ile dairesel testere makinesinin iki çalışma parametresi incelenmiştir. Titreşimin modellenmesi testere prosesleri endüstriyel uygulamalar düşük maliyetli modeller için güvenilir bir sistem olmuştur ve fabrika yöneticilerinin bakım ve enerji maliyetlerini doğru bir şekilde tahmin etmelerini sağlamaktadır. Tilen vd (2014) kesme hızının ve bıçak destekleri arasındaki mesafenin tınlama fenomeni üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Metal şerit testere işleminde çatırtı olgusunun karakterizasyonu ele alınmıştır.

## **2. Materyal ve Metot**

Çalışma kapsamında deney malzemesi olarak endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 1040 tercih edilmiştir. Kesme deneyleri Taguchi metoduyla tasarlanmıştır. 2 adet L8 ortogonal dizisinde çalışma hazırlanmıştır. Deneyler esnasında kesilen parçaların talaş sıcaklıkları anlık olarak kaydedilmiştir.

**Çizelge 1.** Sermet bıçak için deney sisteminde kullanılan L8 Ortogonal Dizini

<i>Deney</i>	<i>Kesim Hızı (m/dk)</i>	<i>İniş Hızı(mm/dk)</i>	<i>Soğutma</i>
1	118,8	293	Hava
2	118,8	293	Yağ
3	118,8	322	Hava
4	118,8	322	Yağ
5	130,7	293	Hava
6	130,7	293	Yağ
7	130,7	322	Hava
8	130,7	322	Yağ

**Çizelge 2.** TCT bıçak için deney sisteminde kullanılan L8 Ortogonal Dizini

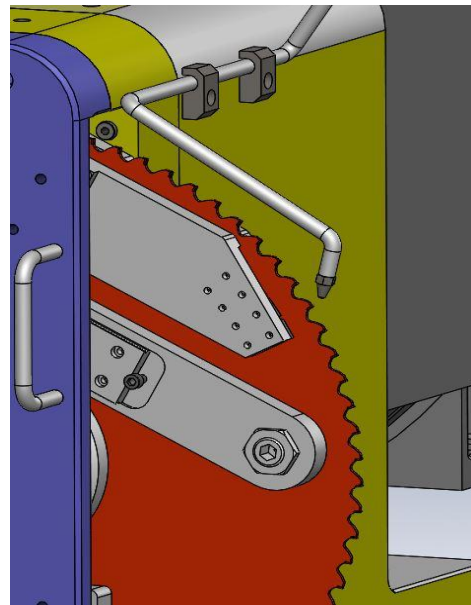
<i>Deney</i>	<i>Kesim Hızı(m/dk)</i>	<i>İniş Hızı(mm/dk)</i>	<i>Soğutma</i>
9	99	284,8	Hava
10	99	284,8	Yağ
11	99	313,4	Hava
12	99	313,4	Yağ
13	108,9	284,8	Hava
14	108,9	284,8	Yağ
15	108,9	313,4	Hava
16	108,9	313,4	Yağ

Kesimler Kar Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nin üretimini yaptığı son teknolojik otonom yüksek performanslı VORTEX daire testere makinesiyle yapılmıştır. Makine ana motor gücü 19 kW'dır. Makine uzaktan haberleşme özelliğine sahiptir. 13000 çeşit malzeme kütüphanesine sahiptir. Makine görseli Şekil 1' de gösterilmektedir. Soğutma yöntemlerinden yağ için kesme yağı kullanılmıştır. Çalışma esnasında hava basında 9-12 bar iken kesme yağ basıncı 4-6 bar arasındadır. Üfleme nozülünün bıçak üzerinde konumlandırılması Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Otonom yüksek performanslı Vortex daire testere makinesi.

Çalışmada kesim hızı ve iniş hızı parametreleri 1.seviye makine akıllı kesim modunda önerilen hız iken 2. Seviye 1.seviyenin %10 fazlası olarak seçilmiştir. Kesimlerde kesici takım olarak daire testere bıçak üreticisi Kinkelder firmasının sermet ve TCT (tungsten karbit uçlu) bıçakları kullanılmıştır. 60 diş sayısına sahip bıçakları sermet ve TCT bıçaklar farklı özellikleri sebebiyle farklı kesim ve iniş hızlarıyla çalışmaktadırlar. Sermet bıçaklar yüksek krater ve oksidasyon direnci, düşük sürtünme katsayısı ve termal iletkenlikle nispeten düşük yoğunluğa sahiptirler. Bununla birlikte sertlik derinliği yüksek ve termal direnci oldukça yüksek seviyededir. Tungsten karbür uçlu diş yapısına sahip testere özel bir dayanıklılık ve bıçak ömründe belirgin bir artış sağlamaktadır. Özellikle yüksek karbon içerikli malzeme kesimi için önerilmektedir. (Int Kyn. 1)



**Şekil 2.** Soğutma sistemi, nozülün konumu.





Şekil 3. Daire testere bıçağı.

