



Dicle Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

**mühendislikdersi**  
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
**mühendislikdersi**  
Cilt: 14, Sayı: 1, Mart 2023 ISSN: 1309-8640

**Dicle Üniversitesi Adına yayın Sahibi / Privilige Owner**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Baş Editör / Editor-in-Chief**  
Mehmet Sıraç ÖZERDEM

**Alan Editörleri / Field Editors**  
İdris BEDİRHANOĞLU  
İbrahim KAYA  
Abdulnasır YILDIZ  
Felat DURSUN  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU  
Bilal GÜMÜŞ  
Abdurrahman SAYDUT

**Tasarım-Dizgi / Designing-Editing**  
Mesut ŞEKER

**Yazışma Adresi**

Mühendislik Dergisi, Koordinatörlük ve Yayın Bürosu,  
Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 21280 Diyarbakır  
Telefon : +90-412 241 10 00 (Dahili: 3637)  
Elektronik posta : [muhendislikdergisi@dicle.edu.tr](mailto:muhendislikdergisi@dicle.edu.tr)  
web : <http://dergipark.gov.tr/dumf>, <https://duje.dicle.edu.tr/journal/>

Dergide yayınlanan yazılar izinsiz başka bir yerde yayınlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz.

ISSN Basılı Materyal: 1309-8640

Online ISSN: 2146-4391

## Hakem Listesi / *Reviewers List*

Dergimize yayınlanmak üzere gönderilmiş olan makaleleri titiz bir şekilde değerlendiren kıymetli hakem hocalarımıza, değerli katkılarından dolayı teşekkür eder, katkılarının devamını dileriz.

*We greatly appreciate the contributions made by the scientists, who worked as reviewers for Dicle University Journal of Engineering (DUJE) and we expect their contributions to the following journal issues.*

Burçin YILDIZ (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)

Esma Gizem AYDIN (Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi)

Serdar Ethem HAMAMCI (İnönü Üniversitesi)

Celeleddin YEROĞLU (İnönü Üniversitesi)

Ömer TÜRK (Mardin Artuklu Üniversitesi)

Orhan ER (İzmir Bakırçay Üniversitesi)

Serhat PEKER (İzmir Bakırçay Üniversitesi)

Tarık Serhat BOZKURT (ITU)

Erkut SAYIN (ITU)

Furkan Nur DENİZ (İnönü Üniversitesi)

Fevzi HANSU (Siirt Üniversitesi)

Elif VARGÜN (Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi)

Erol SARI (İstanbul Üniversitesi)

Sinem Burcu ERDOĞAN (Acıbadem Üniversitesi)

Yücel KOÇYİĞİT (Manisa Celal Bayar Üniversitesi)

Gülşah ÇAKMAK (Fırat Üniversitesi)

Uğur ÇALIGÜLÜ (Fırat Üniversitesi)

Rüştü GÜNTÜRKÜN (Selçuk Üniversitesi)

Hasan POLAT (Bingöl Üniversitesi)

Fevzi SARITAŞ (ITU)

Tülay AKSU ÖZKUL (ITU)

Sencer ÜNAL (Fırat Üniversitesi)

Zeki ARGUNHAN (Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi)

Muhammed YILDIRIM (Turgut Özal Üniversitesi)

Türker TUNCER (Fırat Üniversitesi)

Hüseyin ÜZEN (Bingöl Üniversitesi)

Gurbet CANPOLAT (Siirt Üniversitesi)

Kerim KARADAĞ (Harran Üniversitesi)

Musavver CAMBAZ (Boğaziçi Üniversitesi)

Çağlar ÖZER (Atatürk Üniversitesi)

Hakan TUTUMLU (Gaziantep Üniversitesi)

Cenk YANEN (Fırat Üniversitesi)

Fevzi ÖNEN (DU)

Mehmet Emin ÖNCÜ (DU)

Hüseyin ACAR (DU)

Ömer Faruk CAN (DU)

Şükrü ÇETİNKAYA (DU)

Mehmet Salih KESKİN (DU)

Havvanur KILIÇ (DU)

Mehmet Emin ASKER (DU)

M. Zahir DÜZ (DU)

# İçindekiler / *Table of Contents*

## Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

SMSM'de Vektör Kontrol Sürücüsü için 2 DOF FOPI Kontrolör Tasarımı (Araştırma Makalesi) <i>2 DOF FOPI Controller Design for Vector Control Driver in PMSM (Research Article)</i> <b>Hasan Erdal, Burak Yıldırım, Mehmet Emin Asker</b>	<b>1</b>
İnsansız hava aracından çekilen videolar kullanılarak derin öğrenme yaklaşımı ile nesne tespiti (Araştırma Makalesi) <i>Object detection by deep learning approach using images taken from unmanned aerial vehicle (Research Article)</i> <b>Ayşan Usta, Muhammet Ali Arserim</b>	<b>9</b>
A k-mer based metaheuristic approach for detecting COVID-19 variants (Research Article) <b>Hilal Arslan</b>	<b>17</b>
Assessment of GTO: Performance Evaluation via Constrained Benchmark Function, and Optimized of Three Bar Truss Design Problem (Research Article) <b>Erdal Eker</b>	<b>27</b>
El Sıkma Hareketinin İşlevsel Yakın Kızılaltı Spektroskopisi ve Elektromiyografi Sinyalleri Kullanılarak Sınıflandırılması (Araştırma Makalesi) <i>Classification of Hand-Grip Movement Using Functional Near-Infrared Spectroscopy and Electromyography (Research Article)</i> <b>Aykut Eken</b>	<b>35</b>
Automatic Detection of Mild Cognitive Impairment from EEG Recordings Using Discrete Wavelet Transform Leader and Ensemble Learning Methods (Research Article) <b>Afrah Said, Hanife Göker</b>	<b>47</b>
Maximum Power Control and Optimization of Switched Reluctance Generators for Wind Turbines (Research Article) <b>Gökhan Parla, Merve Yıldırım, Mehmet Özdemir</b>	<b>55</b>
Federe Öğrenmede Birleştirme Algoritmalarının Model Performansına Etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The Impact of Aggregation Algorithms on Federated Learning Models (Research Article)</i> <b>Mehmet Nergiz</b>	<b>65</b>
Senkrosıkıştırma dönüşümü ve derin transfer öğrenimi ile Alzheimer hastalığının EEG tabanlı otomatik tespiti (Araştırma Makalesi) <i>EEG-based automated detection of Alzheimer's disease by synchrosqueezing transform and deep transfer learning (Research Article)</i> <b>Hasan Polat</b>	<b>75</b>

## Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering

- Thermal and mechanical analysis of thermal power plant ashes, cement and resin composites (Research Article)  
**Ayşe Biçer** **87**
- 304-430 Paslanmaz Çeliklerin Bakır Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Kaynak Mukavemetinin Optimizasyonu (Araştırma Makalesi)  
*Diffusion Welding of 304-430 Stainless Steels Using Copper Interlayer and Optimization of Weld Strength (Research Article)*  
**Haluk Kejanlı, M. Selçuk Keskin, Gamze Tosun** **95**
- Güneş Enerjisi Destekli Vakum Distilasyon Yöntemi ile Deniz Suyundan Tatlı Su Eldesinin Enerji Analizi (Araştırma Makalesi)  
*Energetic Analysis of Freshwater Production from Sea Water by Vacuum Distillation with Solar Energy Support (Research Article)*  
**Mükerrem Sinem Mungan, Orhan Arpa** **103**
- İşe alım süreçlerinde aşamalı olarak TOPSIS ve VIKOR yöntemleri uygulanarak iş gören seçimi yapılması (Araştırma Makalesi)  
*Selection of employees by gradually applying TOPSIS and VIKOR methods in recruitment processes (Research Article)*  
**Abdulbari Aslan, Mesut Hüseyinoğlu, Cafer Budak** **113**

## Maden Mühendisliği / Mining Engineering

- Kumsal Sedimanlarının ve Mikroplastik İçeriklerinin Karakterizasyonu: Muğla Kıyılarından (GB Türkiye) Örnek Çalışma (Araştırma Makalesi)  
*Characterization of Beach Sediments and Their Microplastic Contents: A Case Study from Muğla Coasts (SW Türkiye) (Research Article)*  
**Murat Gül, Ceren Küçükuysal, Ahmed Masud** **123**
- Cevherden Flotasyon Yöntemiyle Baritin Zenginleştirilmesi (Araştırma Makalesi)  
*Barite Enrichment by Flotation Method from the Ore (Research Article)*  
**İbrahim Dolak, Rüstem Keçili** **135**

## İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- The Application of Different Technologies for Removal of Rifampicin from Aquatic Environments: A Recent Review (Review Article)  
**Hatice Erdem** **145**
- The size of portlandite crystals in ITZ and its relation with ratios of ingredients and properties of LWAC (Research Article)  
**İsmail Ağa Gönül, Hatice Çiçek** **165**
- Üniversite Yerleşkesi Çevresinde Trafik Durumunun İncelenmesi ve Alternatif Çözüm Önerileri: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü Örneği (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of Traffic Conditions Around the University Campus and Suggestions for Alternative Solutions: The Case Study of Istanbul University Cerrahpasa Avcılar Campus (Research Article)*  
**Ahmet Sertaç Karakaş** **175**

Yumuşak Kil zeminlerde Basıncılı ve Basıncısız Gömülü Çelik Boruların Davranışının Karşılaştırılması (Araştırma Makalesi) <i>Comparison of the mechanical behavior of the buried steel pipelines in soft clayey soils under pressurized and non-pressurized conditions (Research Article)</i> <b>Hadi Khanbabazadeh</b>	<b>191</b>
Convergence studies for static analysis of thin plates on Pasternak Foundations (Research Article) <b>Ülkü Hülya Çalık-Karaköse</b>	<b>197</b>
Deprem Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Açık Kaynaklı Bir Yazılım Geliştirilmesi: DARLA (Versiyon 1.0) (Araştırma Makalesi) <i>Development of Open Source Software for Use in Earthquake Engineering Applications: DARLA (Version 1.0) (Research Article)</i> <b>Ülgen Mert Tuğsal, Ahu Kömeç Mutlu</b>	<b>207</b>

---

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlevin doğruluğu, bütünlüğü, uygunluğu ve kullanılabilirliği konusunda bir yüklenimi ve iddiası bulunmamaktadır. Bu nedenle herhangi bir şekilde sorumlu tutulamaz.

Bu yayının herhangi bir kısmı, mühendislik dergisinin yazılı izni olmadıkça kaynak gösterilmeden yayınlanamaz, bilgi saklama sistemine alınamaz veya elektronik, mekanik, fotokopi, kayıt veya başka sistemlerle çoğaltılamaz.



## SMSM’de Vektör Kontrol Sürücüsü için 2 DOF FOPI Kontrolör Tasarımı

## 2 DOF FOPI Controller Design for Vector Control Driver in PMSM

Hasan Erdal<sup>1\*</sup>, Burak Yıldırım<sup>2</sup>, Mehmet Emin Asker<sup>3</sup><sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, [herdal@bingol.edu.tr](mailto:herdal@bingol.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1713-9274><sup>2</sup> Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, [byildirim@bingol.edu.tr](mailto:byildirim@bingol.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2118-4297><sup>3</sup> Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler MYO, [measker@dicle.edu.tr](mailto:measker@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4585-4168>

## MAKALE BİLGİLERİ

## ÖZ

## Makale Geçmişi:

Geliş 18 Ağustos 2022  
Revizyon 18 Ekim 2022  
Kabul 11 Ocak 2023  
Online 23 Mart 2023

## Anahtar Kelimeler:

SMSM, Alan yönlendirmeli kontrol,  
2 DOF FOPI Kontrolör, Karınca  
kolonisi optimizasyonu.

Günümüzde sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) tahrik sistemlerinde kullanımları giderek yaygın hale gelmektedir. Bu motorların kontrollerindeki gelişmeler kullanıldıkları servo sistemlerde konum ve hız takibinde iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu çalışmada SMSM'nin uzay vektör modülasyonlu vektör kontrol yöntemine dayalı modeli Matlab/Simulink'te modellenmiştir. Bu modelde kontrolör yapısı olarak iki serbestlik derecesine sahip kesir dereceli oransal integral (2-DOF FOPI) kontrolör yapısı kullanılmıştır. Kontrolör parametreleri karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) ile belirlenmiştir. Önerilen kontrolörün başarısını göstermek amacıyla sonuçlar geleneksel PI kontrolör ile eşit şartlarda karşılaştırılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, 2-DOF FOPI kontrolörün SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolünde geleneksel PI kontrolörden daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

## Article history:

Received 18 August 2022  
Received in revised form 18 October 2022  
Accepted 11 January 2023  
Available online 23 March 2023

## Keywords:

PMSM, vector control, 2 DOF FOPI  
Controller, Ant colony optimization.

Today, the use of Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) in drive systems is becoming increasingly common. The developments in the controls of these motors provide improvements in position and speed tracking in the servo systems in which they are used. In this study, the model of PMSM based on the vector control method with space vector modulation is modeled in Matlab/Simulink. In this model, 2-degree of freedom fractional order proportional integral (2-DOF FOPI) is used as the controller structure. Controller parameters are determined by ant colony optimization (ACO). In order to demonstrate the success of the proposed controller, the results are compared with the conventional PI controller on equal terms. When the simulation results obtained are examined, it is seen that the 2-DOF FOPI controller has better performance than the traditional PI controller in the field oriented control of the PMSM.

Doi: 10.24012/dumf.1162983

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

SMSM'lerin kullanımı, yüksek performans isteyen robotik sistemler veya havacılık ve uzay teknolojileri gibi alanlarda her geçen gün artmaktadır. Ayrıca endüstride güç/hacim oranlarının yüksek olması, verimlerinin iyi olması, fırça kollektör yapısının bulunmamasından dolayı arıza ve bakımının azlığı, ses seviyesinin düşük olması, uyarımın sabit mıknatıslarla yapılması, reaktif güce ihtiyaç duymamaları, senkron hızda verimlerinin kayma oranından bağımsızlığı gibi nedenlerden ötürü asenkron motorlara nazaran daha çok tercih edilmeye başlanmış ve kullanımları yaygınlaşmıştır. Robot teknolojisi, elektrikli araçlar, uzay teknolojisi, asansörler, pompalar gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır [1],[2],[3].

SMSM'nin kontrolünde genel olarak üç yöntem kullanılır; skaler kontrol yöntemi, vektör kontrol yöntemi ve doğrudan moment kontrol (DMK) yöntemi. Skaler kontrol yöntemi yapısı basit, uygulaması kolay ve fiyatı ucuz olmasına rağmen sürücü performansı zayıftır. DMK yöntemi ile vektör kontrol yöntemleri kontrol kalitesinin iyi olması sebebiyle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bununla birlikte bu iki yöntemin uygulanmasında bir takım zorluklar vardır [4]. Vektör kontrol yöntemi, geleneksel kontrol teorilerinden daha robust ve daha iyi bir dinamik yanıt sunar [5]. Vektör kontrol yöntemi aynı zamanda alan yönlendirmeli kontrol (AYK) yöntemi olarak da isimlendirilebilir. SMSM'lerin alan yönlendirmeli kontrolünde, alana karşılık gelen d eksen akımı sıfırda tutulurken, q eksen akımı ile motor momenti kontrol edilir [2].

Bilgisayar teknolojilerindeki ve sayısal işlemcilerdeki gelişimler araştırmacılara kontrol yöntemlerinde farklı yapıları deneme imkânı sunmuştur. PID kontrolörlerin genel olarak endüstride kullanımları artmaktadır. Son yıllarda robotik sistemler, havacılık ve uzay teknolojileri gibi alanlarda kullanılan sistemlerde konum ve hız kontrolünün hassasiyeti önem kazanmıştır. İstenilen performansın yakalanabilmesi için farklı kontrol yapıları teknolojik gelişmelerle birlikte motor kontrol sistemlerine de uygulanabilir hale gelmiştir. Son zamanlarda kontrol alanının genişliği ve reel dünyayı daha iyi modellemesi gibi üstün özelliklerinden dolayı; serbestlik derecesi birden farklı PID yapıları (örneğin 2 DOF PID) ve kesir dereceli PID (FOPID) yapıları araştırmacıların dikkatini çekmiştir.

Günümüzde, kesir dereceli yapılar kontrol alanında büyük ilgi görmektedir. Bunun nedeni kesirli diferansiyel sistemlerin reel dünya modellerini tamsayı dereceli diferansiyel ifadelerle daha iyi tanımlamalarıdır [6], [7]. Kesir dereceli kontrolör yapıları da hem akademik hem de endüstriyel olarak büyük ilgi görmektedir [8]. Bu kontrolör yapılarındaki integral ve türev terimlerinin derecelerine getirilen ekstra serbestlik derecesi sayesinde bu kontrolör yapıları hem tamsayı dereceli sistemlerin hem de kesir dereceli sistemlerin kontrolünde tam sayı dereceli PID kontrolöre göre daha iyi yanıtlar vermesini sağlamıştır [9]–[11]. Narayanaswamy ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıvı seviye kontrolü için j-indeksi

optimizasyon yöntemini kullanarak parametrelerinin belirlendiği sıvı seviye kontrolü için kesir dereceli PI kontrol modeli ile geleneksel PI kontrol modelini kıyaslamışlardır. Kesir dereceli PI modelinin daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir [12]. Kesir dereceli kontrolör yapılarının parametre değerlerini belirlemek için literatürde farklı metotlar sunulmuştur. Hamamcı çalışmasında kesir dereceli PID kontrolörün parametre değerlerinin belirlenmesi için kazanç ve genlik marjlarını dikkate alarak kararlılık bölgelerinin belirlenmesine dayanan bir yöntem sunmuştur [9]. Deniz ve arkadaşları çalışmalarında kararlılık bölgesinin belirlenmesine yönelik yöntemi tam sayı dereceli PI kontrolör yapısı için kullanmışlardır [13]. Kesir dereceli kontrolör yapılarının parametre değerlerinin belirlenmesinde ayrıca optimizasyon algoritmalarına dayalı yöntemler de literatürde sunulmaktadır. Yıldırım ve arkadaşları çalışmalarında kesir dereceli kontrolörün parametre tespitinde karınca kolonisi optimizasyon algoritmasını kullanmışlardır [14]. Ateş ve arkadaşları çalışmalarında kesir dereceli PI kontrolörün parametre değerlerinin belirlenmesinde değiştirilmiş yapay fizik optimizasyon algoritmasını kullanmışlardır [15].

Geleneksel yöntemlerin performansını artırmak için serbestlik derecesi birden farklı PID yapıları (2 DOF PID gibi) literatürde çalışılmıştır [4], [16]–[18]. 2 DOF kontrol yapısı ile 1 DOF kontrol yapısı karşılaştırıldığında, 2 DOF yapısı daha iyi performans göstermektedir [16], [17]. Kaynak [18]'de kesir dereceli PID kontrolör üzerine çalışılmış ve 2 DOF FOPID yapısının FOPID yapıya göre hassas ayar yapabilme kolaylığı sunduğu gösterilmiştir. Kaynak [4]'de 2-DOF PI kontrolün geleneksel PI göre SMSM alan yönlendirmeli kontrolünde daha iyi bir performans gösterdiği yapılan çalışmada sunulmuştur. Çalışmada her iki kontrolör parametrelerini de parçacık sürü optimizasyon algoritmasıyla elde etmişlerdir. Kaynak [19]'da, kesir dereceli kayan mod kontrol (FOSMC) ile geleneksel kayan mod kontrol (SMC) yöntemlerini karşılaştırmış, hızlı tepki vermek ve bozucu etkilere karşı dirençte FOSMC'nin daha iyi performans gösterdiğini ifade etmiştir. Kaynak [20]'de, genetik algoritma ile optimizasyon yaparak 2 DOF PID kontrolörler sistemlerini SMSM motorun AYK yöntemi üzerinde incelemiştir. Kaynak [21]'de SMSM kontrolünde kesir dereceli bir filtre tasarımı kullanmıştır. Bu filtre ile yüksek frekansta gürültüye ve düşük frekansta bozulmaya karşı daha iyi bir performans elde etmişlerdir.

Bu çalışmada, SMSM'de AYK için kullanılan hız kontrolörü ve iki adet gerilim kontrolörleri için yukarıda avantajları sunulan kesir derece ve 2 serbestlik derece yapılarına sahip 2 DOF FOPI kontrolör yapısı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 2 DOF FOPI kontrolörlerin parametreleri karınca kolonisi algoritması optimizasyon yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmada sunulan kontrolör yapısı SMSM'de AYK için literatürde ilk kez kullanılmıştır. Kullanılan yöntemle ait sonuçlar geleneksel PI kontrolörler ile aynı şartlarda simüle edilerek kıyaslanmıştır.

## SMSM'nin Matematiksel Modeli

SMSM'nin matematiksel modeli için literatürde genellikle  $d - q$  eksenin takımına dayalı matematiksel model tercih edilmektedir. Bu modelde moment ve akı bileşenleri ayrı ayrı kontrol edilebilir. Rotor konumuna bağlı olarak endüktans değerinin değişimi motor ile ilgili analizlerde zorluk çıkarmaktadır.  $d - q$  eksen modeli kullanılarak endüktans değişiminin getirdiği zorluklardan kurtulup model daha basit hale gelir. Böylece, SMSM'nin dinamik analizini yapmak kolaylaşır [22],[23].

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - \omega_r \Psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + \omega_r \Psi_d \quad (2)$$

Burada,  $V_d$   $d$  eksen voltajıdır,  $V_q$   $q$  eksen voltajıdır  $i_d$   $d$  eksen akımıdır,  $i_q$   $q$  eksen akımıdır,  $\Psi_d$   $d$  eksen akısıdır,  $\Psi_q$   $q$  eksen akısıdır,  $\omega_r$  rotor hızıdır ve  $R_s$  stator direncidir.  $\Psi_d$  ve  $\Psi_q$  sekse akı denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_M \quad (3)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

Burada  $\Psi_M$  mıknatıs akısını,  $L_d$  ve  $L_q$   $d - q$  eksenlerindeki endüktans değişkenlerini ifade etmektedir. Denklem (3) ve (4), Denklem (1) ve Denklem (2)'de yerine yazılırsa bu durumda  $d-q$  eksen voltajları;

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \Psi_M \quad (6)$$

Elektriksel moment;

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d] \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklem (3)'deki  $\Psi_d$  ve Denklem (4)'deki  $\Psi_q$  Denklem (7)'de yerine yazılırsa Denklem (8) elektriksel momenti ifade eder.

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_M i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (8)$$

Denklem (8)'de " $\Psi_M i_q$ " mıknatısların ürettiği momenti, " $(L_d - L_q) i_q i_d$ " ise relüktans momenti ifade etmektedir. Yüzeş mıknatıslı SMSM'lerde  $L_d = L_q$  kabul edilir.

Elektriksel moment denklemi Denklem (9)'daki gibi yazılır;

$$T_e = \frac{3p}{2} [\Psi_M i_q] \quad (9)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r \quad (10)$$

Denklem (10) hareket denklemdir. Burada  $T_L$  yük torku  $J$  atalet momenti ve  $B$  ise sürtünme katsayısıdır.

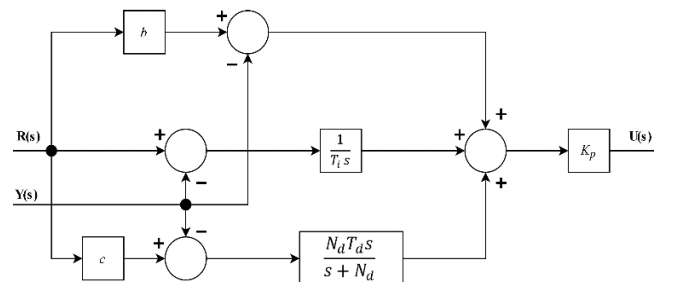
## SMSM'nin 2 DOF FOPI kontrolör ile Vektör Kontrolü

SMSM'nin vektör kontrolünde makine akımları,  $d - q$  olarak vektörel iki eksene ayrılır.  $q$  eksen akımıyla moment kontrol edilirken yüzeş tip SMSM'lerde  $d$  eksen akımının sıfırda tutulmasıyla akı sabit mıknatıs akısında ( $\Psi_M$ ) sabit kalır [2]. Böylece vektör kontrolün uygulanmasıyla SMSM'nin kontrolü serbest uyarımlı DC motorun kontrolüne benzetilir [22]. SMSM'nin vektör kontrolü için tasarlanan 2-DOF FOPI Matlab/Simulink modeli Şekil 3'de verilmiştir.

Modelde gösterildiği gibi, 2-DOF FOPI hız kontrol cihazının çıkışından  $I_q$  referans elde edilir.  $I_d$  referans değeri sıfır alınır. Motor çıkışından alınan  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  akımlarına Clarke ve Park dönüşümleri uygulanarak  $I_d$  ve  $I_q$  akımları bulunur. Bulunan bu değerler referans  $I_d$  ve  $I_q$  akımlarıyla karşılaştırılıp ilgili 2-DOF FOPI kontrole girilir. Bu kontrol çıkışlarından ise gerekli referans  $V_d$  ve  $V_q$  gerilimleri elde edilir. Bu voltajlar, motor için gerekli üç fazlı  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  referans voltajlarının hesaplanması için ters Clarke ve Park dönüşümlerinde kullanılır. Hesaplanan üç faz referans  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  gerilim değerleriyle de PWM bloğunda, voltaj kaynaklı inverter için gerekli anahtarlama sinyalleri üretilir. Şekil 3'de verilen modelde görüldüğü gibi, 2-DOF FOPI denetleyicisi, hız ve akım kontrol cihazı olarak geleneksel PI denetleyicisi yerine kullanılmıştır.

## 2 DOF FOPI Kontrolör Yapısı

Kontrol sistemlerinin serbestlik derecesi; bağımsız bir şekilde ayarlanması mümkün kapalı transfer fonksiyon sayısı olarak tanımlanabilir [24]. Buna göre içinde bağımsız iki transfer fonksiyonu barındırıyorsa iki serbestlik derecesine sahip PID (2 DOF PID) olarak adlandırılabilir. Genel bir 2 DOF PID denklemi Denklem (11)'de ve yapısı ise Şekil 1'de verilmiştir [20].



Şekil 1 2 DOF PID blok diyagramı

$$U_{(s)} = K_p \left( b + \frac{1}{T_i s} + \frac{c T_d s}{1 + s/N_d} \right) R_{(s)} - K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + s/N_d} \right) Y_{(s)} \quad (11)$$

Burada “ $Y_{(s)}$ ” sistem çıkış işaretini “ $K_p$ ” oransal kazancı ifade ederken “ $b$ ” ve “ $c$ ” değerleri, sırasıyla 2 DOF PID kontrolörünün oransal (P) ve türevsel (D) kısımlarının ağırlıklıdır. “ $T_i$ ” integral, “ $T_d$ ” türev zamanını; “ $N_d$ ” filtre katsayısını, “ $R_{(s)}$ ” referans işareti, “ $U_{(s)}$ ” kontrol işaretini tanımlamaktadır. Denklem (11)’i 2 DOF PI yapısına getirmek için  $T_d = 0$ ,  $c = 0$  ve  $0 < b < 1$  olarak alınır.

Kesir dereceli sistemler türev ve integral ifadelerinin üslerinin herhangi bir reel sayı olması veya tamsayı olmak mecburiyetinin bulunmadığı durumlarda diferansiyel denklemlerle düzenlenen sistemler olarak tanımlanır [25]. Denklem (12)’de genel şekli verilmiştir.

$${}_a D_t^x = \begin{cases} \frac{d^x}{dt^x} & Re(x) > 0, \\ 1 & Re(x) = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^{-x} & Re(x) < 0, \end{cases} \quad (12)$$

Denklem (12)’de  $x$  reel sayı kümesinin herhangi bir elemanıdır.  ${}_a D_t^x$  operantı  $x$ ’ in değerlerine bağlı kesir dereceli integral veya türev operantı olarak davranır.  $a$  ve  $t$  değişkenleri, işlemcinin integral işlemcisi olarak hareket ettiği  $x < 0$  şartında integralin sınırlarını ifade eder. Bu açıklama  $a$ ’nın tamsayı olduğu haldeki integral ve türev işlemcilerini de içine alan genel bir ifade olarak sunulmaktadır [25]

Bu çalışmada kullanılan kesir dereceli sistem çözümlerinde MATLAB programında kullanılan FOFT toolbox kullanılmıştır. 2 DOF FOPI denklemi Denklem (13)’ deki gibi yazılır. Denklemdeki “ $\lambda$ ” kesir derecesini ifade etmektedir.

$$U_{(s)} = K_p \left( b + \frac{1}{T_i s^\lambda} \right) R(s) - K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s^\lambda} \right) Y_{(s)} \quad (13)$$

## Karınca kolonisi ile kontrolör parametrelerinin belirlenmesi

Bu çalışmada 2 DOF FOPI için gerekli parametrelerin optimizasyonu karınca kolonisi optimizasyon tekniği ile bulunmuştur. Bunun için Matlab programında optimization toolbox kullanılmıştır. Bu optimizasyon tekniği sezgisel bir tekniktir ve popülasyon merkezlidir. Temelinde karıncaların yiyecek ararken ideal yolu nasıl tayin ettiklerini inceler. Karıncalar geçtikleri yollara feromon salgılayarak diğer arkadaşlarına da haber verirler. Rastgele olan yiyecek arayışı dağılımında en çok feromon bulunan yol daha çok tecrübe edilmiş olduğundan diğer karıncalar tarafından da tercih edilir. Yolu izleyen karınca sayısındaki artış ile beraber yoldaki feromon yoğunluğu bu yolu daha da cazip hale getirir[7].

Dorigo ve arkadaşları karıncaların bu davranışlarını matematiksel olarak modellemiş ve ilk defa gezgin satıcı problemi üzerinde denemişlerdir. Olumlu sonuçlar elde edilmiş ve günümüzde optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan yaygın yapay zeka yöntemlerinden biri olarak yerini almıştır [26].

Karınca kolonisi optimizasyon algoritmasını 6 adımda ifade etmek mümkündür [27].

Adım 1: Karıncalar şehirlere rastgele olarak yerleştirilir.

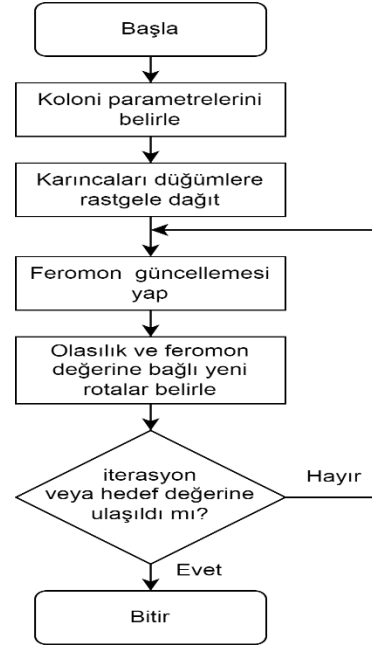
Adım 2: Her karınca belirtilen alfa ve beta değerlerine göre şehirleri dolaşarak rotaları oluştururlar.

Adım 3: Her karıncanın rota mesafesi hesaplanır.

Adım 4: Karıncaların rota mesafelerine göre yollardaki feromon değerleri artırılır.

Adım 5: Feromon buharlaşma değerine göre bütün yollardaki feromon değeri azaltılır.

Adım 6: Belirtilen nesil sayısına ulaşılan kadar veya hedef değere ulaşılan kadar Adım 2’ye gidilir. Akış şeması Şekil 2 ‘deki gibi verilebilir.



Şekil 2 Karınca Kolonisi Akış Şeması

## Performans Kriteri

Bu makalede 2 DOF FOPI kontrolörlerin parametre değerlerinin ayarlamak için çok amaçlı bir performans fonksiyonu sunulmuştur. Burada sunulan fonksiyon artış zamanı  $t_r$ , yerleşme zamanı  $t_s$ , maksimum aşma  $M_p$ , ve  $ITAE$  ifadelerinden oluşur. Bu performans fonksiyonu Denklem (14)’de verilmiştir.

$$J_{(k)} = w_1 t_r + w_2 t_s + w_3 M_p + w_4 ITAE \quad (14)$$

Denklem (14)’de verilen performans fonksiyonunu oluşturan her ifadenin önemi fonksiyonda  $w_i$  ağırlık katsayıları tarafından ayarlanır. Bu katsayıların oranları istenilen özelliği ön plana çıkaracak şekilde seçilir.

Bu çalışma için bu değerler  $w_1 = 1$ ,  $w_2 = 1$ ,  $w_3 = 1$  ve  $w_4 = 500$  alınmıştır. Fonksiyonu oluşturan ifadelerden herhangi birine ait katsayı değerinde yapılacak artış bu ifade ile ilgili özellikte bir gelişme sağlayacaktır. Fakat dikkat edilecek diğer husus ise fonksiyonu oluşturan diğer ifadelerde bir azalma meydana gelebileceğidir [7].

Bu çalışmada KKO ile belirlenen kontrolör parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan 2-DOF FOPI kontrolörlü vektör kontrol yönteminin Matlab / Simulink modeli, Şekil 3’de verilmiştir. Burada, SMSM modellenirken denklem (1)-(10)’da verilen matematiksel model kullanılmıştır. İnverter için ideal anahtar modeli tercih edilmiştir.

Tablo 1 KKO ile belirlenen kontrolör parametreleri

	GELENEKSEL PI	2-DOF FOPI
$W_r$ Kontrolörü		
$k_p$	22.00143	64.7676
$k_i$	0.0101	16.6767
$b$	-	0.9899
$\lambda$	-	1.0172
$I_q$ kontrolörü		
$k_{p1}$	260.0237	83.8383
$k_{i1}$	1.0011	59.5959
$b1$	-	0.8384
$\lambda1$	-	0.3647
$I_d$ kontrolörü		
$k_{p2}$	260.0231	23.2323
$k_{i2}$	1.0024	31.3131
$b2$	-	0.4546
$\lambda2$	--	0.2495

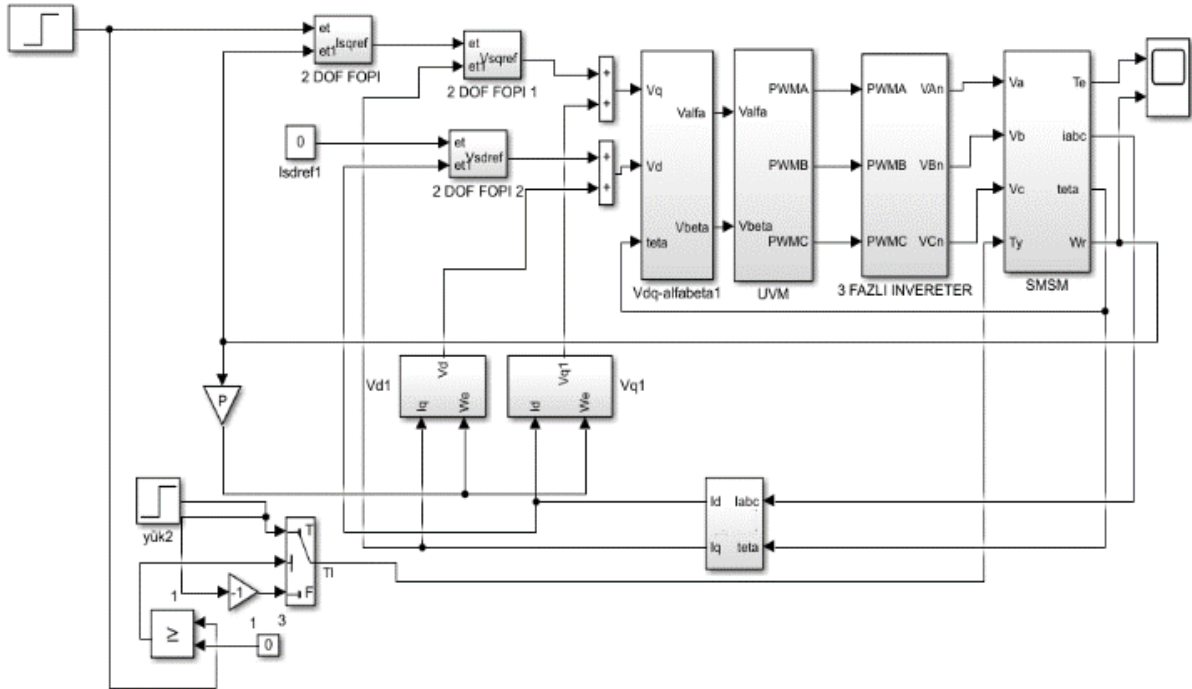
Modelde, gerilim kaynaklı inverterin kontrolü için uzay vektör modülasyonu kullanılmıştır. Uzay vektör PWM yönteminin tercih nedeni kolayca uygulanabilirliği ve sinüzoidal PWM yönteminden daha az harmonik bozulmaya sahip olmasıdır [28]. Ayrıca modelde kullanılan motor parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Kullanılan motor parametreleri

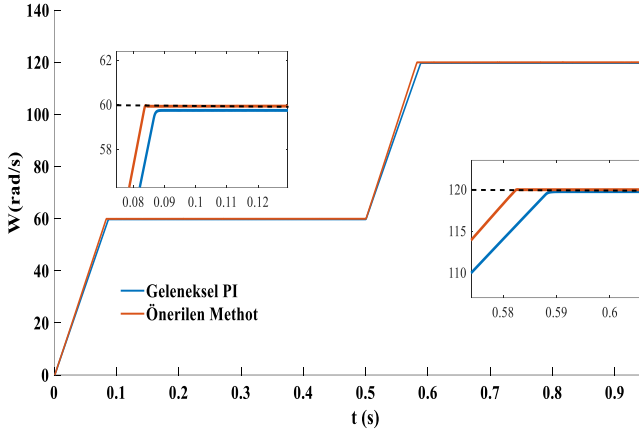
Parametreler	
Nominal güç(kW)	1
Nominal hız(dev/dak)	2000
Stator direnci(Ohm)	4,7
Stator endüktası(mH)	5,99
Eylemsizlik momenti(x10-4kg.m2)	8,41
Sürtünme kuvveti	0
Kutup sayısı	10

## Araştırma ve Bulgular

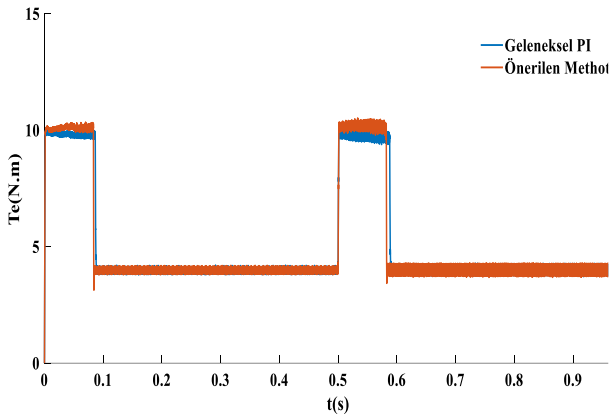
MATLAB / Simulink programında kurulan model, hem 2-DOF FOPI hem de geleneksel PI kontrolör için farklı hız ve moment değerlerinde simüle edilmiştir. Başlangıçta moment  $T_y=4$  N.m ve referans hız  $W_{ref}=60$  rad/s alınmıştır. 0,5. saniyede yük sabit tutularak referans hız 120 rad/s çıkarılmıştır. Sunulan kontrol yönteminin başarısını göstermek için elde edilen sonuçlar Şekil 4,5 ve 6’da sunulmuştur. Şekil 4’te rotor hızı, Şekil 5’te elektriksel moment ve Şekil 6’da q-ekseni akımı gösterilmiştir.



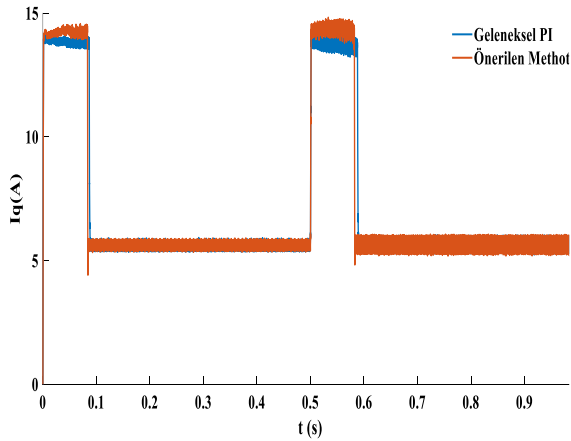
Şekil 3 2-DOF FOPI kontrolörlü vektör kontrol yöntemi simiunk modeli



Şekil 4 Gerilim kontrollü vektör kontrol yöntemi  $T_y=4$  N.m ve  $W_{ref}=60,120$  rad/s için rotor hızı



Şekil 5 Gerilim kontrollü vektör kontrol yöntemi  $T_y=4$  N.m ve  $W_{ref}=60,120$  rad/s için elektriksel moment



Şekil 6 Gerilim kontrollü vektör kontrol yöntemi  $T_y=4$  N.m ve  $W_{ref}=60,120$  rad/s için q-ekseni akımının zamana göre değişimi

Şekil 4'te, hem 2-DOF FOPI hem de geleneksel PI denetleyicisinden elde edilen hız sonuçları gösterilmiştir. Geleneksel PI kontrolöre ait sonuçlar mavi renkli çizgi ile gösterilirken önerilen metot kırmızı renkle ifade edilmiştir. Tablo 3' de artış zamanı, yerleşme zamanı ve ITEA kriteri sayısal değer olarak da sunulmuştur.