Şekil 3’de deneylerde kullanılan daire testere bıçağının görseli verilmiştir. Deney sırasında kesme sıcaklığı UTi165A marka termal kamera yardımıyla ölçülmüştür. (Şekil 4) Emisyon değeri varsayılan olarak ayarlanan 0,95’dir. Termal kamera ile ölçümlerde yaşanan önemli problemlerden biri kesme anında talaşların hareketliliğidir. Bu sebeple ile her bir deney için yaklaşık 200 adet sıcaklık değeri okunup, ortalamaya katılmıştır.



Şekil 4. Termal kamera cihazı.

Toplamda 40 adet parça kesilmiş olup 200 adet sıcaklık ölçümü alınmıştır. Sıcaklık değerlerinin ortalaması alınmıştır. Kesme işleminin görseli Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Kesim işlemi.

Şekil 6’da daire testere bıçağı kesici karbür uç gösterilmektedir. Soğutma sıvısı, kesim başlayıp bıçak malzeme içerisine gömüldükten sonra karbür uçlarına ulaşamamaktadır. Bu durum, sıcaklığın kesme kenarlarında dalgalanmasına neden olarak karbür uçları zamanından önce tahrip eden ısı çatlaklarını oluşturmaktadır. Yumuşak veya düşük alaşımli çelikleri keserken veya karbür uçlu daire testere bıçaklarının yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi nedeniyle kuru kesmedir. Vortex daire testere makinesinde mikro moleküler soğutma sistemi kullanılmaktadır. Hava ile birlikte kesim alanına bitkisel yağ püskürtülerek soğutma sağlanmaktadır. Daire testerenin karbür dişlerini ince bir minimum miktar yağlama (MQL) tabakasıyla yağlamak, sürtünmeyi en aza indirir ve takım ömrünü iyileştirmektedir.



Şekil 6. Daire testere bıçağı kesici uç.

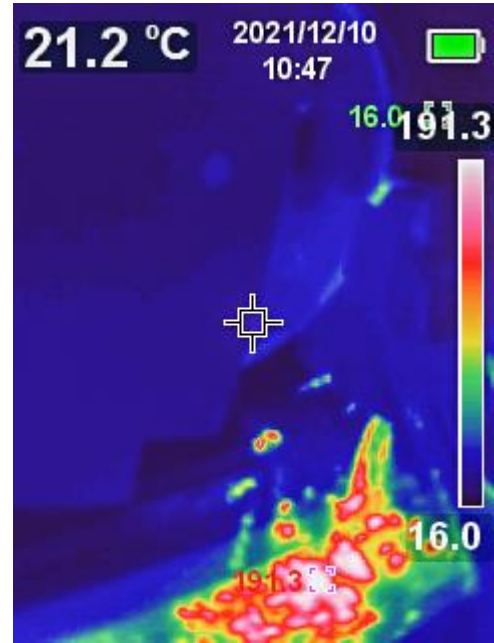


Şekil 7. Kesim ekranı.

Şekil 7’de kesim esnasında servo ve ana motor zorlanması, anlık değişen hızlar, kesim süresi, çeşitli uyarılar ve kaldırılan talaş yük miktarı izlenebilmektedir.

### 3. Bulgular ve tartışma

Kesimler sonucunda alınan talaş sıcaklıkları değerleri bulunmuştur. Cihaz mesafesi kesim bölgesine 40 cm uzaklıkta konumlandırılmıştır. Kesimler esnasında termal kameranın yakaladığı en yüksek talaş sıcaklıkları kaydedilmiştir. Termal kamera görüntüsü Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Termal kamera görüntüsü.