Tablo 3 Kontrolör performanslarının  $T_y=4$  N.m ve  $W_{ref}=60,120$  rad/s için karşılaştırılması

Performans Kriteri	Geleneksel PI	Önerilen Metot	Yüzdellik İyileşme
Artış Zamanı	0,0692	0,0662	4,33
Yerleşme Zamanı	0,0857	0,0821	4,20
Maksimum Aşma	0	0	0
ITAE	1,6162	1,3960	13,62

Şekil 6'da akımın  $I_q$  bileşeninin, Şekil 4'te hızın ve Şekil 5'te momentin 2-DOF FOPI denetleyici tepkisinin geleneksel PI denetleyici tepkisinden daha iyi olduğu görülmektedir. Bu durum, Tablo 3'te verilen sonuçlarla da sunulmuştur. Verilen kriterlerden artış zamanı, yerleşme zamanı ve ITEA değerlerinin küçüklüğü önerilen sistemin dinamik cevabının daha iyi olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca Şekil 6'da, d eksen akımı sıfır referans değerinde tutulurken q eksen akımının SMSM'nin vektör kontrol stratejisine uygun olarak elektriksel momenti takip ettiği görülmektedir.

## Sonuç

Bu çalışmada, 2-DOF FOPI denetleyicisi, SMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolünde hız ve akım kontrol cihazı olarak kullanıldı. Matlab / Simulink ortamında oluşturulan SMSM'nin AYK modeli hem geleneksel PI denetleyicisi hem de 2-DOF FOPI denetleyicisi için farklı çalışma koşullarında çalıştırıldı ve simülasyon sonuçları elde edildi. Simülasyonlarda kullanılan hem geleneksel PI hem de 2-DOF FOPI denetleyicisinin parametreleri KKO ile belirlendi. Elde edilen sonuçlara göre, SMSM'nin vektör kontrolü için önerilen 2-DOF FOPI kontrolörünün geleneksel PI kontrolörüne göre daha iyi performans verdiği görülmüştür. Ayrıca 2-DOF FOPI kontrolöre sahip sistemin yerleşme zamanı, artış zamanı ve ITAE değerleri geleneksel PI kontrolöre sahip sisteme göre performans açısından daha iyi değerlere sahip olduğu sunulmuştur. Bu çalışmada önerilen 2-DOF FOPI kontrolör yapısı kullanılarak SMSM'nin vektör kontrol sürücü performansının artırılacağı tespit edilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] M. E. Asker, "Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda vektör ve doğrudan moment yöntemlerinin uygulanması," Y.L. tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2009.
- [2] E. Öksüztepe, "Sürekli mıknatıslı senkron motorların algılayıcısız kontrolü," Doktora tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [3] M. S. Camgöz, "Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolünün DSP üzerinde gerçekleştirilmesi," Y.L. tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2019.

- [4] H. Celik and T. Yigit, "Field-Oriented Control of the PMSM with 2-DOF PI Controller Tuned by Using PSO," *2018 Int. Conf. Artif. Intell. Data Process. IDAP 2018*, no. 5, pp. 11–14, 2019, doi: 10.1109/IDAP.2018.8620902.
- [5] E. Kılıç, H. R. Özçalık, Ş. Yılmaz, and S. Şit, "Speed Control of Vector Controlled Induction Motors under Variable Load with RBFNN Based Model Reference Adaptive Control," *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 27–33, 2015, doi: 10.5505/apjes.2015.20591.
- [6] E. Cokmez, S. Atıç, F. Peker, and I. Kaya, "Fractional-order PI Controller Design for Integrating Processes Based on Gain and Phase Margin Specifications," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 751–756, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.206.
- [7] B. Yildirim, "Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü için Tamsayı Derece Yaklaşımlı Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu," *DÜMF Mühendislik Derg.*, vol. 1, no. 1, pp. 79–87, 2021, doi: 10.24012/dumf.860298.
- [8] B. Yildirim and M. H. Khooban, "Enhancing stability region of time-delayed smart power grids by non-integer controllers," *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 541–553, Jan. 2021, doi: 10.1002/er.5711.
- [9] S. E. Hamamci, "An Algorithm for Stabilization of Fractional-Order Time Delay Systems Using Fractional-Order PID Controllers," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 52, no. 10, pp. 1964–1969, Oct. 2007, doi: 10.1109/TAC.2007.906243.
- [10] B. Yildirim, M. Gheisarnejad, and M. H. Khooban, "A New Parameter Tuning Technique for Noninteger Controllers in Low-Inertia Modern Power Grids," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 279–288, Apr. 2022, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3119888.
- [11] B. Yildirim, M. Gheisarnejad, and M. H. Khooban, "A Robust Non-Integer Controller Design for Load Frequency Control in Modern Marine Power Grids," *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. Intell.*, vol. 6, no. 4, pp. 852–866, Aug. 2022, doi: 10.1109/TETCI.2021.3114735.
- [12] P. N. Narayanaswamy, P. Kanthabhabha, and S. E. Hamamci, "Fractional order PI," in *2010 Second World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)*, Dec. 2010, pp. 121–126, doi: 10.1109/NABIC.2010.5716345.
- [13] F. N. Deniz, N. Tan, S. E. Hamamci, and I. Kaya, "Stability region analysis in Smith predictor configurations using a PI controller," *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 37, no. 5, pp. 606–614, May 2015, doi: 10.1177/0142331214539991.
- [14] B. Yildirim, M. T. Özdemir, and I. Eke, "Design of Integer Order Approximation Fractional Order Controller with for Automatic Voltage Regulation System," in *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, Sep. 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICPEA1.2019.8911137.
- [15] A. Ates, C. Yeroğlu, J. Yuan, Y. Q. Chen, and S. Ethem Hamamci, "Optimization of the FO[PI] Controller for MTDS Using MAPO with Multi Objective Function," *SSRN Electron. J.*, 2018, doi: 10.2139/ssrn.3274043.
- [16] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 401–411, 2003.
- [17] H. Taguchi and M. Araki, "Two-Degree-of-Freedom PID Controllers — Their Functions and Optimal Tuning," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 4, pp. 91–96, 2000, doi: 10.1016/s1474-6670(17)38226-5.
- [18] F. Geng and X. Zhu, "Research on fractional order two-degrees-of-freedom flight control technology of unmanned air vehicle," in *2012 International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP)*, Aug. 2012, pp. 807–812, doi: 10.1109/CSIP.2012.6308976.
- [19] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, and M. Mubin, "Application of Fractional Order Sliding Mode Control for Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101765–101774, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2931324.
- [20] T. Pajchrowski and A. Wójcik, "Analysis of influence of linear regulators' structure on level of speed unevenness of PMSM direct drive," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 96, no. 7, pp. 59–67, 2020, doi: 10.15199/48.2020.07.11.
- [21] P. Chen and Y. Luo, "Analytical Fractional Order PID Controller Design with Bode's Ideal Cut-off Filter for PMSM Speed Servo System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. c, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3158009.
- [22] A. A. Adam, "Sabit mıknatıslı senkron motorda moment dalgalanması ve gürültünün azaltılması," Doktora tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [23] S. Özçira, "Sabit mıknatıslı senkron motorun kontrol yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları," Y.L. tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [24] I. M. Horowitz, *Synthesis of feedback systems*. Elsevier, 2013.
- [25] Y. Chen, I. Petras, and D. Xue, "Fractional order control - A tutorial," in *2009 American Control Conference*, Jun. 2009, pp. 1397–1411, doi: 10.1109/ACC.2009.5160719.

- [26] M. Dorigo, G. Di Caro, and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artif. Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–172, 1999.
- [27] H. Dikmen, H. Dikmen, A. Elbir, Z. Ekşi, and F. Çelik, "Gezgin Satıcı Probleminin Karınca Kolonisi ve Genetik Algoritmalarla Eniyilemesi ve Karşılaştırılması Optimization and Comparison of Travelling Salesman Problem Using Ant Colony and Genetic Algorithms," vol. 18, no. 1, pp. 8–13, 2014.
- [28] E. Öksüztepe, Z. Omac, M. Polat, H. Celik, A. H. Selcuk, and H. Kürüm, "Sensorless field oriented control of nonsinusoidal flux-distribution permanent magnet synchronous motor with a FEM based ANN observer," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 4, pp. 2994–3010, 2016.



## Makale Türü (Araştırma Makalesi)

## İnsansız hava aracından çekilen videolar kullanılarak derin öğrenme yaklaşımı ile nesne tespiti

*Object detection by deep learning approach using images taken from unmanned aerial vehicle*Aydın USTA<sup>1</sup>, Muhammet Ali ARSERİM<sup>2</sup><sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, [aysancetin@gmail.com](mailto:aysancetin@gmail.com), Orcid No:0000-0002-9190-5061<sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, [marserim@dicle.edu.tr](mailto:marserim@dicle.edu.tr), Orcid No:0000-0002-9913-5946

## MAKALE BİLGİLERİ

## ÖZ

## Makale Geçmişi:

Geliş 20 Ekim 2022  
Revizyon 23 Aralık 2022  
Kabul 18 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

## Anahtar Kelimeler:

İHA, YoloV3, Darknet-53,

Günümüzde, İnsansız Hava Araçları (İHA) sınır güvenliği, sahil güvenliği, savunma, saldırı başta olmak üzere arama kurtarma, zirai ilaçlama, yangın söndürme gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bununla beraber İHA'nın bazı görevleri otonom bir şekilde yerine getirebilmesi ise bilgisayarlı görü sisteminin buna entegrasyonu ile olur. Bu alandaki uygulamalardan biri olan havadan nesne tespiti uygulamaları, uzaklık, yakınlık kavramlarına bağlı olarak farklı boyutlardaki nesnelere tespit edememe, yavaş tespit, yanlış tahminleme gibi çeşitli hatalar içerebilir. Derin Öğrenme (DÖ) uygulamaları ile bu hatalar en aza indirilebilir. Bu çalışmada VRAT[1] video setinden alınan görüntülerle YOLOv3 DÖ ağı eğitilmiş ve daha sonra DJI Mavic 2 Zoom İHA kamerasından elde edilen görüntülerle tekrar eğitim yapılarak videodaki araçların ve yayaların tespiti sağlanmıştır. Eğitim ve test süreci Google Colab Tesla T4 GPU makinesinde gerçekleştirilmiştir. Modelin performansı ilk ve ikinci eğitim için Loss, mAP 2.345, %79 ve 1.171, %70.09 olarak bulunmuştur.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

## Article history:

Received 20 October 2022  
Received in revised form 23  
December 2023  
Accepted 18 March 2023  
Available online 23 March  
2023

## Keywords:

UAV, YOLOV3, Darknet-53

Today, Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have a wide range of uses such as border security, coast guard, defense, attack, search and rescue, agricultural spraying, fire extinguishing. However, the ability of the UAV to perform some tasks autonomously is possible with the integration of the computer vision system. Aerial object detection applications, which is one of the applications in this field, may contain various errors such as not being able to detect objects of different sizes, slow detection, wrong estimation, depending on the concepts of distance and proximity. These errors can be minimized with Deep Learning (DL) applications. In this study, the YOLOv3 DL network was trained with the images taken from the VRAT[1] video set, and retrained with the images obtained from the DJI Mavic 2 Zoom UAV camera to detect the vehicles and pedestrians in the video. The training and testing process was carried out on the Google Colab Tesla T4 GPU machine. The performance of the model for the first and second training was found as 2.345, 79% and 1.171, 70.09% for loss, and mAP values.

Doi: 10.24012/dumf.1191160

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

İnsansız Hava Aracı (İHA), bir operatör tarafından uzaktan kumanda edilebilen veya bir uçuş rotası boyunca otomatik hareket edebilen, göreve ilişkin faydalı yük taşıyabilen ve bir takım görevi otonom olarak yerine getirebilen bir hava aracıdır [2]. İHA'lar başlangıçta gözlem, saldırı ve savunma amaçlı üretilip kullanılsa da günümüzde gözetleme, keşif, taşımacılık, zirai ilaçlama, yangın söndürme, enerji nakil hatlarının bakım ve kontrolü, muhabirlik, fotoğraf ve video çekme gibi geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Bu kullanım alanlarının birçoğunda İHA'nın otonom olması, yani bir insan gibi görüp, değerlendirip, karar verip, aksiyon alması beklenir. Özellikle de yangın söndürme, sınır güvenliği, sahil güvenliği gibi kritik durumlarda, mesafeden veya başka sebeplerden dolayı komuta merkezi ile iletişim anında oluşabilecek ve sonuçları tolere edilemeyecek gecikmenin yaşanmaması adına, otonom karar ve aksiyon mekanizması, üzerinde durulması gereken çok önemli bir detaydır.

“Drone ile Çekilmiş Videolarda Derin Öğrenme Tabanlı İnsan ve Araç Tespiti” adlı çalışmada sinir ağı olarak YOLOv3 DarkNet-53 kullanılmıştır. Ağın 1000 adet resim ile eğitilmiş ve %78 civarında bir doğruluk oranına ulaşılmıştır [3]. “İnsansız Hava Araçlarının Derin Öğrenme Temelli Nesne Tespiti ve Tanınması” adlı bir diğer çalışmada Faster-RCNN ve YOLOv4'ün karşılaştırılması amaçlanmıştır. Tehdit edici unsurların tespiti ve tanınması için İHA'dan elde edilen 2595 adet askeri operasyon görüntüsü kullanılmıştır. Nesne tespiti ve tanınmasında Faster-RCNN mimarisinde yaklaşık %93 doğruluk oranı elde edilirken, YOLOv4 mimarisinde yaklaşık %88 oranında doğruluk elde edilmiştir [4]. DÖ tekniklerinden YOLOv2 modeli kullanılarak İHA'lardan elde edilen görüntülerdeki araçların tespiti üzerine yapılan çalışmada %77 doğruluk oranı elde edilmiştir [5]. İHA ile gerçek zamanlı ve bulut tabanlı nesne tespiti için Pascal VOC2012 veri seti ile eğitilen algoritmalarından Faster R-CNN ile %83.9, SSD300 ile %81.6, SSD500 %82.6, YOLO ile %78.3 ve Fast YOLO ile %79.4 doğruluk oranına ulaşılmıştır [6].

Çalışmanın kapsamı Derin Öğrenme (DÖ) algoritmalarından YOLOv3 algoritması kullanılarak İHA'dan alınan görüntüdeki araçların ve yayaların tespitidir. Giriş bölümünde, bu alanda yapılan benzer çalışmalara, Materyal ve Metot bölümünde kullanılan modelin başarımlarının hesaplanmasına ve YOLOv3 mimarisine ve çalışma prensibine değinilmiştir. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma bölümünde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Son Bölümde, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

## Materyal ve Metot

### DJI Mavic 2 Zoom Drone

Bu çalışmada, döner kanatlı İHA olan DJI Mavic 2 Zoom Drone kullanılmıştır. 31 dk uçuş süresine sahip olan Mavic 2 Zoom 1/2.3-inch 12-megapixel sensör ve 4x zoom ile güçlendirilmiş Zoom Kamera, 2x optik zoom (24–48 mm) lense sahiptir [7]. Şekil 1'de, çalışmada kullanılan Mavic 2 Zoom Drone görülmektedir.

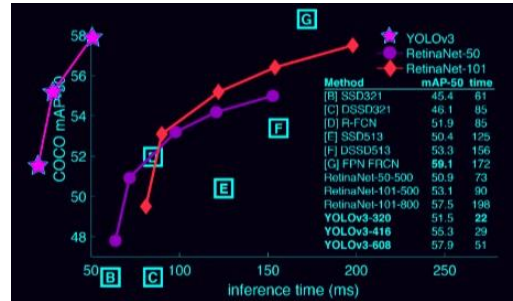


Şekil 1. DJI Mavic 2 Zoom Drone [7]

### YOLOv3 Mimarisi ve Çalışma Prensibi

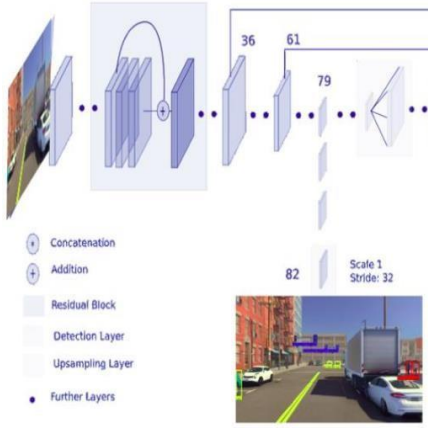
Nesne tespit, tanıma ve takibi işlemleri oldukça zor süreçlerdir. Görüntü üzerinde kayan bir pencere oluşturularak nesne aranır. Bu arama işlemi sırasında, nesneyi tanımlayan öznelik haritalarının oluşturulma işlemleri ve sınıflandırma işlemleri defalarca yapılır. Tüm bunlar ağır hesapsal yüküdür ve zaman gerektirir. Bununla beraber özellikle tespit, tanıma ve takip işlemlerinin havadan yapılması durumunda uzaklık, yakınlık, yükseklik kavramlarına bağlı olarak farklı boyutlardaki nesnelere tespit edememe, yavaş tespit, yanlış tahminleme gibi birkaç hata gündeme gelir.

YOLOv3, C/Cuda kullanılarak geliştirilmiş olan, temel katman sayısı 53 olan Darknet-53 framework'ü üzerinde çalışır. Bu sayede oldukça yüksek performans gösterir [8]. Darknet-53, girdi olarak bir görüntü alan ve öznelik haritasını çıkaran, YOLOv3 için bir omurgadır [9]. Şekil 2'de YOLOv3 ve diğer algoritmaların COCO veri setinde 0.5 IoU (mAP-50) ile karşılaştırması görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere YOLO rakiplerine karşı süre ve doğruluk açısından çok iyi durumdadır [10].

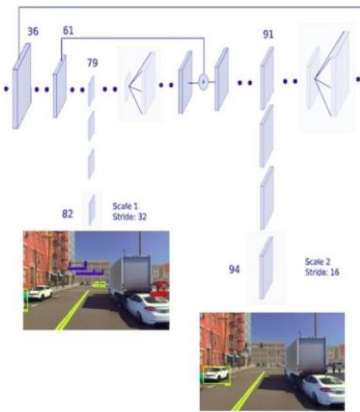


Şekil 2. YOLOv3 vs Diğer Algoritmalar [11].

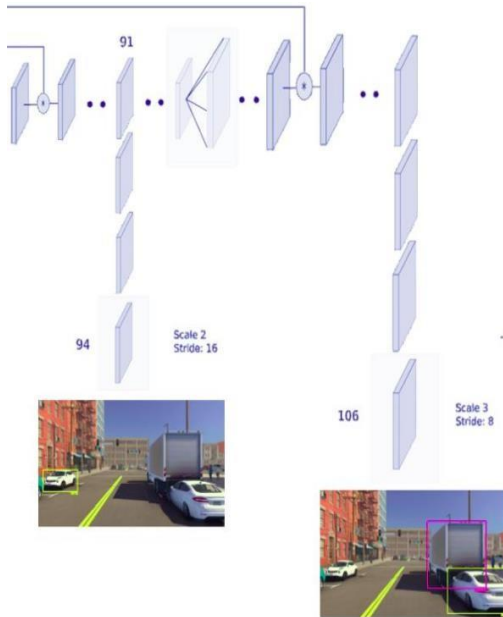
YOLOv3 algoritması üç ölçekte tahminler yapar. Şekil 3'deki 13×13 katmanı (Bölge 82) büyük maske kullanan en büyük tahmin ölçeğidir ancak küçük nesnelere tahmin edebilir. Şekil 4'deki 26×26 katmanı (Bölge 94) orta maske kullanan orta büyüklükteki tahmin ölçeğidir, orta büyüklükteki nesnelere tahmin edebilir. Şekil 5'deki 52×52 katmanı (Bölge 106) en küçük tahmin ölçeğidir, daha küçük bir maske ile daha büyük nesnelere tahmin edebilir [9]. Yani Bölge 82, Bölge 94, Bölge 106, üç farklı ölçekte (82, 94, 106) tahmin edilen farklı büyüklükteki parametreleri temsil eder [12].



Şekil 3. 13×13 katmanı Bölge 82 [9].



Şekil 4. 13×13 katmanı Bölge 82 ve 26×26 katmanı Bölge 94 [9]



Şekil 5. 26×26 katmanı Bölge 94 ve 52×52 katmanı Bölge 106 [9]

Bununla beraber YOLO, farklı boyuttaki nesnelere, sabitleme kutularını (Anchor Box) kullanarak öğrenir. Sabitleme Kutuları, gelişmiş performans için ayarlanması gereken en önemli parametrelerden biridir. Algoritma çalışırken çok fazla, gereksiz sınırlayıcı kutular, bir nesne için birden fazla sınırlayıcı kutu oluşacaktır [13]. Bu durumda maksimum olmayı önleme (non-maximum suppression) denen bir teknik uygulanır ve maksimum güven puanına sahip sınırlayıcı kutu dışındaki sınırlayıcı kutular silinir. Bahsi geçen, hesapsal yük ve zaman problemlerin çözümüne yönelik bir mimariye ve çalışma prensibine sahip olması açısından bu çalışmada YOLOv3 kullanılmıştır.