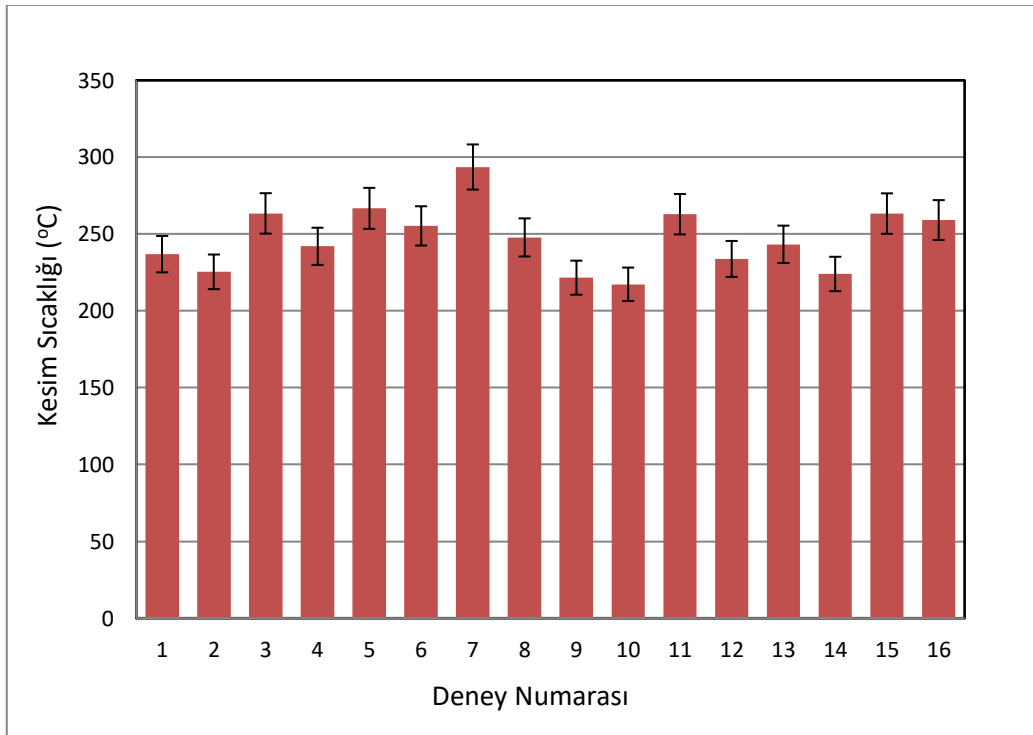
Çizelge 3’te kesimler esnasında talaşlar üzerinden alınan her deney için yaklaşık 10 adet sıcaklığın ortalama değerleri verilmiştir.

Çizelge 3. Deney sonuçları

Deney	Kesim Hızı (m/dk)	İniş Hızı (mm/dk)	Bıçak	Soğutma	Ortalama Sıcaklık (°C)
1	118,8	293	Sermet Kaplamalı	Hava	236,9
2	118,8	293	Sermet Kaplamalı	Yağ	225,4
3	118,8	322	Sermet Kaplamalı	Hava	263,4
4	118,8	322	Sermet Kaplamalı	Yağ	242,0
5	130,7	293	Sermet Kaplamalı	Hava	266,7
6	130,7	293	Sermet Kaplamalı	Yağ	255,3
7	130,7	322	Sermet Kaplamalı	Hava	293,6
8	130,7	322	Sermet Kaplamalı	Yağ	247,8
9	99	284,8	TCT Kaplamalı	Hava	221,6
10	99	284,8	TCT Kaplamalı	Yağ	217,3
11	99	313,4	TCT Kaplamalı	Hava	262,9
12	99	313,4	TCT Kaplamalı	Yağ	233,8
13	108,9	284,8	TCT Kaplamalı	Hava	243,3
14	108,9	284,8	TCT Kaplamalı	Yağ	224
15	108,9	313,4	TCT Kaplamalı	Hava	263,3
16	108,9	313,4	TCT Kaplamalı	Yağ	259,1

Şekil 9’da gösterildiği gibi en yüksek sıcaklık değeri 7 numaralı deneyde elde edilmiştir. Sermet uçlu bıçakla yapılan hava soğutmalı kesimde ortalama 293°C sıcaklığa ulaşılmıştır.