### Veri Seti

Veri Seti olarak Mavic 2 Zoom dan alınan videolar ve VIRAT [1] tarafından üretilen video veri setleri kullanılmıştır. Videolar ffmpeg yazılımı ile frame'lere ayrılmış, Mavic 2 Zoom videolarından 377 resim, VIRAT [1] videolarından 500 resim, toplamda 877 resim kullanılmıştır. Resimlerin etiketleme işlemi LabelImg [14] aracı ile yapılmış olup, yazılan bir kod bloğu yardımı ile %90'i eğitim seti, %10'u doğrulama (test) seti olacak şekilde rassal olarak ayrılmıştır.

### Modelin Başarım Ölçütleri ve Hesaplanması

Sınıflandırma çalışmalarında bir modelin başarısını ölçmek ve sayısal olarak ifade etmek için doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F1-score gibi metrikler kullanılır. Ancak, bu çalışmada nesnelere sınıflandırılmasına ek olarak konumlarının bulunması da amaçlandığından başarımlar ölçüsü olarak bir sınıf olduğu durumda ortalama kesinlik değeri (Average Precision - AP) birden fazla sınıf olduğu durumlarda ise genel ortalama kesinlik değeri (mean average precision - mAP) kullanılır.

**Doğruluk (Accuracy):** Bir modelin başarısını ölçmek için çok kullanılan ancak tek başına yeteli olmayan bir metriktir.

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

**Kesinlik (Precision):** Modelin yaptığı "pozitif" tahminlerin, gerçekte kaçının "pozitif" olduğunu gösteren bir metriktir.

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

**Duyarlılık (Recall):** Modelin yapması gereken "pozitif" tahminlerden, gerçekte kaçını pozitif tahminlediğini gösteren bir metriktir.

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

**F1-score:** Eşit dağılmayan veri kümelerinde hatalı bir model seçimi yapmamak için doğruluk (accuracy) yerine tercih edilen bir metriktir. F1-skoru, kesinlik değerinin ve duyarlılık değerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanır.

$$F1 - score = 2 \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

**Ortalama Kesinlik Değeri (Average Precision):** Ortalama kesinlik değeri (AP), kesinlik-duyarlılık (precision-recall) eğrisi altında kalan alandır. Modelin tahminlerinin ne kadar doğru olduğunu ölçer, yani doğru olan tahminlerin yüzdesel gösterimidir.

$$AP = \int_0^1 p(r) dr \quad (5)$$

**Genel Ortalama kesinlik değeri (Mean average precision):** AP, her nesne sınıfı için hesaplanır. Sınıf sayısının birden fazla

olması durumunda ise genel ortalama kesinlik değeri yani mAP değeri hesaplanır. Bu da tüm nesne sınıflarına ait AP değerinin ortalamasıdır.

Model mAP değerine göre değerlendirilir, mAP modelin hassasiyetinin iyi bir ölçüsüdür.

$$mAP = \frac{\sum_{i=1}^N AP_i}{N} \quad (6)$$

### Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmada kullanılacak olan Darknet-53 framework'ü klonlanır ve derlenir. Bu işlemin yapıldığı yerde "darknet" adında bir klasör oluşur. Bu klasör eğitim işlemi için Google Colab'da kullanılacak olan klasördür.

i) "darknet" klasörü içerisine "custom\_data" adında bir klasör oluşturulur.

ii) "custom\_data" klasörü içerisine "cfg" ve "images" adında iki klasör, "custom.names", "train.txt", "test.txt" ve "detector.data" adlarında dört dosya oluşturulur.

iii) "cfg" adlı dosya, sinir ağının konfigürasyon dosyasıdır.

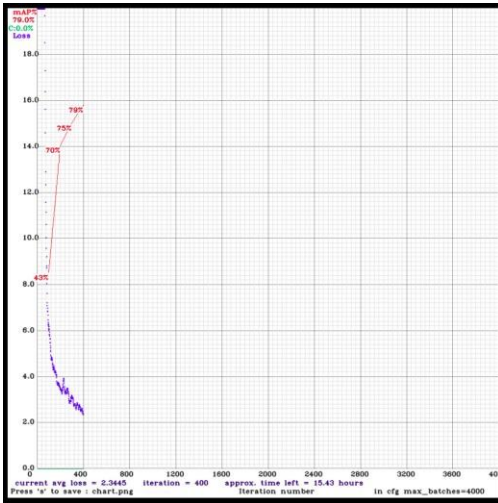
iv) "images" adlı dosya içerisinde eğitim ve test işlemleri için kullanılacak olan resimler ve resimlerin etiketleri bulunur.

v) "custom.names" adlı dosya içerisine ağın öğrenmesi ve tespit etmesi istenen objelerin sınıf isimleri "car" ve "person" şeklinde yazılır.

vi) "train.txt" ve "test.txt" dosyaları içerisinde eğitim ve doğrulama için kullanılacak olan "images" klasöründeki resimlerin yolları yazılır.

vii) "detector.data" adlı dosya içerisine ise eğitim esnasında ihtiyaç duyulacak "custom.names", "train.txt" ve "test.txt" dosyalarının erişim yolları, sınıf isimlerinin sayısı ve eğitim esnasında eğitilen ağırlıkların tutulacağı dosyanın yolu yazılır.

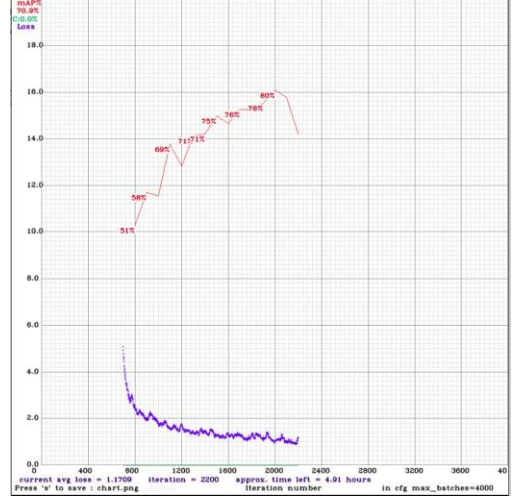
Bahsi geçen "cfg" adlı dosya içerisinde bazı konfigürasyonlar yapıldıktan sonra, eğitim işlemi yapılmıştır. Elde edilen mAP değerleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. İlk Eğitim mAP Grafiği

Şekil 6'deki mAP grafiğinde de görüldüğü gibi ilk eğitim 15.43 saat sürmüş, ortalama loss değeri 2.345 ve mAP değeri %79 olacak şekilde bir başarı elde edilmiştir.

Ancak ilk eğitim sonrası loss değeri istenen şekilde küçülmediğinden, ağ yeniden eğitime tabi tutulmuş ve Şekil 7'deki değerler elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere eğitim yaklaşık 5 saat sürmüş ve loss değeri 1'e yaklaşmıştır. Bununla beraber mAP değerinin önceki değere kıyasla %71'e düştüğü görülmektedir.



Şekil 7. Yeniden eğitim sonrası mAP grafiği

Eğitim ve yeniden eğitim süreçlerinde kullanılan veri seti sayıları ve eğitim sonrası elde edilen loss ve mAP değerleri Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1: Eğitim - yeniden eğitim süreçlerinde kullanılan veri setleri ile eğitim sonrası elde edilen loss ve mAP değerleri

	Veri Seti	Eğitim Seti	Doğrulama Seti	Loss Değeri	mAP Değeri(%)
İlk Eğitim	500	450	50	2.345	79
Yeniden Eğitim	377	339	388	1.171	70.9

Tablo 2'de, elde edilen mAP değerlerinin sonuçlarının bu çalışma ile neredeyse birebir aynı olan YOLOv3 DarkNet-53 kullanılarak araç ve yaya tespiti yapan "Drone ile çekilmiş Videolarda Derin Öğrenme Tabanlı İnsan ve Araç Tespiti" adlı çalışma [3] ile karşılaştırma tablosu görülmektedir.

Tablo 2. Çalışma sonuçlarının [3] ile karşılaştırılması.

	Eğitim Seti	Öğrenme Katsayısı	Küme Boyutu	Loss Değeri	mAP Değeri(%)
İlk Eğitim	500	0.001	32	2.345	79
Yeniden Eğitim	377	0.001	32	1.171	70.9
[3]	1000	0.001	64	--	78.84
[3]	1000	0.001	128	--	77.23

Tablodan da görüldüğü gibi başarı oranı %70-80 arasında olmaktadır. Bununla birlikte eğitim verisi arttıkça başarı oranı arttırmakta ancak yapılan yeni eğitimde bir önceki eğitime göre başarı oranı azalmaktadır.

Eğitim ve Yeniden eğitim sonrası elde edilen ağırlıklar test işlemine tabi tutulduklarında Şekil 8'de İlk eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerinde test sonuçları, Şekil 9'da ise Yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerinde test sonuçları görülmektedir.



Şekil 8. İlk eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerinde test edilmesi



Şekil 9. Yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerinde test edilmesi

Şekil 10 ve Şekil 11'de ise İlk eğitim ve Yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların video üzerinde test sonuçları görülmektedir.



Şekil 10. İlk Eğitim sonrası oluşan ağırlıkların video üzerinde test edilmesi



Şekil 11. Yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların video üzerinde test edilmesi

İlk eğitim sonrası oluşan ağırlıklar ile yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıklar aynı resim ile test edilmek istendiğinde Şekil 12 ve Şekil 13'de testin resim üzerindeki sonucu, Tablo 3 ve Tablo 4'de ise testin süre ve yüzde bazında ağ çıktısı görülmektedir.



Şekil 12. İlk eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerindeki tespitleri

Tablo 3. Şekil 12'deki tespitlerin süre ve yüzde bazlı ağ çıktısı

Tahmin Süresi(ms)	602.322
car	%38
car	%28
car	%32
car	%37



Şekil 13. Yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerindeki tespitleri

Tablo 4. Şekil 13'deki tespitlerin süre ve yüzde bazlı ağ çıktısı

Tahmin Süresi(ms)	599.079
car	%100
person	%98
car	%100
person	%99

Tablo 5'de, Şekil 12, Tablo 3, Şekil 13 ve Tablo 4'deki ilk eğitilen ağırlıklar ile yeniden eğitilen ağırlıkların seçilen resim üzerindeki tahmin sonuçlarının değerlendirilmesi görülmektedir.

Tablo 5. Eğitim - yeniden eğitim tahmin sonuçlarının değerlendirilmesi

	Tespit süresi(ms)	Tahmin(%) Sınıf 1 (Car)	Tahmin(%) Sınıf 2(Person)
İlk Eğitim	602.3	34	0
Yeniden Eğitim	599.1	100	99

## Sonuçlar

Bu çalışmada, DÖ yöntemi ile İHA'dan alınan video görüntülerindeki araçların ve yayaların tespiti amaçlanmıştır.

İHA olarak DJI Mavic 2 Zoom Drone kullanılmıştır. Mavic 2 Zoom 1/2.3-inch 12-megapixel sensör ve 4x zoom ile güçlendirilmiş Zoom Kamera, 2x optik zoom (24-48 mm) lense sahiptir [7].

DÖ algoritması olarak ESA mimarilerini kullanan ve nesne tanıma mimarileri arasında en fazla öne çıkan Darknet-53 framework'ü üzerinde çalışan YOLOv3 algoritması kullanılmıştır.

Veri seti olarak Mavic 2 Zoom dan alınan video görüntülerden 377 resim, VIRAT [1] tarafından üretilen video

datasetlerinden 500 resim, toplamda 877 resim kullanılmıştır.

Video'yu, frame'lere ayırmak için ffmpeg yazılımı kullanılmıştır. Resimlerin etiketleme işlemi LabelImg [14] aracı ile yapılmış olup, %90'i eğitim, %10'u doğrulama (test) seti olacak şekilde bir kod bloğu yardımı ile rassal olarak ayrılmıştır.

Algoritma Google Colab Tesla T4 GPU makinesi kullanılarak eğitilmiştir. Eğitim yaklaşık 16 saat sürmüş olup, ortalama loss değeri 2.345 ve mAP değeri %79 olacak şekilde bir başarımla elde edilmiştir.

DÖ Ağı, ilk eğitim setinde hiçbir şekilde benzeri olmayan Mavic 2 Zoom ile elde edilen resimler (Şekil 9, Şekil 11, Şekil 12) ile test edilmiştir. Bu test işleminde Şekil 9'deki spor aletlerinin bir kısmını yaya bir kısmını da araç olarak tespit etmesi, Şekil 11'deki ağaçları yaya olarak tespit etmesi ve Şekil 12'deki oturan ve araç içerisindeki yayaları tespit edememesinden dolayı ilk eğitim sonucunda oluşan ağırlık değerleri yeniden eğitim işlemine tabi tutulmuştur. Eğitim yaklaşık 5 saat sürmüş, loss değeri istendiği gibi azalıp 1'e yaklaşmıştır. Bununla beraber mAP değerinin önceki değere kıyasla %70.9'a düşmesi istenmeyen ve beklenmeyen bir durumdur.

Tablo 1'de yukarıda bahsi geçen eğitim ve yeniden eğitim sonrası elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde görülmektedir. Bununla beraber Tablo 2'deki [3] referans nolu çalışma ile bu çalışmanın değerleri incelendiğinde, öğrenme katsayılarının iki çalışmada da aynı olduğu ancak küme boyutu (batch) ile kullanılan veri setlerinin farklı olduğu, bu çalışmadaki veri setinin sayıca daha az olduğu görülmektedir. Bununla beraber [3] referans nolu çalışmanın eğitildiği ortam ve loss değeri ile ilgili detaylar bilinmemektedir. Tablo 2'deki mAP değerleri incelendiğinde ise bu çalışmanın ilk eğitimi sonrası elde edilen mAP değerinin, [3] referans nolu çalışmanın mAP değeri ile aynı olduğu görülmektedir. Ancak ilk eğitim sonrası elde edilen ağırlıkların detaylı testi sonucu, yapılan bazı yanlış tespitler, araştırmacıyı yeniden eğitim işlemine itmiştir ancak elde edilen sonuç kısmen beklendiği gibi olmayıp mAP değeri %70.9'a gerilemiştir. Eğitim setinin az olması ve çalışma boyunca Google Colab'da yaşanan problem yani Google Colab'da başlatılan eğitimin tamamlanmadan sonlanması ise tespit edilen sebepler arasında gösterilebilir.

Şekil 9, Şekil 11, Şekil 12'deki yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerindeki tahmin sonuçları ile Şekil 8 ve Şekil 10'deki ilk eğitim sonrası oluşan ağırlıkların resim üzerindeki tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar ilk bakışta her ne kadar benzer gibi görünsün de ilk eğitime kıyasla ikinci eğitimdeki tahmin oranları daha da artmıştır. Bu, ilk eğitim sonrası oluşan ağırlıklar ile yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların aynı resim üzerindeki test sonuçlarında, Şekil 12, Tablo 3, Şekil 13 ve Tablo 4'de çok daha net görülmektedir.

Şekil 12 ve Şekil 13'de testin resim üzerindeki sonucu, Tablo 3 ve Tablo 4'de ise testin süre ve yüzde bazında ağ çıktısı görülmektedir. Tablo 5'de, ilk eğitim sonrası oluşan ağırlıkların ve yeniden eğitim sonrası oluşan ağırlıkların tespit süreleri ile araç ve yaya bazında tespit oranları görülmektedir. Test için kullanılan resimdeki 2 aracın ve 2 yayanın tahmin ortalama başarımlarını yüzde olarak incelendiğinde araç ve yaya başarımlarının ilk eğitimde %34 ve %0 iken yeniden eğitimde %100 ve %99 ile istenen sonuca erişmiştir. Burada da ilk eğitim setine çok daha farklı resimlerin eklenip, eğitim setinin daha da zenginleştirilmesi ve yeniden eğitim yapılması Şekil

13 ve Tablo 4'deki tahmin başarımının Şekil 12 ve Tablo 3'deki başarımdan yüksek olmasının nedenlerinden biri olarak gösterilebilir.

Sonuç olarak, veri seti sayısının artırılması, konfigürasyon dosyasındaki parametrelerin daha iyi ayarlanması ve eğitim işleminin daha iyi bir makinede yapılması çok daha iyi mAP değeri ve loss değerine erişilmesine olanak tanır.

İleriki süreçte varılan sonuçlar üzerinden bahsi geçen çalışmanın iyileştirilmesi üzerinde ilerlenecek ve ek olarak tespitlerin gerçek zamanlı (real time) yapılması üzerine çalışılacaktır.

## Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır

## Yazar Katkıları

Muhammet Ali ARSERİM ve Aysan ÇETİN

-Çalışma konsepti ve tasarım

-Veri toplama

-Verilerin analizi ve yorumlanması üzerinde çalışmışlardır.

## Teşekkür

Bu çalışma, DÜBAP MÜHENDİSLİK.19.007 nolu proje tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] The Virat Video Dataset, 11 Jan 2012. Erişim Tarihi: 18 Mayıs 2020. <https://viratdata.org/>
- [2] O. Bayraktar, F. Özdemir, Ö. Çetin ve G. Yılmaz, "İnsansız Hava Araçları İçin Otonom İniş Sistemi Simülasyonu Tasarımı", Bilişim Teknolojileri Dergisi, c: 5, sayı: 2, ss: 1-8, 2012.
- [3] B. Bender, M. E. Atasoy ve F. Semiz, "Deep Learning-Based Human and Vehicle Detection in Drone Videos", 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), pp. 446-450, September 2021.
- [4] Ozkan, Z., Bayhan, E., Namdar, M., & Basgumus, A. "Object Detection and Recognition of Unmanned Aerial Vehicles Using Raspberry Pi Platform", In 2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), pp: 467-472), 2021.
- [5] T. Tang, Z. Deng, S. Zhou, L. Lei ve H. Zou, "Fast vehicle detection in UAV images", 2017 International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing (RSIP), pp. 1-5, May 2017.
- [6] J. Lee, J. Wang, D. Crandall, S. Šabanović ve G. Fox, "Real-time, cloud-based object detection for unmanned aerial vehicles", 2017 First IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), (pp. 36-43), April 2017.
- [7] MAVIC 2 Specs - Mavic 2 Zoom, DJI, Erişim Tarihi: 12 Ocak 2022. [https://www.dji.com/mavic-2?site=Brandsite&from=insite\\_search](https://www.dji.com/mavic-2?site=Brandsite&from=insite_search)
- [8] H. V. Karakuş, Darknet YOLOv3 hızlı bakış, 2020. Erişim tarihi: 23 Kasım 2021. <https://medium.com/@karakus.haciveli/darknet-yolov3-hizli-bakis-ddc9cd5582ea>

[9] S. Dulepet, P. Maji, M. Harsh and K. Washabaugh, Deploying a Scalable Object Detection Inference Pipeline Part, 2020. Erişim Tarihi:21 Aralık 2020. <https://developer.nvidia.com/blog/deploying-a-scalable-object-detection-inference-pipeline/>

[10] Y. Mesci, YOLO Algoritmasını Anlamak, 2019. Erişim tarihi: 7 Aralık 2021. <https://medium.com/deep-learning-turkiye/yolo-algoritmasını-anlamak-290f2152808f>

[11] YOLO: Real-Time Object Detection, Erişim tarihi: 7 Aralık 2021. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/>

[12] The meaning of output parameters during YOLO v3 training. Erişim Tarihi: 31 Ağustos 2022. <https://blog.actorsfit.com/a?ID=00850-083895a9-5fda-4738-939b-1149afe66ca1>

[13] A. Christiansen, Anchor Boxes - The key to quality object detection, 2018. Erişim tarihi: 7 Aralık 2021. <https://towardsdatascience.com/anchor-boxes-the-key-to-quality-object-detection-ddf9d612d4f9>

[14] <https://github.com/tzutalin/labelImg>



## A k-mer based metaheuristic approach for detecting COVID-19 variants

Hilal ARSLAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt University, Software Engineering Department, hilalarlanceng@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-6449-6952

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 27 October 2022  
Received in revised form 31  
January 2023  
Accepted 3 February 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

COVID-19, SARS-CoV-2, Whale  
Optimization Algorithm,  
Classifiers, Feature Selection,  
Machine Learning

Doi: 10.24012/dumf.1195600

\* Corresponding author

### ABSTRACT

Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) belongs to coronaviridae family and a change in the genetic sequence of SARS-CoV-2 is named as a mutation that causes to variants of SARS-CoV-2. In this paper, we propose a novel and efficient method to predict SARS-CoV-2 variants of concern from whole human genome sequences. In this method, we describe 16 dinucleotide and 64 trinucleotide features to differentiate SARS-CoV-2 variants of concern. The efficacy of the proposed features is proved by using four classifiers, k-nearest neighbor, support vector machines, multilayer perceptron, and random forest. The proposed method is evaluated on the dataset including 223,326 complete human genome sequences including recently designated variants of concern, Alpha, Beta, Gamma, Delta, and Omicron variants. Experimental results present that overall accuracy for detecting SARS-CoV-2 variants of concern remarkably increases when trinucleotide features rather than dinucleotide features are used. Furthermore, we use the whale optimization algorithm, which is a state-of-the-art method for reducing the number of features and choosing the most relevant features. We select 44 trinucleotide features out of 64 to differentiate SARS-CoV-2 variants with acceptable accuracy as a result of the whale optimization method. Experimental results indicate that the SVM classifier with selected features achieves about 99% accuracy, sensitivity, specificity, precision on average. The proposed method presents an admirable performance for detecting SARS-CoV-2 variants.

## Introduction

SARS-CoV-2 detected in 2019 caused a disease called COVID-19 by spreading rapidly around the world. The spread of SARS-CoV-2 in many countries has led to multiple SARS-CoV-2 variants and accurate detection of SARS-CoV-2 variants is crucial to fight the COVID-19 pandemic. Early detection of SARS-CoV-2 is crucial to prevent infection. Several methods have been released to detect SARS-CoV-2. While some methods detect COVID-19 from images belonging to people, others detect the disease from genome sequences. Using genome sequencing including four nucleotides, A, G, C, and T in 30,000 bps is preferred to monitor SARS-CoV-2 variants. Recent dominant variants of SARS-CoV-2 are B.1.1.7, B.1.351, P.1., B.1.617, and B.1.1.529. The Alpha variant, B.1.1.7 [1] was determined in the United Kingdom in the fall of 2020, and it spreads about 50% more quickly than the original SARS-CoV-2 [2]. Although current treatments against Alpha variant are effective, the Alpha variant may cause more severe COVID-19 disease. Beta variant, B.1.351 [3] is diagnosed in South Africa and Gamma variant, P.1 [4] first detected in Brazil at the end of 2020 spread less quickly than Alpha variant; however, current treatments against Beta and Gamma variants are less effective. Delta variant,

B.1.617 [5] first identified in India may cause more severe disease when compared to the other variants. Furthermore, Delta variant spreads about 100% more quickly than SARS-CoV-2 [2]. It is not adequate information on whether it causes more severe COVID-19 disease, or not. Finally, Omicron variant, B.1.1.529 [6] was detected in South Africa in November 2021.

Although several types of studies are released to diagnose SARS-CoV-2 [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13], there are a limited number of algorithms for determining SARS-CoV-2 variants. Ahmed et al. [14] clustered Omicron variant by analyzing mutations. Mohiuddin and Kasahara [15] investigated Omicron variant and suggest possible treatment strategies. Wang et al. [16] applied principal component analysis to diagnose COVID-19 by analyzing more than 20,000 RNA sequences. Khan et al. [17] applied deep learning techniques to detect Omicron variant from chest X-ray and computed tomography. Basu and Campbell [18] classified COVID-19 variants by applying deep learning models from genome sequences. They proposed k-mer based long short-term memory model that is an alignment-free method. Their method achieved an accuracy of 92.5%. Mann et al. [19] classified SARS-CoV-2 variants with mass spectrometry. They defined peptide signatures of unique mass to detect SARS-CoV-2 main variants of

concern. Recently, Togrul and Arslan [20] proposed a deep learning method to detect SARS-CoV-2 variants and Arslan [21] published a paper to detect SARS-CoV-2 variants in Turkey.

Although there are many studies to detect SARS-CoV-2, a limited number of studies have been published to detect SARS-CoV-2 variants of concern. In this study, we introduce a method for determining SARS-CoV-2 variants from genome sequences. We list our contributions below:

- We proposed an accurate method to detect SARS-CoV-2 variants from SARS-CoV-2 nucleotide sequences
- We describe 16 dinucleotide and 64 trinucleotide features
- Whale optimization algorithm that is a state-of-the-art feature selection method is employed to select most representative features
- We evaluate the effectiveness of dinucleotide and trinucleotide features, separately by using four classifiers, k-nearest neighbor, multilayer perceptron, support vector machines, and random forest
- We construct a large dataset including 223,326 SARS-CoV-2 genome sequences. The dataset includes various types of SARS-CoV-2, Alpha, Beta, Delta, Gamma, and Omicron
- The proposed method accurately detects SARS-CoV-2 variants of concern

The remaining part of this study is organized as follows. The proposed method is introduced in Section 2. Experimental results are evaluated and compared in Section 3. Finally, Section 4 includes the conclusion.

## The Proposed Approach for Detecting SARS-CoV-2 Variants

In this section, we introduce the proposed approach for detecting SARS-CoV-2 variants. The fundamental steps of the proposed approach are presented in Figure 1, and detailed steps of the algorithm are also given in Algorithm 1. The algorithm receives complete genome sequences of SARS-CoV-2 as the input. First, features separating SARS-CoV-2 variants are extracted from complete human genome sequences. In this step, we use dinucleotide occurrences or trinucleotide occurrences as features separating SARS-CoV-2 variants. The information in the sequence is stored using four bases, which are adenine (A), thymine (T), cytosine (C), and guanine (G). Dinucleotide is a sequence of two nucleotides, and trinucleotide is a triplet of nucleotides. There are 16 dinucleotide and 64 trinucleotide patterns in total. Thus, we extract 16 dinucleotide features and 64 trinucleotide features for each sequence in the dataset. In this step, we propose to use trinucleotide features since they represent the genome sequence at a higher level. To determine the optimal trinucleotide subset, whale optimization algorithm, which is a state-of-the-art method

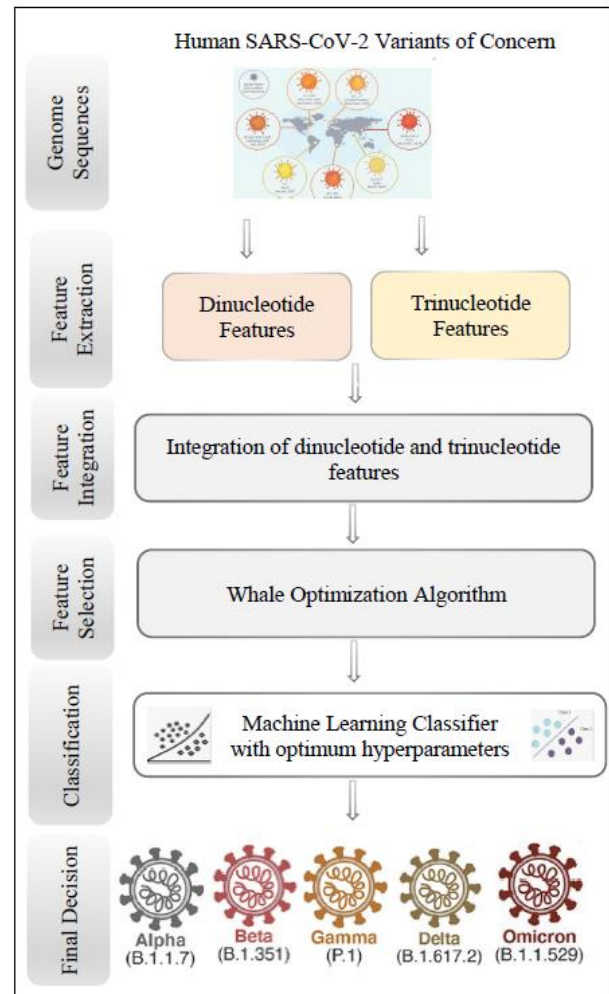


Figure 1. Main steps of proposed algorithm

for feature selection tasks is used. As a result of the whale optimization algorithm, the occurrences of the trinucleotides that are AAA, ACA, ATG, ACC, AGT, AGC, AGG, CTA, CCC, TAT, TTC, TTT, TTG, TCT, GTT, GTG, GCC, GCT, GGC, and GGT are excluded from the feature set, and the remaining 44 trinucleotide occurrences are used to differentiate SARS-CoV-2 variants. We apply four types of machine learning classifiers to evaluate the performance of the proposed features. Next we briefly explain feature selection and classifiers performed in this study.

### Whale Optimization Algorithm (WOA) for Feature Selection

We perform WOA to reduce the dimensionality of the data with acceptable accuracy. WOA is a bioinspired algorithm focused on hunting behavior of humpback whales [22]. This method consists of three main steps. The first step is encircling prey, and in this step, the method produces  $k$  humpback whales which are randomly scattered in the search space. The best whales are determined by evaluating the position of each humpback whale. The second step is exploitation phase, and humpback whales initiate to attack using a bubble-net strategy in this step. Two strategies used



in this step are shrinking encircling and spiral updating position for bubble-net attacking. Each whale proposes a subset of the features that are evaluated based on the accuracy of the classifier. The last step is exploration phase, and in this step, humpback whales look for prey for the position of each other randomly. The main steps and the pseudocode of the WOA can be found in [22].

---

**Algorithm 1** Proposed approach for detecting SARS-CoV-2 variants of concern

---

**Inputs:**

- Genome sequences of human SARS-CoV-2: *genomicData*
- Label of each SARS-CoV-2 sequence: *Alpha*, *Beta*, *Gamma*, *Delta*, and *Omicron*
- SARS-CoV-2 sequence for testing: *unknownSeq*

**Output:** Determine the variant of *unknownSeq*

**Trinucleotide Features:**

- 1: **for** each sequence *seq* in *genomicData* **do**
- 2:     Compute trinucleotide features
- 3: **end for Feature Reduction**
- 4: Apply whale optimization algorithm to reduce the number of features

**Parameter Tuning**

- 5: Apply grid search to obtain best performing hyperparameters of the classifier

**Classification Step:**

- 6: Compute trinucleotide features for *unknownSeq*
  - 7: Perform the machine learning classifier (SVM is suggested)
  - 8: Determine the variant of *unknownSeq*
- 

**Applied Machine Learning Techniques**

*K-nearest neighbor (KNN)* [23, 24] is a non-parametric machine learning method. The method includes *k* hyperparameter that represents the number of neighbors. Data samples are classified with respect to *k* neighbors. The accuracy of the method depends on two hyperparameters, the selection of *k* and distance measures. We perform grid search approach through 5-fold cross validation to define optimum hyperparameters. In grid search approach, *k* value is chosen between 1 and 10, and the possible distance measures are manhattan, euclidean, and chebyshev.

*Multilayer Perceptron (MLP)* [25] is a type of artificial neural network. In this study, a MLP model with one hidden

layer is used. For optimal determination of the number of neurons in the hidden layer and activation function, we perform 5-fold cross validation with grid search. In grid search, the number of neurons in the hidden layer is set to 50, 100, and 150, and the logistic sigmoid, hyperbolic tangent as well as the rectified linear unit are used as the activation functions.

*Support Vector Machines (SVM)* [26, 27, 28] is a machine learning method used for solving classification and regression problems. The goal is to construct a hyperplane that separates data samples for the classification problems. We use Radial Basis Function (RBF) for achieving non linearity [29, 30]. The selection of RBF kernel parameter ( $\gamma$ ) and penalty parameter (*c*) related to SVM model are crucial. We determine these parameters by performing 5-fold cross validation with grid search. The possible values of *c* are  $\{2^{-5}, 2^{-1}, 2^9\}$  and the possible values of  $\gamma$  are  $\{2^{-9}, 2^{-5}, 2^{-1}, 2^3\}$ .

*Random Forest (RF)* [31, 32] is an ensemble classifier that constructs multiple decision trees and subset of training samples are selected randomly. We perform grid search with 5-fold cross validation for achieving the best results.

**Results and Discussion**

In this section, we conduct several experimental studies to prove the efficacy of the proposed features discriminating SARS-CoV-2 variants. All experiments are implemented on a 64-bit Windows 10 Enterprise operating system running on Intel i7-6700HQ CPU CPU @2.50 GHz processor and 16GB RAM. All methods are implemented using Python language.

**Dataset**

Our dataset includes SARS-CoV-2 genome sequences of SARS-CoV-2 from the Global Initiative on Sharing All Influenza Data (GISAID) database [33]. All genome sequences in the dataset are complete and high coverage to minimize sequencing errors. WHO Label, scientific name, date of designation, and the number of sequences used in this study are presented in Table 1.

Table 1. Variants of SARS-CoV-2

WHO Label	Scientific Name	Date of Designation	Number of sequences
Alpha	B.1.1.7	October, 2020	54,467
Beta	B.1.351	December, 2020	25,455
Delta	B.1.617.2	October, 2020	46,221
Gamma	P.1	January, 2021	53,501
Omicron	B.1.1.529	November, 2021	43,682

## Performance Metrics

We perform multi-class classification since our dataset includes seven variants of SARS-CoV-2. We perform 5-fold cross validation technique to evaluate the performance of the methods. In this approach, the dataset is divided in 5 parts. While four parts are used for training, the other one part is used for testing. The method is continued until all parts are tested. The performances of the classifiers are measured using different metrics, which are precision, sensitivity, specificity, and accuracy. We use macro-averaging [34] to evaluate overall performance of a class as shown in Table 2.

Furthermore, we show the confusion matrices for each classifier separately. We illustrate the confusion matrix focusing on Beta class labelling the tiles accordingly in Figure 2.

Table 2. Performance measurements for evaluating classifiers

Performance Metric	Formula for each class $c$	Average Metric
Precision(Pre)	$\frac{TP(c)}{TP(c)+FP(c)}$	$\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 Pre(i)$
Sensitivity(Sen)	$\frac{TP(c)}{TP(c)+FN(c)}$	$\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 Sen(i)$
Specificity (Spe)	$\frac{TN(c)}{TN(c)+FP(c)}$	$\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 Spe(i)$
Accuracy(Acc)	$\frac{TP(c)+TN(c)}{TP(c)+FN(c)+FP(c)+TN(c)}$	$\frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 Acc(i)$

		Predicted Label				
		Alpha	Beta	Gamma	Delta	Omicron
Actual Label	Alpha	TN	FP	TN	TN	TN
	Beta	FN	TP	FN	FN	FN
	Gamma	TN	FP	TN	TN	TN
	Delta	TN	FP	TN	TN	TN
	Omicron	TN	FP	TN	TN	TN

Figure 2. Confusion matrix for the class Beta

## Experimental Results

In this section, we evaluate and present results of the machine learning classifiers using dinucleotide and trinucleotide features, separately on the dataset including variants of the SARS-CoV-2.

### Results of the machine learning classifiers on dinucleotide features

In this part, we evaluate results of machine learning classifiers to prove the effectiveness of the dinucleotide features to predict SARS-CoV-2 variants. The hyperparameters of the classifiers are determined by grid search with 5-fold cross validation.

In the KNN classifier,  $k$  is set to 3, and manhattan distance is used. In the MLP method, the hyperbolic tangent function is used as an activation function, and the number of neurons in the hidden layer is 100. In the SVM method,  $c$  is 512 and  $\gamma$  is  $2^{-9}$ . Finally, in RF, criterion is *gini*, maximum depth of tree is 25, the minimum number of the sample leaf is 1, and the minimum number of sample split is 3. The results of the classifiers are obtained with respect to these parameters.

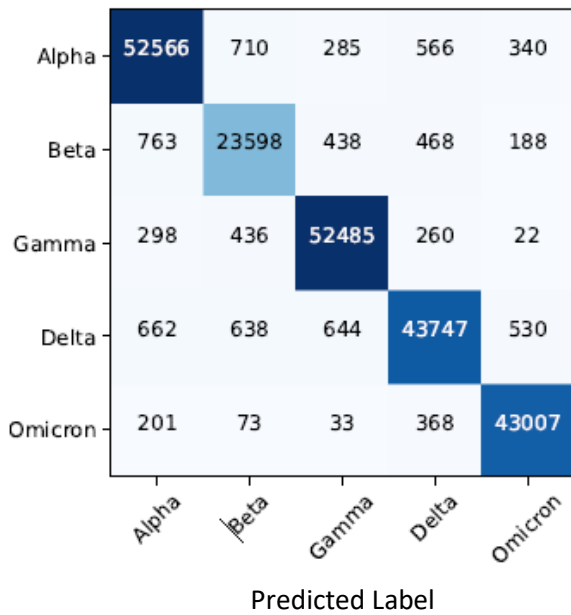
Figure 3 shows confusion matrices of machine learning classifiers on the dinucleotide features extracted from the genome sequences. The results of four classifiers are close to each other. The MLP classifier achieves better performance, and it correctly labels 52,752 of 54,467 genome sequences of *Alpha* variant, 23,549 of 25,455 genome sequences of *Beta* variant, 52,360 of 53,501 genome sequences of *Gamma* variant, 44,237 of 46,221 genome sequences of *Delta* variant, and 43,012 of 43,682 genome sequences of *Omicron* variant. Table 3 presents both variant-based and average results of the machine learning classifiers. As seen in Table 3, average results of the machine learning classifiers are close to each other. The average accuracy values of the classifiers vary between 0.98 and 0.99. Similarly, average specificity values are about 0.99. On the other hand, average sensitivity and precision values are lower when compared to average accuracy and specificity values. Average sensitivity and precision values vary between 0.94 and 0.96.

Table 3. Performances of the machine learning classifiers using dinucleotide features

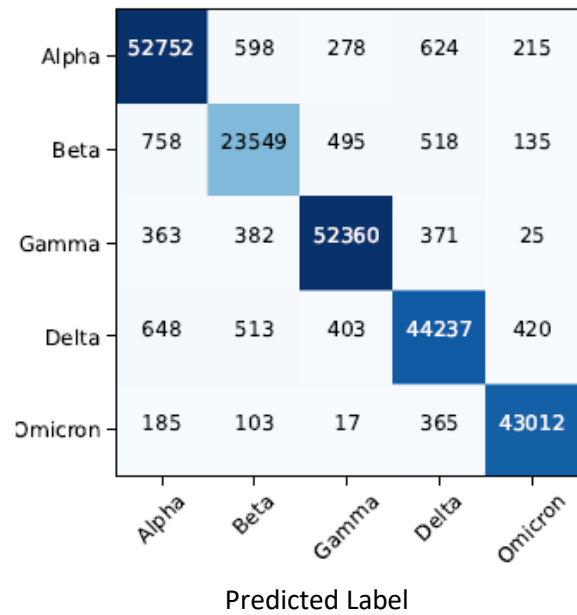
Method	SARS-CoV-2 Variant	Variant based results				Average results			
		Acc	Sen	Spe	Pre	Acc	Sen	Spe	Pre
KNN	Alpha	0.98	0.97	0.99	0.96				
	Beta	0.98	0.93	0.99	0.93				
	Gamma	0.99	0.98	0.99	0.97	0.99	0.96	0.99	0.96
	Delta	0.98	0.95	0.99	0.96				
	Omicron	0.99	0.98	0.99	0.98				
MLP	Alpha	0.98	0.97	0.99	0.96				
	Beta	0.98	0.93	0.99	0.94				
	Gamma	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99	0.96
	Delta	0.98	0.96	0.99	0.96				
	Omicron	0.99	0.98	1	0.98				
SVM	Alpha	0.97	0.95	0.98	0.94				
	Beta	0.98	0.89	0.99	0.91				
	Gamma	0.98	0.96	0.99	0.97	0.98	0.94	0.99	0.94
	Delta	0.97	0.93	0.98	0.94				
	Omicron	0.99	0.98	0.99	0.96				
RF	Alpha	0.98	0.97	0.99	0.97				
	Beta	0.98	0.92	0.99	0.95				
	Gamma	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99	0.96
	Delta	0.98	0.96	0.99	0.96				
	Omicron	0.99	0.99	0.99	0.97				

### Results of the machine learning classifiers on trinucleotide features

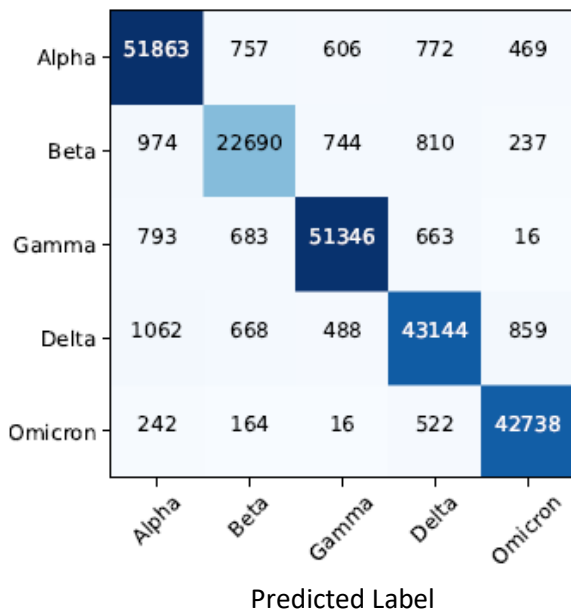
In this part, we evaluate results of machine learning classifiers to prove the effectiveness of the trinucleotide features to predict SARS-CoV-2 variants. The hyperparameters of the classifiers are determined by grid search. In the KNN classifier,  $k$  is set to 1, and manhattan distance is used. In the MLP method, the hyperbolic tangent function is used as an activation function, and number of