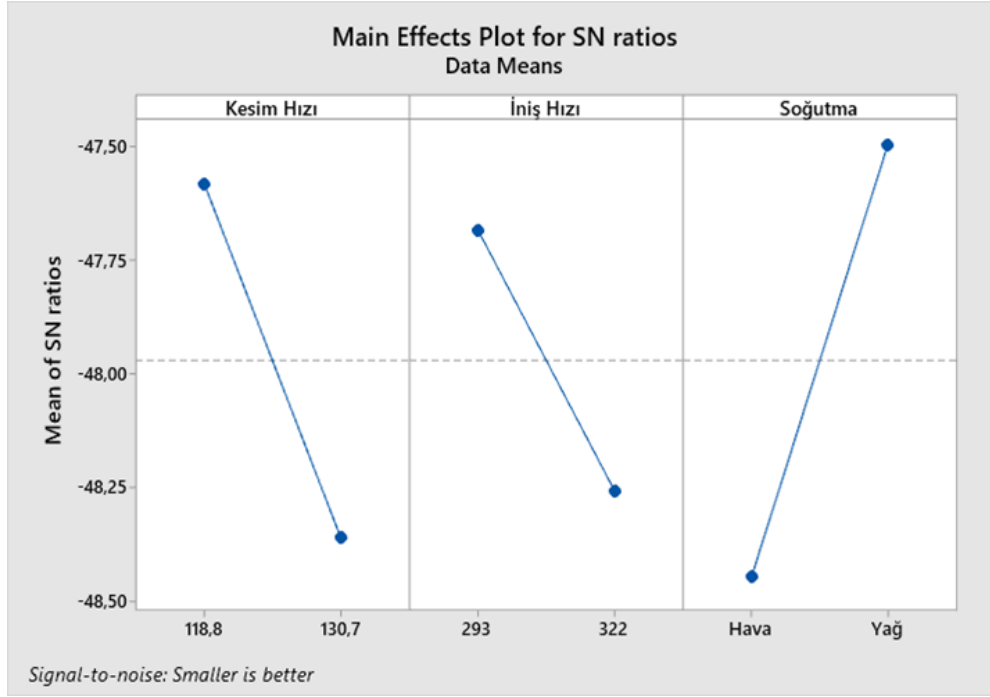
Hava soğutmalı kesimde elde edilen bu sıcaklık beklenen bir durumdur. Sermet uçlu bıçaklar daha yüksek hızına çıkabildiğinden kesim 130,7 m/dk, iniş hızı 322 mm/dk olarak okunmuştur. Bu değerler yapılan çalışmadaki en yüksek hız değerleridir.



Şekil 9. Kesme sıcaklık sonuçları.

Şekil 10'da sermet bıçak için sinyal gürültü ana etki grafiği verilmiştir. Sıcaklığın talaşa, bıçağa ve dolayısıyla malzemeye zarar verdiği bilindiğinden

sermet bıçak için uygun olmayan parametreler kesim hızı 130,7 m/dk, iniş hızı için 322 mm/dk ve soğutma için hava olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Sermet bıçak için sinyal gürültü ana etki grafiği.

Çizelge 4'te sermet bıçak için varyans analiz sonuçları verilmiştir. Kesim sıcaklığına en etkiyen parametrenin %44,95 ile soğutma yöntemi olduğu

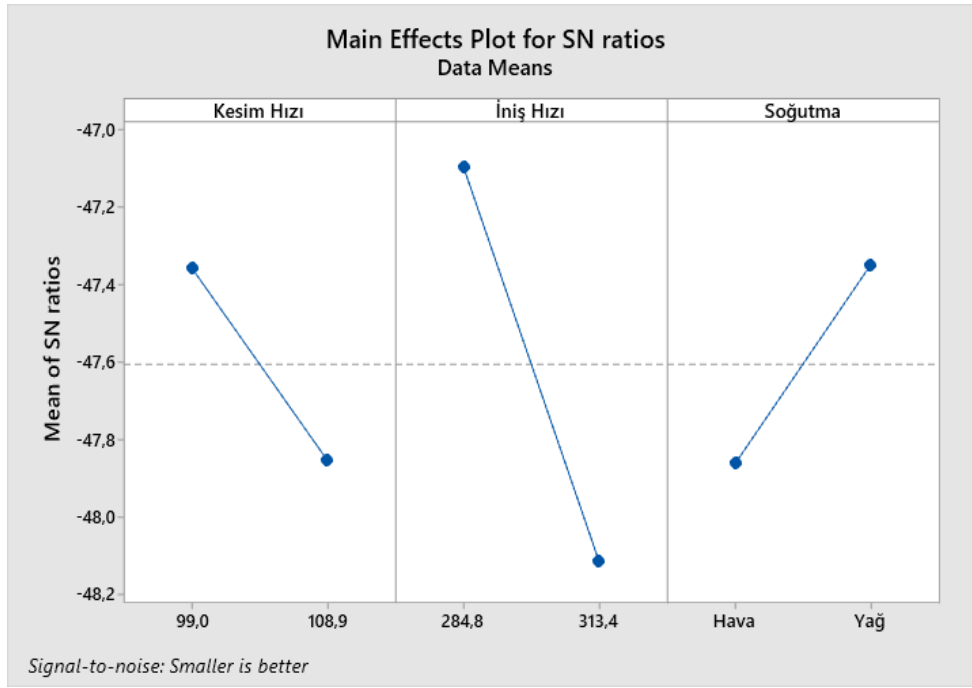
anlaşılmaktadır. %29,91 ile onu kesim hızı, %16,63 ile iniş hızı takip etmektedir.