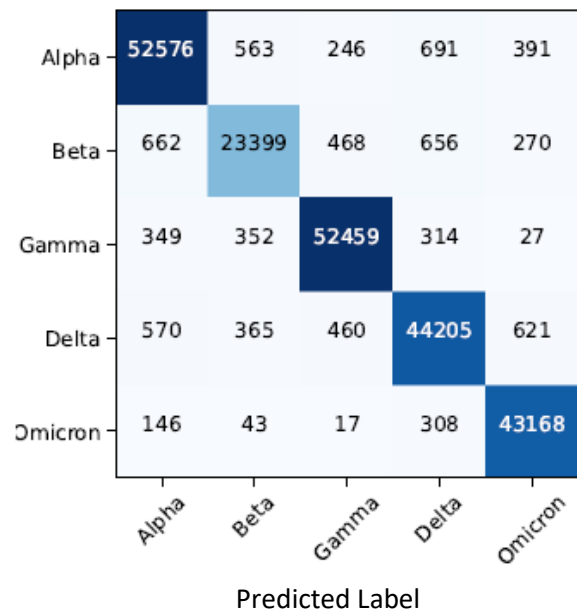
(a) KNN



(b) MLP



(c) SVM



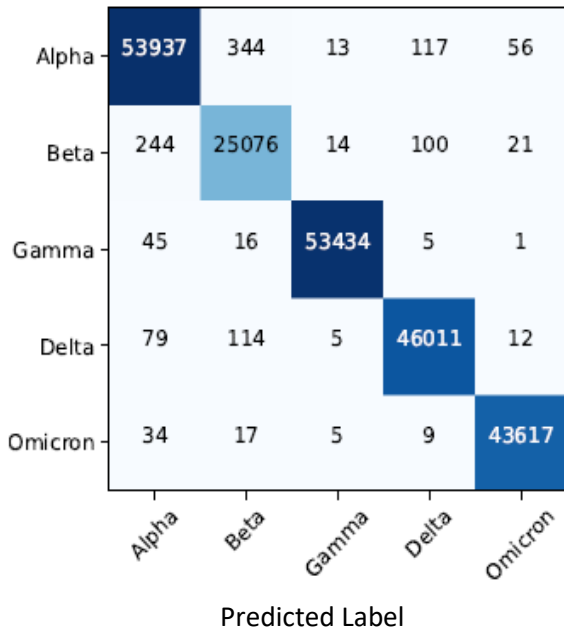
(d) RF

Figure 3 Confusion matrices of machine learning classifiers on the dinucleotide features

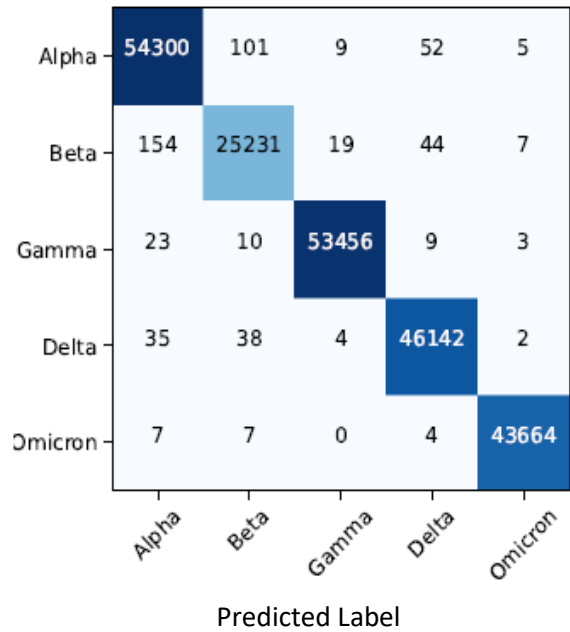
neurons in the hidden layer is 100. In the SVM method,  $c$  is 512,  $\gamma$  is  $2^{-9}$ , and radial basis function is used. Finally, in RF, criterion is *gini*, maximum depth of tree is 25, the minimum number of the sample leaf is 1, and the minimum number of sample split is 3. The results of the classifiers are obtained with respect to these parameters.

Figure 4 shows confusion matrices of machine learning classifiers on the trinucleotide features extracted from the

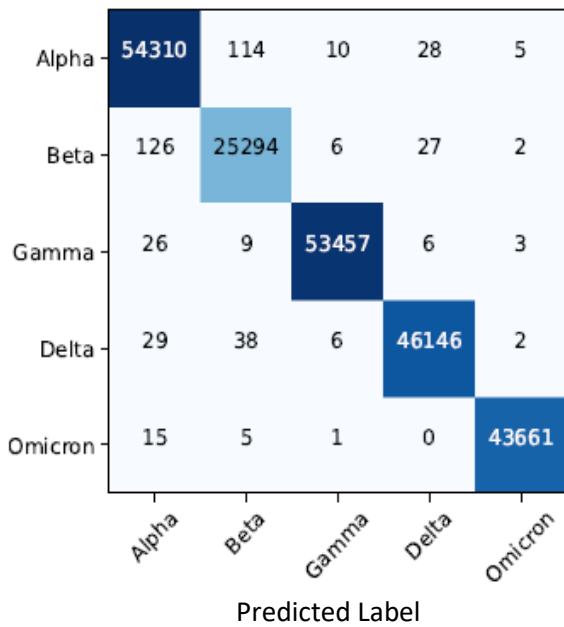
genome sequences. The SVM classifier achieves the best results and it correctly labels 54,310 out of 54,467 genome sequences of *Alpha* variant, 25,294 out of 25,455 genome sequences of *Beta* variant, 53,457 out of 53,501 genome sequences of *Gamma* variant, 46,146 out of 46,221 genome sequences of *Delta* variant, and 43,661 out of 43,682 genome sequences of *Omicron* variant.



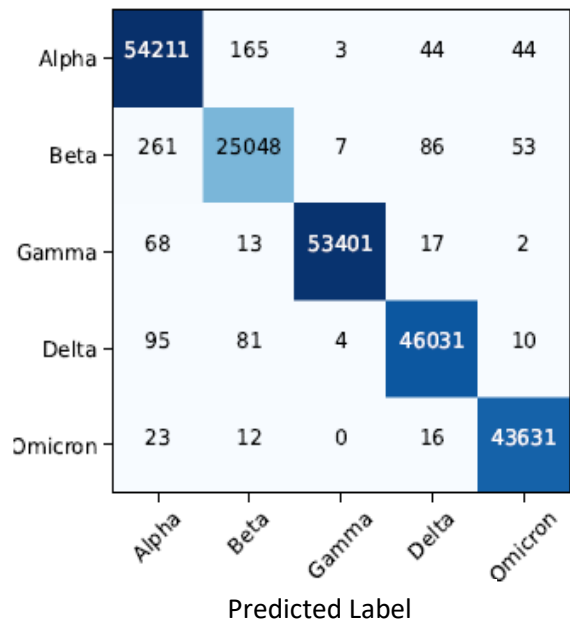
(a) KNN



(b) MLP



(c) SVM



(d) RF

Figure 4. Confusion matrices of machine learning classifiers on the trinucleotide features

Table 4 presents variant-based and average results of the machine learning classifiers when trinucleotide features are used. As seen in Table 4, the machine learning classifiers with trinucleotide features have an admirable performance. The average accuracy and specificity values of the classifiers are close to 1.0. Average sensitivity and precision values vary between 0.99 and 1.0. When compared to

dinucleotide features, sensitivity and precision values are significantly improved with trinucleotide features.

Table 4. Performances of the machine learning classifiers using trinucleotide features

Method	SARS-CoV-2 Variant	Variant based results				Average results			
		Acc	Sen	Spe	Pre	Acc	Sen	Spe	Pre
KNN	Alpha	1	0.99	1	0.99	1	0.99	1	0.99
	Beta	1	0.99	1	0.98				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
MLP	Alpha	1	1	1	1	1	1	1	1
	Beta	1	0.99	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
SVM	Alpha	1	1	1	1	1	1	1	1
	Beta	1	0.99	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
RF	Alpha	1	1	1	0.99	1	0.99	1	0.99
	Beta	1	0.98	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				

Feature Selection using Whale Optimization Algorithm

The trinucleotide features identify SARS-CoV-2 variants more accurately than dinucleotide features. In order to choose the most relevant trinucleotide features and reduce dimensionality of the dataset, we use the WOA. As a result of the WOA, the trinucleotides occurrences that are AAA, ACA, ATG, ACC, AGT, AGC, AGG, CTA, CCC, TAT, TTC, TTT, TTG, TCT, GTT, GTG, GCC, GCT, GGC, and GGT are excluded from the feature set, and the remaining trinucleotide occurrences are used to detect SARS-CoV-2 variants. Thus, the initial set of 64 features is reduced to 44. Table 5 presents variant-based and average results of the machine learning classifiers when 44 trinucleotide features are used. When the SVM classifier with 44 trinucleotide features is used, an average accuracy, precision, sensitivity, and specificity is ~ 1.0. Furthermore, Table 6 presents average results of classifiers using trinucleotide features for full set of features (64 features in total) and reduced set of features (44 features in total). The results of full set and the reduced set of features are close to each other.

We present the total number of incorrectly classified instances for each classifier when 16 dinucleotide, 64 trinucleotide, and 44 selected features are separately used in Figure 5. As can be seen in Figure 5a, the number of genome sequences that are incorrectly classified remarkably decreases when the trinucleotide features are used. For instance, the SVM classifier with trinucleotide features misclassifies 157 out of 54,467 genome sequences of *Alpha* variant, 161 out of 25,455 genome sequences of *Beta* variant, 44 out of 53,501 genome sequences of *Gamma* variant, 75 out of 46,221 genome sequences of *Delta* variant, and 21 out of 43,682 genome sequences of *Omicron* variant. In total, it misclassifies 458 out of 223,326 genome sequences. Furthermore, the results of 64 trinucleotide

features and 44 selected features are close as shown in Figure 5b.

Table 5 Performances of the machine learning classifiers using 44 trinucleotide features

Method	SARS-CoV-2 Variant	Variant based results				Average results			
		Acc	Sen	Spe	Pre	Acc	Sen	Spe	Pre
KNN	Alpha	1	0.99	1	0.99	1	0.99	1	0.99
	Beta	1	0.98	1	0.98				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	0.99	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
MLP	Alpha	1	1	1	1	1	1	1	1
	Beta	1	0.99	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
SVM	Alpha	1	1	1	1	1	1	1	1
	Beta	1	0.99	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				
RF	Alpha	1	1	1	1	1	0.99	1	0.99
	Beta	1	0.99	1	0.99				
	Gamma	1	1	1	1				
	Delta	1	1	1	1				
	Omicron	1	1	1	1				

Table 6. Average results of classifiers using trinucleotide features for full set of features and reduced set of features

Method	Full set of features				Reduced set of features			
	Average(%)				Average(%)			
	Acc	Sen	Spe	Pre	Acc	Sen	Spe	Pre
KNN	1.0	0.99	1.0	0.99	1.0	0.99	1.0	0.99
MLP	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
SVM	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
RF	1.0	0.99	1.0	0.99	1.0	0.99	1.0	0.99

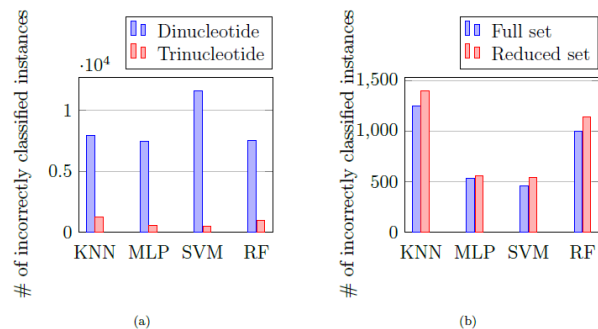


Figure 5. Incorrectly classified instances for each classifier

Comparison with Existing Methods Detecting SARS-CoV-2 Variants

Table 7 analyzes the performances of the methods detecting SARS-CoV-2 variants in the literature. Jamil and Rahman [17] proposed a deep learning approach to detect SARS-

CoV-2 variants, Alpha, Beta, Gamma, and Delta from CT scans and X-ray images. They used five convolution units with a rectified unit as an activation function. They reported accuracy results for each variant. Their prediction accuracies are 99.7%, 99.6%, 99.6%, 98.6% for detecting Alpha, Beta, Gamma, and Delta variants, respectively on X-ray images. Ali et al. [16] proposed to use k-mer based features to detect SARS-CoV-2 variants. Then they applied lasso regression and ridge regression methods, which are feature selection methods to reduce the dimension of the dataset. As a result of lasso regression, they used 964 features out of 4977 to predict SARS-CoV-2 variants. K-means clustering with lasso regression achieved F1-scores of 99.87%, 27.05%, 99.91%, 99.98%, and 97.04% for identifying Alpha, Beta, Delta, Gamma, and Epsilon variants, respectively. Their method failed to predict Beta variants. Togrul and Arslan [20] performed CNN to detect features that discriminate variants of SARS-CoV-2. After feature extraction, they used various types of ML algorithms including SVM, KNN, RF, and MLP. Their experimental results achieved about 100% accuracy on the dataset including 1000 sequences of each variants of concern when 1563 features are used. Main disadvantage of their method was the use a large number of features, which required a lot of time. Arslan [21] used nucleotide frequencies to diagnose SARS-CoV-2 variants. Their method reached a relatively low accuracy (94%) on average using a dataset including fewer sequences from Turkey when four features are used.

Table 7. Comparison of the methods identifying SARS-CoV-2 variants

Study	Method	Fetaures	Image Dataset	Acc(%)
Jamil and Rahman [17]	CNN	Vocabulary of features	1345 Alpha 10,192 Beta 6,012 Gamma 3,616 Delta	99.7 99.6 99.6 98.6
Study	Method	# of Fetaures	# of Amino Acid Sequence	Acc(%)
Ali et al. [16]	K-means with Lasso Regression	964	13,966 Alpha 1,727 Beta 7,551 Delta 26,629 Gamma 12,784 Epsilon	99.87 27.05 99.91 99.98 97.04
Togrul and Arslan [20]	CNN,KNN,MLP, SVM, RF	1563	1000 Alpha 1000 Beta 1000 Gamma 1000 Delta 1000 Omicron	100 100 100 100 100
Arslan [21]	KNN	4	436 Alpha 357 Beta 110 Gamma 500 Delta	94 93 93 95
Study	Method	# of Fetaures	# of Amino Acid Sequence	Acc(%)
Proposed Method	SVM with WOA	44 trinucleotide	54,467 Alpha 25,455 Beta 53,501 Gamma 46,221 Delta 43,682 Omicron	100 100 100 100 100

When we compare the proposed method with these methods, the dataset used in this study is larger and includes current SARS-CoV-2 variants of concern. Moreover, most of the methods shown in Table 7 are more expensive than the proposed method since our method predicts SARS-

CoV-2 variants by using fewer number of features. The proposed method can accurately predict current SARS-CoV-2 variants of concern, and achieves an accuracy of 100%.

## Conclusion

Emerging variants of SARS-CoV-2 causes a devastating effect on human health. Determining variants of SARS-CoV-2 is crucial to follow correct treatment strategy and taking under control to contagious of the virus. In this study, we introduce a method to determine SARS-CoV-2 variants. We determine 16 dinucleotide and 64 trinucleotide features representing the whole genome sequences. The WOA is applied to select the most relevant features and reduce the dimensionality. The proposed method reaches full accuracy for detecting current SARS-CoV-2 variants of concern when the SVM classifier with 44 trinucleotide features are employed. In future, we will investigate effect on SARS-CoV-2 variants on patients with any types of cancer to decrease the date ratio of COVID-19.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

## Authors' Contributions

All parts of the paper are prepared and implemented by Hilal Arslan.

## References

- [1] Volz, E., Mishra, S., Chand, M., Barrett, J. C., & al., R. J. et. (2021). Assessing transmissibility of SARS-CoV-2 lineage B.1.1.7 in England. *Nature*, 593(7858), 266–269. doi:10.1038/s41586-021-03470-x
- [2] Lauring, A. S., & Malani, P. N. (09 2021). Variants of SARS-CoV-2. *JAMA*, 326(9), 880–880. doi:10.1001/jama.2021.14181
- [3] Tegally, H., Wilkinson, E., Giovanetti, M., & al., A. I. et. (2021). Detection of a SARS-CoV-2 variant of concern in South Africa. *Nature*, 592(7854), 438–443. doi:10.1038/s41586-021-03402-9
- [4] Sabino, E. C., Buss, L. F., Carvalho, M. P. S., & al., E. (2021). Resurgence of COVID-19 in Manaus, Brazil, despite high seroprevalence. *The Lancet*, 397(10273), 452–455. doi:10.1016/s0140-6736(21)00183-5
- [5] Mlcochova, P., Kemp, S. A., Dhar, M. S., & al., G. P. et. (2021). SARS-CoV-2 B.1.617.2 Delta variant replication and immune evasion. *Nature*, 599(7883), 114–119. doi:10.1038/s41586-021-03944-y

- [6] Sahoo, J. P., & Samal, K. C. (2021). World on alert: WHO designated south African new COVID strain (Omicron/B.1.1.529) as a variant of concern. *Biotica Research Today*, 3(11), 1086–1088.
- [7] Jiang, X., Coffee, M., Bari, A., Wang, J., Jiang, X., Huang, J., ... Huang, Y. (2020). Towards an Artificial Intelligence Framework for Data-Driven Prediction of Coronavirus Clinical Severity. *Computers, Materials & Continua*, 62(3), 537–551. doi:10.32604/cmc.2020.010691
- [8] Zoabi, Y., Deri-Rozov, S., & Shomron, N. (2021). Machine learning-based prediction of COVID-19 diagnosis based on symptoms. *Npj Digital Medicine*, 4(1), 3. doi:10.1038/s41746-020-00372-6
- [9] Muhammad, L. J., Algehyne, E. A., Usman, S. S., Ahmad, A., Chakraborty, C., & Mohammed, I. A. (2021). Supervised Machine Learning Models for Prediction of COVID-19 Infection using Epidemiology Dataset. *SN Computer Science*, 2(1), 11. doi:10.1007/s42979-020-00394-7
- [10] Shi, F., Wang, J., Shi, J., Wu, Z., Wang, Q., Tang, Z., ... Shen, D. (2021). Review of Artificial Intelligence Techniques in Imaging Data Acquisition, Segmentation, and Diagnosis for COVID-19. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 14, 4–15. doi:10.1109/RBME.2020.2987975
- [11] Mohamadou, Y., Halidou, A., & Kapen, P. T. (2020). A review of mathematical modeling, artificial intelligence and datasets used in the study, prediction and management of COVID-19. *Applied Intelligence*, 50(11), 3913–3925. doi:10.1007/s10489-020-01770-9
- [12] Arslan, H., & Arslan, H. (2021). A new COVID-19 detection method from human genome sequences using CpG island features and KNN classifier. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. doi:10.1016/j.jestch.2020.12.026
- [13] Arslan, H. (2021a). COVID-19 prediction based on genome similarity of human SARS-CoV-2 and bat SARS-CoV-like coronavirus. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107666. doi:10.1016/j.cie.2021.107666
- [14] Ahmed, W., (2022). Detection of the Omicron (B.1.1.529) variant of SARS-CoV-2 in aircraft wastewater. In *Science of The Total Environment*, 820, p. 153171. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153171
- [15] Mohiuddin, M., & Kasahara, K. (2022). Investigating the aggressiveness of the COVID-19 Omicron variant and suggestions for possible treatment options. In *Respiratory Medicine*, vol. 191, p. 106716. doi: 10.1016/j.rmed.2021.106716
- [16] Wang, B., & Jiang, L. (2021). Principal Component Analysis Applications in COVID-19 Genome Sequence Studies. In *Cognitive Computation*. doi:10.1007/s12559-020-09790-w
- [17] Khan, A., Khan, S. H., Saif, M., Batool, A., Sohail, A., & Waleed Khan, M. (2023). A Survey of Deep Learning Techniques for the Analysis of COVID-19 and their usability for Detecting Omicron. In *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* pp. 1–43. doi: 10.1080/0952813x.2023.2165724
- [18] Basu, S., & Campbell, R. H. (2022). Classifying COVID-19 Variants Based on Genetic Sequences Using Deep Learning Models. In *Springer Series in Reliability Engineering* pp. 347–360. doi: 10.1007/978-3-031-02063-6\_19
- [19] Mann, C., Griffin, J. H., & Downard, K. M. (2021). Detection and evolution of SARS-CoV-2 coronavirus variants of concern with mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413(29), 7241–7249. doi:10.1007/s00216-021-03649-1
- [20] M. Togrul and H. Arslan. (2022). Detection of SARS-CoV-2 Main Variants of Concerns using Deep Learning. *2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, Antalya, Turkey, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ASYU56188.2022.9925559.
- [21] Arslan, H. (2022). Classification of SARS-CoV-2 Variants in Turkey. *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 1092–1101.
- [22] Mafarja, M., & Mirjalili, S. (2018). Whale optimization approaches for wrapper feature selection. *Applied Soft Computing*, 62, 441–453. doi:10.1016/j.asoc.2017.11.006
- [23] Abu Alfeilat, H., Hassanat, A., Lasassmeh, O., Tarawneh, A., Alhasanat, M., Eyal-Salman, H., & Prasath, S. (08 2019). Effects of Distance Measure Choice on K-Nearest Neighbor Classifier Performance: A Review. *Big Data*, 7. doi:10.1089/big.2018.0175
- [24] Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and Machine Learning*. Springer.