Çizelge 4. Sermet bıçak için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F-Değeri	P-Değeri	% Etki
Kesim Hızı	1	1041,4	14,04	0,02	29,91%
İniş Hızı	1	579	7,81	0,049	16,63%
Soğutma	1	1565,1	21,11	0,01	44,95%
Hata	4	296,6			8,52%
Toplam	7	3482,1			100,00%

Şekil 11'de TCT bıçak için sinyal gürültü ana etki grafiği verilmiştir. Bıçağın kesim esnasındaki hızı

arttıkça kesim sıcaklığının arttığını net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 11. TCT bıçak için sinyal gürültü ana etki grafiği.

Çizelge 5'te TCT bıçak için varyans analiz sonuçları verilmiştir. Bu tip bıçak için kesim sıcaklığına en çok etkileyen parametrenin %61,50 ile iniş hızı olduğu

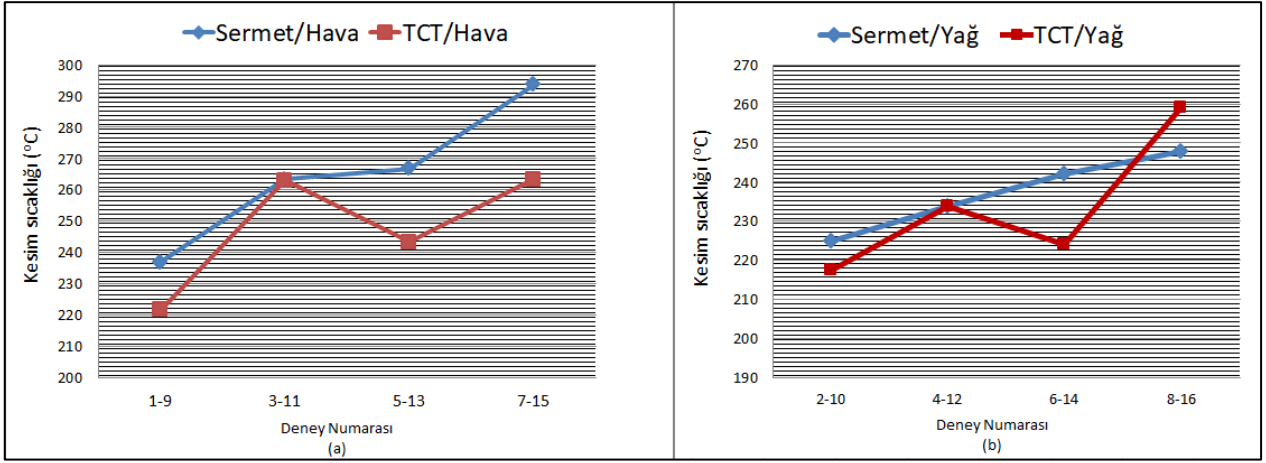
görülmektedir. Soğutma tipi ve kesim hızı etki oranı ise neredeyse aynıdır.

Çizelge 5. TCT bıçak için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F-Değeri	P-Değeri	% Etki
Kesim Hızı	1	367,4	6,57	0,062	14,18%
İniş Hızı	1	1593,3	28,51	0,006	61,50%
Soğutma	1	406,6	7,28	0,054	15,69%
Hata	4	223,5			8,63%
Toplam	7	2590,8			100,00%

Şekil 12 incelendiğinde aynı soğutma koşullarında sermet uçlu bıçak ile yapılan kesimlerde daha yüksek kesim sıcaklığına ulaşıldığı görülmektedir.

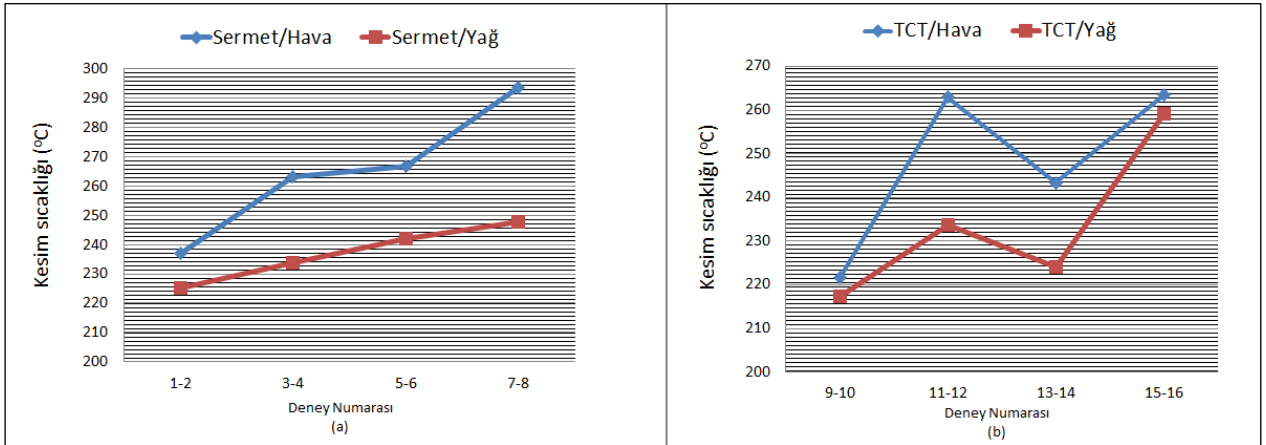
Sermet uçlu bıçak TCT bıçağa göre kesim hızında yaklaşık %20 ve iniş hızında %5 daha yüksek performans göstermektedir. Sermet uçlu bıçakta iniş hızının %10 artışıyla kesim sıcaklığının da %10 arttığı gözlenmektedir.



Şekil 12. Aynı soğutma şartlarında farklı bıçaklar ile kesim sıcaklıkları.

Şekil 13 hava soğutmalı yapılan kesimlerde yüksek sıcaklar ile karşılaştığı görülmektedir. Bu durum beklenen bir durumdur. Kesimler esnasında yanlış bir yağlayıcı kullanmak bıçağa zarar verme, kesilen malzemeye zarar verme ve makineyi tıkama potansiyeline sahiptir.

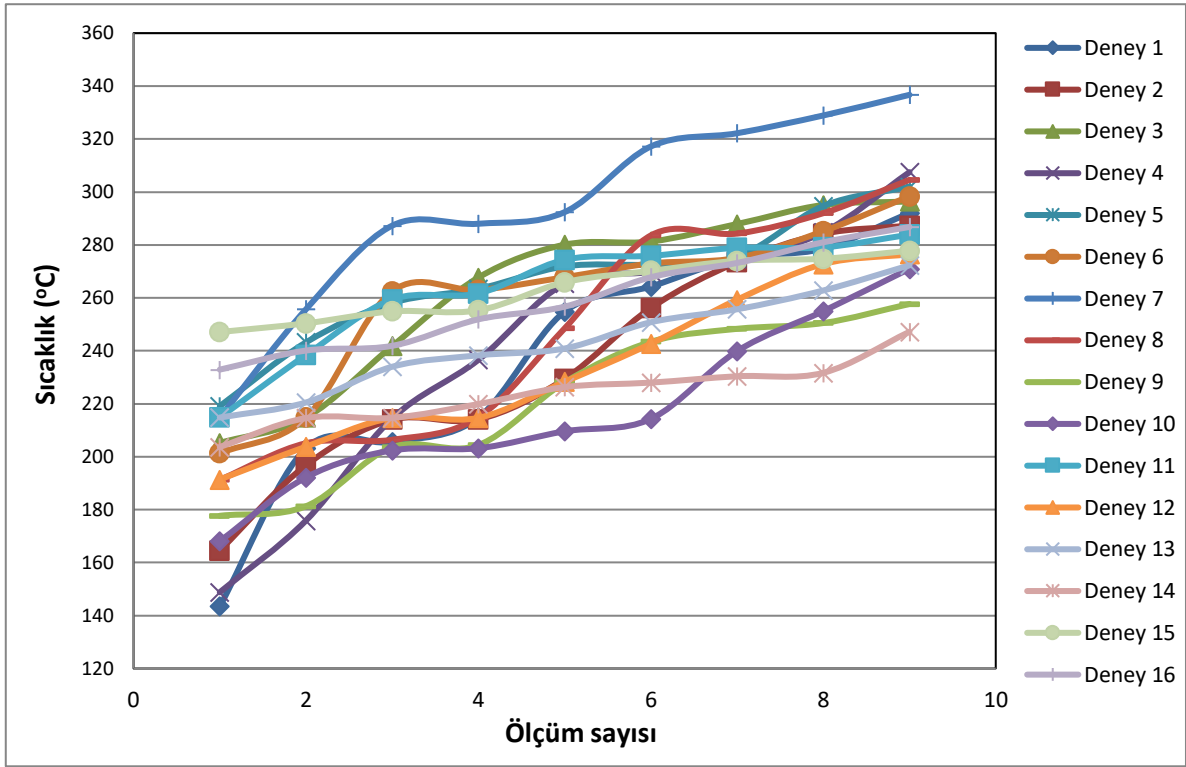
Yüzey kalitesi iyi kesimler elde etmek için şerit testere bıçağı yağı da önemlidir. Sürtünmedeki azalma, daha az titreşim, bıçağın daha düzgün çalışması ve daha tutarlı bir kesim anlamına gelir. Ancak bazı çelikler susuz kesilmesi gerekmektedir.



Şekil 13. Aynı bıçaklar ile farklı soğutma şartlarında kesim sıcaklıkları.