- [25] Hornik, K., Stinchcombe, M., & White, H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5), 359–366. doi:10.1016/0893-6080(89)90020-8
- [26] Burges, C. J. C. (1998). A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 121–167. doi:10.1023/A:1009715923555
- [27] Vapnik, V. N. (1995). *The Nature of Statistical Learning Theory*. doi:10.1007/978-1-4757-2440-0
- [28] Hsu, C.-W., & Lin, C.-J. (2002). A comparison of methods for multiclass support vector machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13(2), 415–425. doi:10.1109/72.991427
- [29] Min, J. H., & Lee, Y.-C. (2005). Bankruptcy prediction using support vector machine with optimal choice of kernel function parameters. *Expert Systems with Applications*, 28(4), 603–614. doi:10.1016/j.eswa.2004.12.008
- [30] Keerthi, S. S., & Lin, C.-J. (2003). Asymptotic Behaviors of Support Vector Machines with Gaussian Kernel. *Neural Computation*, 15(7), 1667–1689. doi:10.1162/089976603321891855
- [31] Breiman, L. (2001a). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324
- [32] Breiman, L. (2001b). *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/a:1010933404324
- [33] Shu, Y., & McCauley, J. (2017). GISAIID: Global initiative on sharing all influenza data - from vision to reality. *Eurosurveillance*, 22(13). doi:10.2807/1560-7917.ES.2017.22.13.30494
- [34] Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing & Management*, 45(4), 427–437. doi:10.1016/j.ipm.2009.03.002





## Assessment of GTO: Performance Evaluation via Constrained Benchmark Function, and Optimized of Three Bar Truss Design Problem

Erdal EKER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Muş Alparslan University, Vocational School of Social Science, e.eker@alparslan.edu.tr, 0000-0002-5470-8384

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received November 30, 2022  
Received in revised form 4 January 2023  
Accepted 2 March 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

Metaheuristic, Artificial Gorilla Troops Algorithm, Truss Bar Design Problem

### ABSTRACT

The aim of this paper is to show that the artificial gorilla troops optimization (GTO) algorithm, as an optimizer, can cope with test functions such as CEC2019, and also to best optimize the three bar truss design problem as a constrained optimization problem. As a method, two statistical measures such as the best values provided by the algorithms and the standard deviation showing the distance between the values were studied. At the same time, the convergence rate of the algorithms compared by the convergence curves were examined. For this purpose, it has been competed against two other swarm-based algorithms, sine-cosine algorithm (SCA) and golden eagle optimization (GEO). The optimization of the three bar truss design problem, which is another side of the study, has been made. The GTO algorithm reached the best values in the optimization of the parameters of the problem. In addition to the convergence curve, statistical results have examined, and the advantages of GTO are revealed through box-plot figures that evaluate the relationship between median and quartiles and the distribution among all results.

Doi: 10.24012/dumf.1211918

\* Corresponding author

### Introduction

Truss bar optimization has become a very popular topic in recent years. Three bar truss (TBT) design problem, which is a classical engineering problem, can be defined as the process of finding the best parameters that give the minimum value of an objective function and also satisfy certain constraints [1, 2].

Why does it use metaheuristic algorithm? Because the metaheuristic algorithm's characterized like flexible structure, simple working because of non-derivative process, and don't suffer early converge which is ensure better optimizer than deterministic algorithm [3]. In the previous works have been studied on three bar truss design optimization problem optimized by metaheuristic algorithms [4-6]. While it has been demonstrated in this study that the artificial gorilla troops algorithm (GTO) is a competitive algorithm by testing it through the CEC2019 benchmark functions, the same results have been achieved with different functions in previous studies [7]. Real-world problem such as renewable energy source [8, 9], computer science [10], engineering optimization problems [11], power system stabilizer [12], industrial product design [13], and neural networks optimized [14] was solved with GTO algorithm and improved or hybrid variants of GTO at the used previous works. In this paper, three bar truss design problem will

be discussed. Thus, the ability of the GTO algorithm to solve classic design problems will be revealed.

In this paper, the GTO algorithm is compared with the golden eagle optimizer (GEO) [15], sine cosine algorithms (SCA) [16], and harris hawks optimization (HHO) [17] which are also used in optimizing design problems [18-20]. In addition to these algorithms, the statistical results of the previously studied particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA) classical algorithms were compared with the GTO algorithm [21].

This paper is including five sections. Firstly, section was by introduction, secondly section on introductory of problem, third section contain GTO's structure, fourth section competitiveness power of GTO via CEC2019, and optimize of problem. Finally, section is contained discussion and conclusions.

### Three bar truss design optimization problem

The aim of this problem is to design a truss structure that minimizes maximum node displacement without violating constraints such as buckling, stress, and bending, as shown in Figure 1 [1, 2, 21, 22].

Equation (1) will be optimized,

$$\min f(x) = (2\sqrt{2}A_1 + A_2).l \quad (1)$$

$g_1, g_2,$  and,  $g_3$  are inequality constraints below that Equations (2-4) for Equation (1).

$$g_1 = \frac{2\sqrt{2}A_1 + A_2}{\sqrt{2}A_1^2 + 2A_1A_2} P \leq \sigma \quad (2)$$

$$g_2 = \frac{A_2}{\sqrt{2}A_1^2 + 2A_1A_2} P \leq \sigma \quad (3)$$

$$g_3 = \frac{1}{A_1 + \sqrt{2}A_2} P \leq \sigma \quad (4)$$

where

$$0 \leq A_1 \leq 1, 0 \leq A_2 \leq 1, l = 100cm, \\ \sigma = 2 KN/cm^2, \text{ and } P = 2 KN/cm^2.$$

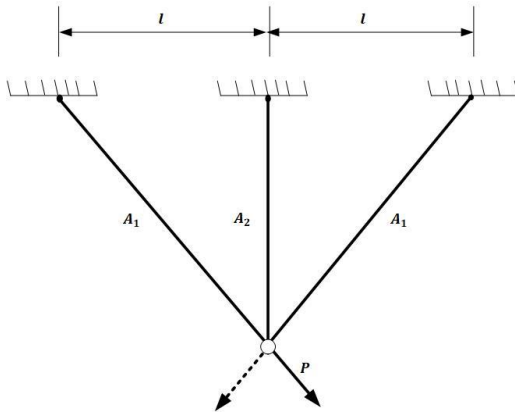


Figure 1. Three bar truss model [22]

### Gorilla Troops Algorithm

Artificial Gorilla Troops Algorithm (GTO) is a swarm-based algorithm based on leadership and community relationships in the community life of gorillas. The tasks of the male leader gorilla are to lead the swarm in many aspects such as defending against danger, finding food and making decisions. The swarm consists of male and female adult gorillas and offsprings. The mathematical modeling of the GTO metaheuristic algorithm, which is inspired by the swarm-based behavior of gorillas in their collective life in nature, consists of the following stages [7,10].

#### Exploration (Diversification) phase

The gorilla troops are led by a gorilla called the silverback. In this regard, each candidate solution found is called a silverback solution. There are three main movements at this stage. For this, the position of the  $p$  parameter is decisive and takes values between 0 and 1. The first movement refers to the movement towards the unknown when  $k < p$ , the second movement towards the group when  $k \geq 0.5$ , and the last movement to a known position when  $k < 0.5$ . Equation 1 expresses these three different situations in the exploration phase.

$$G(X_{new}) = \begin{cases} k_1 \times (ub - lb) + lb & k < p \\ X_k(k_2 - U) + V.R & k \geq 0.5 \\ X_i - V(V(X - GX_i) + k_3(X - GX_i)) & k < 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

where  $G(X_{new})$  indicates the candidate position vector of the gorilla at the next iteration, and  $X$  is the present vector of the gorilla [1].  $k, k_1, k_2,$  and  $k_3$  random values between 0 and 1.  $ub$  and  $lb$  indicates upper bound and lower bound of the variables, respectively.  $X_i$  and  $GX_i$  are random selected candidate position vectors in the group.

Equations (6), (7), and (8) calculate  $U, V,$  and  $R,$  respectively.

$$U = F \left( 1 - \frac{iter}{Maxiter} \right) \quad (6)$$

$$F = \cos(2t_4) + 1 \quad (7)$$

$$V = U.k \quad (8)$$

where  $iter$  and  $Maxiter$  indicates current iteration and maximum iteration, respectively. Initially, variation values will be generated over a wide range, while varying variation values will decrease towards the final optimization stage.  $t_4$  and  $k$  is a random value that is in interval [0,1]. Equation (6) display how to solving problem, and Equation (8) indicates silverback's leadership is simulated.  $R$  in the Equation (1) is solved at Equation (9).

$$H = Z.X_k \quad (9)$$

$$Z = [-C, C] \quad (10)$$

At the end of the exploration phase, a group study covering all  $GX$  solutions are conducted. If the cost is assumed to be  $GX < X,$  wrote  $X$  instead of  $GX$  and this best solution is considered silver back.

#### Exploitation (Intensification) phase

During the exploitation phase of the GTO algorithm, two behaviors develop: following the lead gorilla, called the Silverback, and competing for adult females. The  $U$  parameter is used for both tracking and competition. Using a  $w$  control parameter,  $U \geq w$  will follow Silverback and  $U < w$  will compete with females.

$$GX_{new} = V.m(X - X_{silverback}), U \geq w \quad (11)$$

$$m = \left( \left| \frac{1}{N \sum_{i=1}^N GX_i} \right|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (12)$$

$$q = 2^V \quad (13)$$

$X$  is the vector of the silverback,  $X_{silverback}$  is the vector of the silverback while the best location.  $GX_i$  indicate is derived from to exploration phase to the vector position of each candidate gorilla at the present iteration.  $N$  indicates the sum of gorillas Equation (13) is also utilized to estimate  $q,$  and Equation (8) is also utilized to determine  $V$  in Equation (13).

$$G(X_{new}) = X_{silverback} - (X_{silverback} - X)\Phi.a, U < w(14)$$

$$\Phi = 2.k_5 - 1 \quad (15)$$

$$A = \gamma.\theta \quad (16)$$

$$\theta = \begin{cases} N_1, & s \geq 0.5 \\ N_2, & s < 0.5 \end{cases} \quad (17)$$

where  $\Phi$  refers to impact force,  $k_5$  is a random variable from interval [0,1].  $A$  is coefficient vector that violence degree in conflict. A value must be assigned to parameter  $\gamma$  before the optimization operation.  $\theta$  is simulate the impact of force on the solution's dimensions.  $s$  is a random variable from interval [0,1]. If  $s$  is larger than or equal 0.5,  $\theta$  is a random size from the normal distribution and the problem's bounds; if  $s$  is less than 0.5,  $\theta$  is a random value from the normal distribution.

### Experimental Conclusion

The CEC2019 function was utilized for benchmarking algorithms. Performance assessment of the algorithms has been performed out using the challenging benchmark functions from CEC2019 test suite as shown that Table 1 [23]. This test set includes highly difficult and complex composition functions.

In this paper, GTO algorithm is compared with the GEO, SCA, HHO, PSO and GA algorithms. However, since GA and PSO algorithms are classically successful algorithms, the experimental results were taken from a different source, only the results were compared in Table 2, and the convergence curve was not drawn.

The MATLAB 2021 package program was used for benchmarking and quality testing of the algorithm, and each function was run 30 times to reach a fair solution. 500 iterations were performed using 30 search agents in each run.

When Table 2 is examined, it is seen the GTO algorithm which is the second algorithm after the PSO algorithm as a result of the F4 and F10 functions, and the second algorithm after the GA algorithm as a result of the F6 function, as well. For the F7 function, the GTO has achieved very good success, as can be seen in many different studies, since the problem of early convergence and local optimum has been observed [24]. In other functions except F4, F6 and F10, the GTO algorithm has achieved good success. As a result of all these experimental observations, it can be stated that GTO can be a competitive algorithm.

Whether the GTO algorithm has the problem of early convergence or local optima and its comparison with other algorithms can also be examined through convergence curves. In this context, when Figure 2 is

observed, it will be seen that the GTO algorithm converges better than other algorithms.

500 iterations and 30 search agents were used to optimize TBT. A fair result was tried to be achieved with 30 independent runs. When the Table 3 is examined, it can be seen that all optimal values for TBT are provided by the GTO algorithm. When the Table 4 is examined, it can be observed that the GTO algorithm achieves the best result for the A2 parameter. On the other hand, it can be observed that the SCA algorithm is relatively more successful in optimizing the A1 parameter. However, when the box plot of the optimal values obtained as a result of independent runs is drawn in Figure 3, it can be observed that the GTO algorithm produces very close consistent values, while the SCA algorithm has both extreme values and the distance between the lowest result and the highest result is longer. In Figure 4, it can be observed that the GTO algorithm converges steadily, but the SCA algorithm suffers from early convergence and local optimum, while the GEO algorithm converges relatively late and cannot optimize TBT as much as the GTO algorithm.

Table 1. Parameters of CEC 2019

Functions	Dimension	Bounds	Fitting Value
Storn's Chebyshev Polynomial Fitting Problem (F1)	9	[-8192, 8192]	1
Inverse Hilbert Matrix Problem (F2)	16	[-16384, 16384]	1
Lennard-Jones Minimum Energy Cluster (F3)	18	[-4,4]	1
Rastrigin's Function (F4)	10	[-100, 100]	1
Griewangk's Function (F5)	10	[-100, 100]	1
Weierstrass Function (F6)	10	[-100, 100]	1
Modified Schwefel's Function(F7)	10	[-100, 100]	1
Expanded Schafer's F6 Function (F8)	10	[-100, 100]	1
Happy Cat Function (F9)	10	[-100, 100]	1
Ackley Function (F10)	10	[-100, 100]	1

Table 2. Superiority of GTO Algorithm

F.no	Metric	GTO	GEO	SCA	HHO	PSO [21]	GA [21]
F1	Best	<b>3.5580E+04</b>	6.2980E+10	7.3504E+05	4.3994E+04	3.6316E+06	1.2909E+09
	Std	<b>7.6777E+02</b>	5.4913E+11	8.1749E+09	5.0620E+03	5.2101E+08	2.0443E+10
	Rank	<b>1</b>	6	3	2	4	5
F2	Best	<b>1.7343E+01</b>	1.9210E+03	1.7401E+01	1.7350E+01	1.7343E+01	1.7359E+01
	Std	<b>5.0593E-16</b>	6.2141E+03	9.2037E-02	7.6000E-03	5.0593E-15	1.4505E+01
	Rank	<b>1</b>	6	5	3	<b>2</b>	4
F3	Best	<b>1.2702E+01</b>	1.2703E+01	1.2702E+01	1.2702E+01	1.2702E+01	1.2702E+01
	Std	<b>3.0336E-15</b>	7.0309E-04	1.2331E-04	6.3218E-06	3.6134E-15	2.8453E-07
	Rank	<b>1</b>	6	5	4	2	3
F4	Best	2.0894E+01	4.9688E+03	3.5718E+02	1.0431E+02	<b>2.9849E+00</b>	5.4231E+01
	Std	4.7402E+01	5.5859E+03	6.7346E+02	8.8490E+01	<b>9.5931E+00</b>	4.8556E+01
	Rank	2	6	5	4	<b>1</b>	3
F5	Best	<b>1.0123E+00</b>	3.2463E+00	2.0538E+00	1.4616E+00	1.0271E+00	1.0800E+00
	Std	<b>6.4709E-02</b>	8.3273E-01	9.1901E-02	05.725E-01	8.6000E-02	1.0100E-01
	Rank	<b>1</b>	6	5	4	2	3
F6	Best	4.1927E+00	1.1034E+01	9.7940E+00	7.3419E+00	5.4320E+00	<b>3.5465E+00</b>
	Std	1.2005E+00	9.1232E-01	<b>6.3686E-01</b>	1.0071E+00	1.4167E+00	8.2840E-01
	Rank	2	6	5	4	3	<b>1</b>
F7	Best	<b>3.0353E+01</b>	1.0779E+03	3.7643E+02	9.4918E+01	-6.4755E+01	-1.5598E+02
	Std	<b>1.4287E+00</b>	2.1711E+02	1.9093E+02	2.2215E+02	1.0307E+02	1.5239E+02
	Rank	<b>1</b>	6	5	3	2	4
F8	Best	<b>2.8489E+00</b>	6.4394E+00	5.3351E+00	4.5395E+00	3.2864E+00	3.3511E+00
	Std	9.3211E-01	<b>3.6854E-01</b>	4.2444E-01	4.9910E-01	7.5560E-01	7.4110E-01
	Rank	<b>1</b>	6	5	4	2	3
F9	Best	<b>2.3368E+00</b>	1.1325E+03	2.1582E+01	2.6864E+00	2.3430E+00	2.5288E+00
	Std	1.2978E-01	8.1371E+02	1.0718E+02	6.2550E-01	<b>1.3400E-02</b>	3.2930E-01
	Rank	<b>1</b>	7	6	4	2	3
F10	Best	2.0133E+00	1.7165E+01	2.0277E+01	2.0033E+01	<b>1.9644E-11</b>	2.7150E+00
	Std	3.2835E+00	5.8992E-01	<b>1.0435E-01</b>	1.1980E-01	3.6939E+00	3.1609E+00
	Rank	2	4	6	5	<b>1</b>	3

Table 3. Optimal value ( $minf(x)$ ) of TBT

Algorithms	Metrics			
	Mean value	Minimum value	Std. Dev. value	Rank
GEO	2.6395E+02	2.6395E+02	8.3691E-02	4
SCA	2.6851E+02	2.6390E+02	8.0421E+00	6
HHO	2.6402E+02	2.6390E+02	1.8426E-01	5
GTO	<b>2.6389E+02</b>	<b>2.6389E+02</b>	<b>3.2661E-06</b>	<b>1</b>
PSO [21]	2.6390E+02	2.6390E+02	5.3917E-05	2
GA [21]	2.6391E+02	2.6390E+02	2.5206E-02	3

Algorithms	Parameters		Rank	
	A1	A2	A1	A2
GEO	7.8910E-01	4.0710E-01	4	2
SCA	<b>6.1311E-01</b>	6.1178E-01	<b>1</b>	4
HHO	7.8847E-01	4.0883E-01	2	3
GTO	7.8867E-01	<b>4.0630E-01</b>	3	<b>1</b>