Şekil 14'te tüm deneylerde alınan ölçümleri gösteren grafik verilmiştir. Sıcaklık sonuç değerleri birbirlerine yakın gözlenmiştir. Deneylerde en çok ayrışma 7.deneyde gözlenmiştir. Bu deneyde kesim esnasında hava ile soğutma yapılmış olup sermet bıçak ile en yüksek kesim ve en yüksek iniş hızı ile

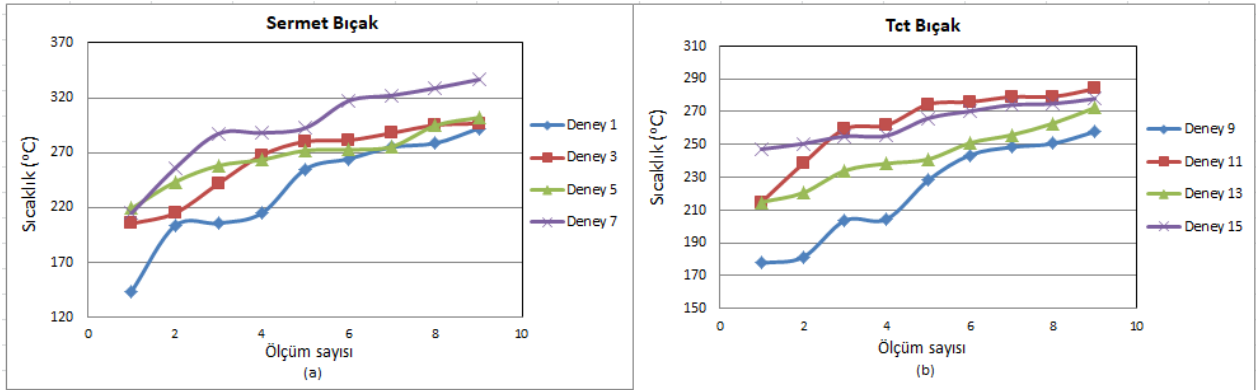
çalışılmıştır. En düşük kesim sıcaklığı ise 10.deneyde meydana gelmiştir. Yağ ile soğutma yapılan kesimde TCT bıçak ile en düşük kesim hızı ve en düşük iniş hızı değerleri ile çalışılmıştır. Alınan sonuçlar beklenendir.



Şekil 14. Tüm deneylerin kesim sıcaklığı ölçümleri.

Şekil 15'te hava ile soğutulan kesimlerde kesim esnasında okunan sıcaklık sonuçları verilmiştir. TCT bıçak ile kesimde kesim hızı ve iniş hızının azalması ile kesim sıcaklığının düştüğü

görülmektedir (Şekil 15 (b)). Yapılan sinyal gürültü analizi ile de bu doğrulanmaktadır. (Şekil 11)

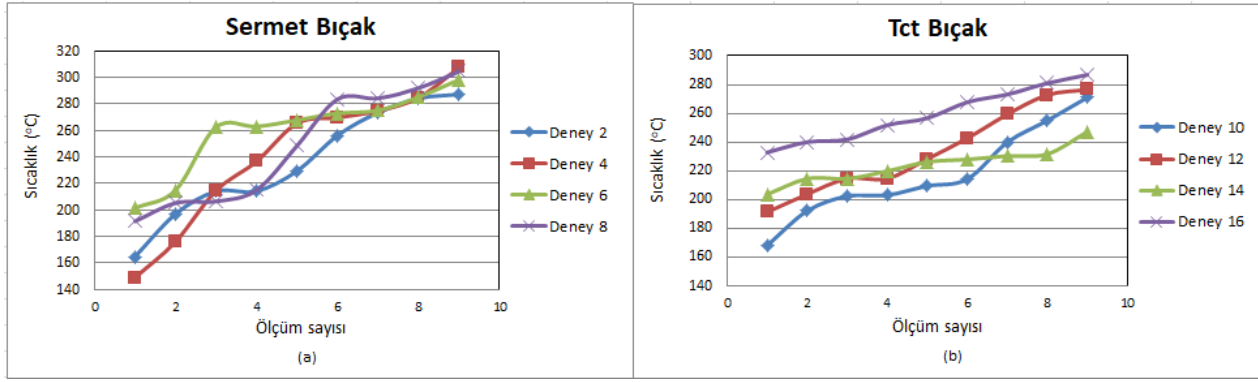


Şekil 15. Hava ile soğutulan kesimlerde sıcaklık sonuçları a) Sermet bıçak, b) TCT bıçak

Şekil 16'da yağ ile soğutulan kesimlerde kesim esnasında okunan sıcaklık sonuçları verilmiştir. TCT bıçak ile yapılan kesimde deney 16 sıcaklık değeri

dikkat çekmektedir. Bu deneyde en yüksek kesim hızı ve en yüksek iniş hızı ile çalışılmıştır.





Şekil 16. Yağ ile soğutulan kesimlerde sıcaklık sonuçları a) Sermet bıçak, b) TCT bıçak

#### 4. Sonuçlar

Ø100 mm ölçüsünde 1040 malzemesi 2 farklı tip bıçak, (sermet ve TCT) 2 farklı soğutma yöntemi (hava ve yağ) ile yüksek performanslı otonom daire testere makinesi ile kesilmiştir. Kesimler sonucu talaş sıcaklıkları termal kamera yardımıyla ölçülmüştür. Yapılan anova analizi seçilen parametrelerin güvenilir olduğunu göstermektedir. Buna göre;

- Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak deney sayısı azaltılmış bu sayede zaman ve maliyetten tasarruf sağlanmıştır.
- Soğutma yöntemi yağ seçildiğinde zamandan tasarruf etmek amacıyla sıcaklık sonuçları irdelenerek kesim ve iniş hızı %10 arttırılabilir.
- Sermet bıçakla yapılan deneylerle kesim sıcaklığına kesim hızı etkisinin iniş hızına etkisine oranla iki kat daha fazla olduğu görülmektedir.
- TCT bıçak ile yapılan kesimlerde soğutma yönteminin yağ olması parametreyi etkin kılmaktadır.
- Sermet uçlu bıçak TCT bıçağa göre daha yüksek kesim ve iniş hızına çıkabildiği için ölçülen talaş sıcaklıkları daha yüksek çıkmaktadır.
- En yüksek kesim sıcaklığı beklendiği gibi hava soğutmalı ortamda olup sermet bıçak temel özelliği olan en yüksek kesim ve iniş hızına sahip 7. Deney de oluşmuştur.
- En düşük kesim sıcaklığı ise yağ soğutmalı ortamda olup TCT bıçak kullanılan kesimde en düşük kesim ve iniş hızına sahip 10. deneyde oluşmuştur.

#### 5. Kaynaklar

- Altan, M, Uysal A, Altan, E, 2013. Effects of process parameters on surface roughness in saw cutting of polypropylene/TiO<sub>2</sub> nano composites. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **36**, 615–621.
- Basti, A, Obikawaa T, Shinozuka, J, 2007. Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **47** (2007) 793–798.
- Bradbury, SR, Lewis, DB, 2000. A comparison of the performance and wear characteristics of high-speed steel circular saw blades machining Nimonic PK31, AISI O1 tool steel, Inconel 600L and AISI 1018 carbon steel. *J. Mater. Sci.*, **35**, 1511-1524.
- Chang, W, Chen, L, 2015. 'Design and experimental evaluation of a circular saw blade with self-clamped cutting inserts.' *Int J Adv Manuf Technol*, **83**,365–379.
- Dhananchezian, M, 2021. 'Influence of variation in cutting velocity on temperature, surface finish, chip form and insert after dry turning Inconel 600 with TiAlN carbide insert'. *Materials Today: Proceedings*, **46**(17), 8271-8274
- Hattori, N, Lida, T, 1999. 'Idling noise from circular saws made of metals with different damping capacities.' *J Wood Sci*, **45**,392-395.
- Karagüzel, U, 2019. 'Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatı sırasında termal kamera ile sıcaklık ölçümü ve sonlu elemanlarla modellenmesi'. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* **7**(2), 265–271.
- Lu, Y, Deng, J, Sun, Q, Ge, D, Wu, J, Zhang, Z, 2021. Effect of micro textures on the cutting performance of circular saw blade. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, London, England, **115**,2889–2903.
- Mikaeil, R, Mokhtarian, M, Haghshenas, S, Careddu, N, Alipour, A, 2021. 'Assessing the System Vibration of

Circular Sawing Machine in Carbonate Rock Sawing Process Using Experimental Study and Machine Learning.' *Geotech Geol Eng*, **40**,103–119.

Mohammadpanah, A, Lehmann B, White J, 2017. 'Development of a monitoring system for guided circular saws: an experimental investigation'. *Wood Material Science & Engineering*, **14**(3),1-8.

Nasir, V, Kooshkbaghi, M, Cool, J, Sassani, F, 2021. 'Cutting tool temperature monitoring in circular sawing: measurement and multi-sensor feature fusion-based prediction'. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **112**,2413–2424.

Thaler, T, Potočník, P, Kopač, J, Govekar E, 2014. 'Experimental Chatter Characterization in Metal Band Sawing.'. *Journal of Mechanical Engineering* **60**(4), 265-273.

#### **İnternet kaynakları**

- 1- <https://kar-tes.com.tr/blog/testere/sermet-nedir/> (erişim tarihi: 13.01.2022)