Table 4. Optimal value parameters of TBT

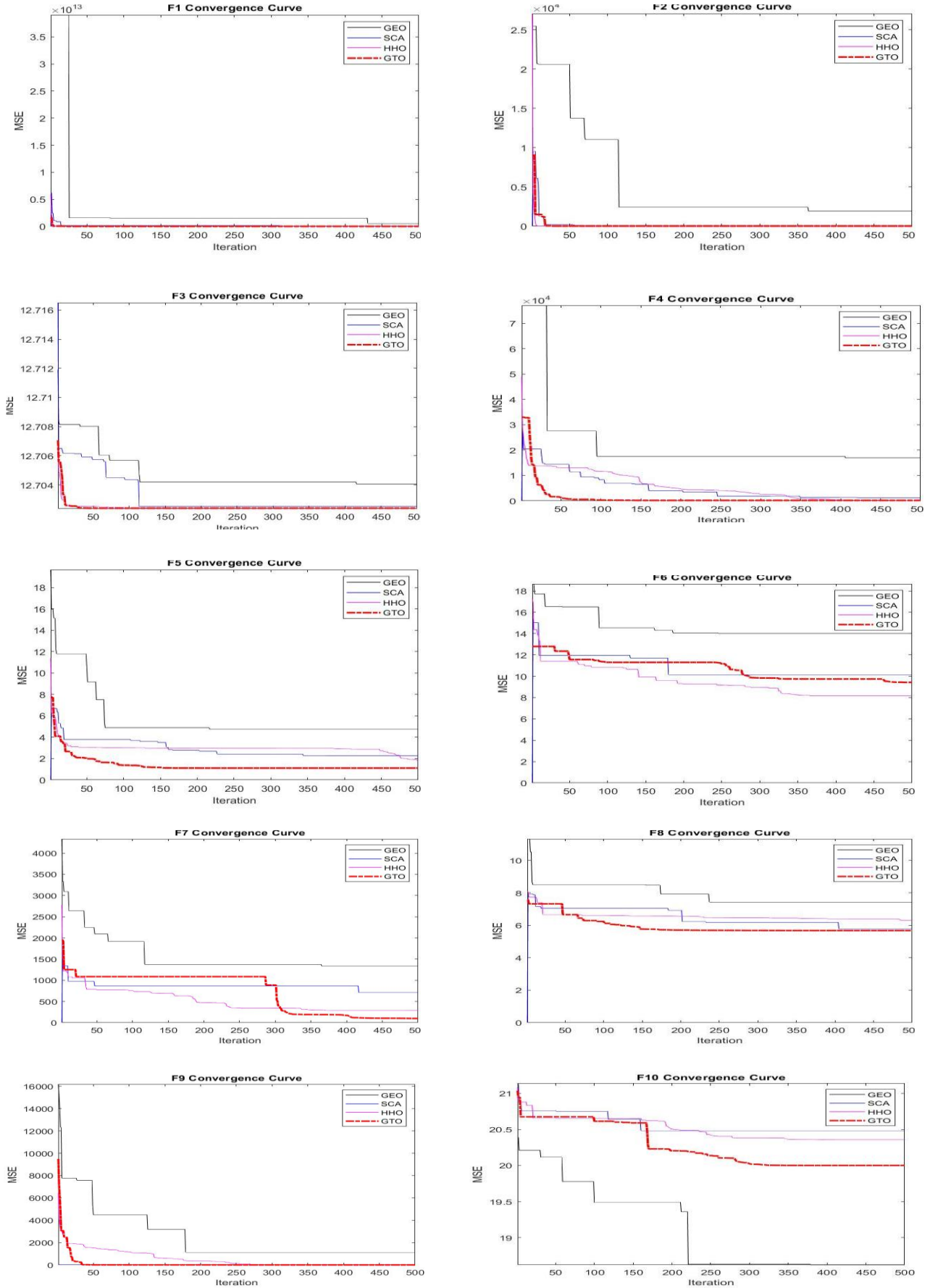


Figure 2. Convergence curve of F1-F10 functions

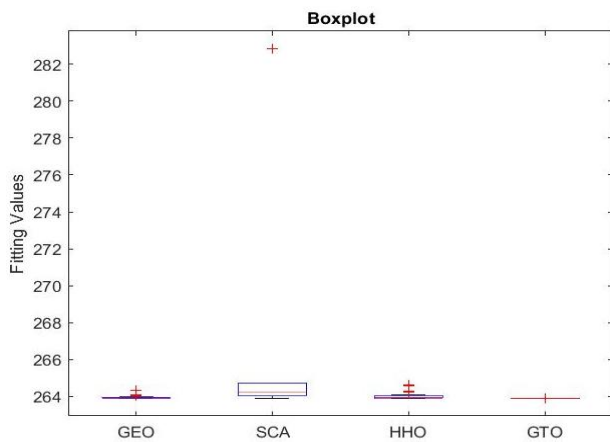


Figure 3. Boxplot of TBT

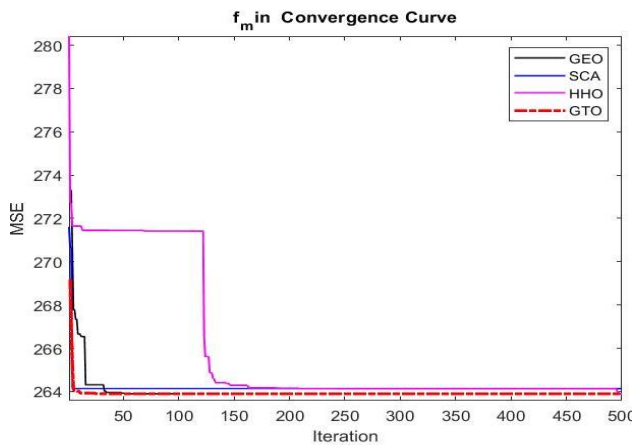


Figure 4. Converge curve of TBT

## Conclusion

In this study, it was observed that the GTO algorithm successfully optimized the CEC2019 test set. In the light of statistical measurements, it has been shown that the GTO algorithm can compete with the swarm-based SCA and GEO algorithms selected from different areas, the classical PSO and GA algorithms, and the HHO algorithm, one of the contemporary algorithms. It has been observed that the GTO algorithm can more successfully optimize TBT, which is one of the constrained design optimization problems, by competing with other algorithms in the presence of statistical measurements. Despite its recent introduction to the literature, it has been tried to observe that GTO is a modern metaheuristic algorithm that has been successful in many different areas. Successful results can be obtained in many areas by applying different strategies to develop the GTO algorithm.

## References

[1] Tejani, G. G., Pholdee, N., Bureerat, S., & Prayogo, D, Multiobjective adaptive symbiotic organisms search

for truss optimization problems. *Knowledge-based systems*, vol.161, pp.398-414, 2018.

[2] Kumar, S., Jangir, P., Tejani, G. G., Premkumar, M., & Alhelou, H. H, MOPGO: A new physics-based multi-objective plasma generation optimizer for solving structural optimization problems. *IEEE Access*, vol.9, pp.84982-85016, 2021.

[3] Khalid, O. W., Isa, N. A. M., & Sakim, H. A. M., Emperor penguin optimizer: A comprehensive review based on state-of-the-art meta-heuristic algorithms. *Alexandria Engineering Journal*, 2022.

[4] Yücel, M., Bekdaş, G., & Nigdeli, S. M., Prediction of optimum 3-bar truss model parameters with an ANN model. In *International Conference on Harmony Search Algorithm*, pp. 317-324. April, 2020.

[5] Zitouni, F., Harous, S., & Maamri, R. (2020). The solar system algorithm: a novel metaheuristic method for global optimization. *IEEE Access*, vol.9, pp.4542-4565.

[6] Wang, Z., Luo, Q., & Zhou, Y., Hybrid metaheuristic algorithm using butterfly and flower pollination base on mutualism mechanism for global optimization problems. *Engineering with Computers*, vol.37, no.4, pp. 3665-3698, 2021.

[7] Abdollahzadeh, B., Soleimani Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S., Artificial gorilla troops optimizer: a new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, vol.36, no.10, 5887-5958, 2021.

[8] Abd Elaziz, M., Abualigah, L., Issa, M., & Abd El-Latif, A. A., Optimal parameters extracting of fuel cell based on Gorilla Troops Optimizer. *Fuel*, 332, 2023.

[9] Abdel-Basset, M., El-Shahat, D., Sallam, K. M., & Munasinghe, K., Parameter extraction of photovoltaic models using a memory-based improved gorilla troops optimizer. *Energy Conversion and Management*, 252, 2022.

[10] Houssein, E. H., Saad, M. R., Ali, A. A., & Shaban, H., An efficient multi-objective gorilla troops optimizer for minimizing energy consumption of large-scale wireless sensor networks. *Expert Systems with Applications*, 212, 2023.

[11] Wu, T., Wu, D., Jia, H., Zhang, N., Almotairi, K. H., Liu, Q., & Abualigah, L. (2022). A Modified Gorilla Troops Optimizer for Global Optimization Problem. *Applied Sciences*, 12(19), 10144.

[12] El-Dabah, M. A., Hassan, M. H., Kamel, S., & Zawbaa, H. M. (2022). Robust Parameters Tuning of Different Power System Stabilizers Using a Quantum Artificial Gorilla Troops Optimizer. *IEEE Access*, 10, 82560-82579.

[13] Gong, J., Yang, X., Wang, H., Shen, J., Liu, W., & Zhou, F. (2022). Coordinated method fusing improved bubble entropy and artificial gorilla troops optimizer

optimized KELM for rolling bearing fault diagnosis. *Applied Acoustics*, 195, 108844.

[14] Murugan, S., Jaishankar, M., & Premkumar, K., Hybrid DC-AC Microgrid Energy Management System Using an Artificial Gorilla Troops Optimizer Optimized Neural Network. *Energies*, 15(21), 2022.

[15] Mohammadi-Balani, A., Nayeri, M. D., Azar, A., & Taghizadeh-Yazdi, M., Golden eagle optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 152, 2021.

[16] Mirjalili, S., SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-based systems*, 96, pp.120-133, 2016.

[17] Heidari, A. A., Mirjalili, S., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872.

[18] Abualigah, L., Diabat, A., Altalhi, M., & Elaziz, M. A. (2022). Improved gradual change-based Harris Hawks optimization for real-world engineering design problems. *Engineering with Computers*, 1-41.

[19] Magesh, T., Devi, G., & Lakshmanan, T., Improving the performance of grid connected wind generator with a PI control scheme based on the metaheuristic golden eagle optimization algorithm. *Electric Power Systems Research*, 214, 2023

[20] Gholizadeh, S., & Sojoudizadeh, R., Modified sine-cosine algorithm for sizing optimization of truss structures with discrete design variables. *Iran University of Science & Technology*, 9(2), pp.195-212, 2019.

[21] Naruei, I., & Keynia, F. (2022). Wild horse optimizer: A new meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering with computers*, 38(4), 3025-3056.

[22] Ray, T., & Saini, P., Engineering design optimization using a swarm with an intelligent information sharing among individuals. *Engineering Optimization*, vol.33, no.6, pp.735-748, 2001.

[23] Price K V, Awad NH, Ali MZ, Suganthan PN., Problem definitions and evaluation criteria for the 100 digit challenge special session and competition on single objective numerical optimization. In: Technical Report. Nanyang Technological University, 2018.

[24] A. Viktorin, R. Senkerik, M. Pluhacek, T. Kadavy and A. Zamuda, "DISH Algorithm Solving the CEC2019 100-Digit Challenge," *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/CEC.2019.8789936.



# El Sıkma Hareketinin İşlevsel Yakın Kızılaltı Spektroskopisi ve Elektromiyografi Sinyalleri Kullanılarak Sınıflandırılması

## Classification of Hand-Grip Movement Using Functional Near-Infrared Spectroscopy and Electromyography

**Aykut Eken<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, [aykuteken@etu.edu.tr](mailto:aykuteken@etu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7023-7930>

**MAKALE BİLGİLERİ***Makale Geçmişi:*

Geliş 1 Aralık 2022  
Revizyon 8 Ocak 2023  
Kabul 16 Ocak 2023  
Online 23 Mart 2023

*Anahtar Kelimeler:*

*El sıkma,  
İYKAS,  
EMG,  
Makine Öğrenmesi*

**ÖZ**

El hareketinin sınıflandırılması, özellikle inme rahatsızlığı geçiren kişilerde nörorehabilitasyon amaçlı beyin bilgisayar arayüzü (BBA) modellerinin geliştirilmesinde büyük önem arz etmektedir. Ancak, el hareketi odaklı BBA modellerinin geliştirilmesinde kullanılan kas ve beyin aktivitesi ölçüm modalitelerinin tek başlarına kullanılmasında, nörolojik adaptasyon ve bazı hasta gruplarının nöromusküler hastalık barındırması gibi çeşitli problemler bulunmaktadır. Bu çalışmada bir kavrama kuvveti görevi aracılığı ile gerçekleştirilen el hareketinin sonucu elde edilen işlevsel yakın kızılaltı spektroskopisi (İYKAS) ve elektromiyografi (EMG) sinyalleri kullanılarak el hareketinin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Bu sinyallerden çıkarılan öznitelikler, L1 norm tabanlı bir destek vektör makinesi (DVM) ile seçildikten sonra, K-en yakın komşuluk, doğrusal ve radyal temelli DVM, Gradyan Artırma, Adaboost, Naive Bayes, Doğrusal Diskriminant, Kuadratik Diskriminant ve Lojistik regresyon sınıflandırıcılara verilmiştir. Sınıflandırıcıların başarımı, bir katılımcıyı dışarıda bırak (leave-one-subject-out) çapraz geçerliliği uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırıcılar arasında en yüksek doğruluk yüzdesi, İYKAS ve EMG odaklı özniteliklerden faydalanılarak, Doğrusal Diskriminant metodu ile %84 olarak bulunmuştur. Sonuçlarımız bize işlevsel yakın kızılaltı spektroskopisi ve elektromiyografi verilerinin el hareketinin sınıflandırılmasında kullanılabilceğini ve bunun BBA sistemlerine de entegre edilebileceğini ortaya koymaktadır.

**ARTICLE INFO***Article history:*

Received 1 December 2022  
Received in revised form 8 January 2023  
Accepted 16 January 2023  
Available online 23 March 2023

*Keywords:*

*Hand-Grip,  
fNIRS,  
EMG,  
Machine Learning*

**ABSTRACT**

Classification of hand movement is of great importance in the development of brain-computer interface (BCI) models for neurorehabilitation, particularly in stroke patients. However, there are various problems in the application of muscle and brain activity measurement modalities used in the performance of hand movement-oriented BCI systems, such as neurological adaptation and neuromuscular disease in some patient groups. In this study, classification of hand movement was performed using functional near infrared spectroscopy (fNIRS) and electromyography (EMG) signals obtained as a result of hand movement performed through a grip strength task. Features extracted from these signals are given to K-nearest neighbor, linear and radial basis SVM, Gradient Boost, Adaboost, Naive Bayes, Linear Discriminant, Quadratic Discriminant and Logistic regression classifiers after they are selected with an L1 norm-based support vector machine (SVM). The performance of the classifiers was achieved by applying the leave-one-subject-out cross-validation. Among the classifiers, the highest percentage of accuracy was found to be 84% with the Linear Discriminant method, using İYKAS and EMG focused features. Our results reveal that functional near-infrared spectroscopy and electromyography data can be used to classify hand movement and can be integrated into BCI systems.

Doi: 10.24012/dumf.1212691

\* Sorumlu Yazar



## Giriş

Beyin-bilgisayar arayüzleri (BBA) veya Beyin-makine arayüzleri insanların dış dünyadaki nesnelere haberleşmesi için kullanılan donanımsal ve yazılımsal bir haberleşme sistemidir [1]. BBA'nin başta tıp [2] olmak üzere, endüstriyel [3], sosyal araştırmalar [4] ve nörorehabilitasyon [5-7] gibi çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Sistemsel olarak BBA, işlevsel manyetik rezonans görüntüleme (iMRG) [8], Elektroensefalografi (EEG) [9], işlevsel yakın kızılaltı spektroskopisi (iYKAS) [10] ve magnetoensefalografi (MEG) [11] gibi çeşitli invaziv olmayan nörogörüntüleme teknikleri kullanılarak elde edilen sinyallerin, belirli ön işleme aşamalarından geçirildikten sonra, bu sinyallerden çıkartılan özneliklerin yapay zeka yöntemleri ile sınıflandırılması ve bu sınıflandırma sonucunda ortaya çıkan cevabın (örn: el hareketini gerçekleştirme) dış dünyadaki nesnelere haberleşmesi sürecini içerir. BBA'lerinde bu nörogörüntüleme modalitelerinin içerisinde iYKAS son yıllarda gittikçe popülerlik kazanmaktadır [10]. Bunun en önemli sebebi, iYKAS sistemlerinin iMRG'ye kıyasla daha ucuz, taşınabilir ve zamansal çözünürlüğünün yüksek, EEG'ye nazaran ise uzaysal çözünürlüğünün yüksek ve her iki modaliteye kıyasla hareket artefaktlarına karşı daha az duyarlı olmasıdır [12].

iYKAS, yaklaşık olarak 600-1000 nm aralığındaki yakın kızıl altı ışık spektrumunda insan beynindeki damarlardaki HbO ve Hb'nin ölçülmesinde kullanılan optik bir sistemdir. iYKAS kullanılarak genellikle, kaynak-dedektör mesafesine bağlı olarak kafatası yüzeyinin yaklaşık 2-3 cm altında bulunan kortikal yapılarda hemodinamik cevap gözlemlenir. Bunun yanı sıra, bu spektranın içinde hemodinamik aktivitenin oluşması, oksihemoglobin (HbO) ve deoksihemoglobin'in (Hb) uygulanan yakın kızıl altı ışığa karşı davranışı ile doğrudan ilişkilidir. BBA modellerinde iYKAS, özellikle EEG ile birlikte kullanıldığı durumlarda genellikle tek bir modalite ile kullanıldığı durumlara nazaran daha yüksek doğruluk sonuçları raporlanmaktadır [10]. Bununla birlikte BBA'lerinde kullanılan EEG sistemlerine ek olarak özellikle nörorehabilitasyon uygulamalarında elektromiyografi (EMG) de bu sistemlere veri sağlayıcı olarak sıklıkla kullanılmaktadır [13-15].

BBA modellerinin eğitilmesinde kullanılan, beyin ve kaslardan alınan sinyaller tek başlarına çeşitli problemler içermektedir. Beyinden elde edilen sinyaller genellikle katılımcılara özel bir nörolojik adaptasyon gerektirmekte ve bu adaptasyon gerçekleşmediği sürece genellikle BBA sistemlerinde çok düşük sınıflandırma doğrulukları elde edilmektedir [16]. Öte yandan, kastan elde edilen sinyallerde ise bazı hastalık gruplarının nöromusküler hastalıklar da barındırabileceğinden özellikle

elektrofizyolojik cevaplarda bu hastalıklara bağlı anomaliler gösterebilecektir [17, 18]. Bu handikaplar araştırmacıları kas ve beyinden elde edilen sinyalleri birlikte kullanılacak yaklaşımlar oluşturarak BBA modelleri eğitilmesine yönlendirmiştir. Bu çalışmalar içerisinde, klasik yaklaşım olan kas ve beyinden alınan verilerden çıkartılan öznelik füzyonu da kullanılırken [19-23], aynı zamanda bu yaklaşımdan bağımsız olarak EEG ve EMG sinyallerinden çıkartılan kortikomusküler koherans da kullanılmıştır [15, 17]. Bu çalışmada uzaysal çözünürlüğü EEG'den daha yüksek olan iYKAS sistemi ve EMG'den toplanmış sinyaller kullanılarak el sıkma hareketinin sağ ya da sol el tarafından yapıldığının sınıflandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Önceki yıllarda yakın kızılaltı spektroskopisi ve EMG çalışmaları genel olarak kas oksijenasyonunun gerçek zamanlı ölçümü üzerine kullanılmıştır [24]. Ancak, literatürde bildiğimiz kadarı ile iYKAS ile EMG'nin birlikte kullanıldığı, bir BBA modeli geliştirmeye yönelik bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun için, çalışmamızda, dokuz makine öğrenmesi algoritması kullanarak, sadece iYKAS odaklı öznelikler, sadece EMG odaklı öznelikler ve hem iYKAS hem de EMG odaklı özneliklerin kullanıldığı BBA modelleri geliştirmeye çalışarak, modalitelerin ve algoritmaların başarımlarını üzerine etkisini gözlemlemeye çalıştık.

## Yöntem

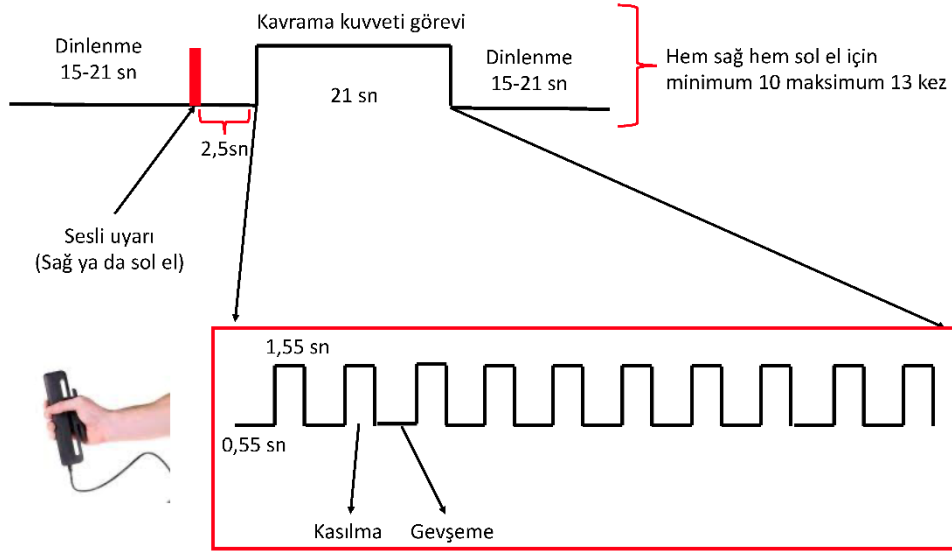
Bu çalışmada Hibrid Dinamik Grip (Hybrid Dynamic-Grip, HYGRIP) veri seti kullanılmıştır [25]. Bu veri seti 14 sağlıklı sağ-el dominant katılımcıdan, bir motor kontrol görevi esnasında toplanan iYKAS, EEG, EMG, dinamometre kullanarak el sıkma kuvveti ve solunum verisini içermektedir. Bu çalışmada sadece EMG ve iYKAS verisi kullanılmıştır. Verilerin ön-işleme ve öznelik çıkarım aşamalarından MATLAB (Mathworks Co., MA, ABD) programlama dili kullanılmış olup, sınıflandırma aşamalarında, Python tabanlı bir kütüphane olan *scikit-learn* kullanılmıştır [26].

## Deneyel Tasarım

Çalışmada kullanılan veri bir motor kontrol deneyi esnasında elde edilmiştir. Bu deneyde hem sağ hem sol el kullanarak, 10 kez (5 sağ el / 5 sol el) 21 saniyelik blok içerisinde bir dinamometrenin sıkılması görevi gerçekleştirilmiştir. Her bir 20 saniyelik blok içerisinde 10 kez (1.55 saniye sıkma / 0.55 saniye dinlenme) sıkma deneyi her iki el için gerçekleştirilmiştir. Deneyel tasarım şekil 1. de gösterilmektedir.

## EMG Sinyal Kaydı ve Ön-İşleme

EMG sinyal kaydı ActiChamp sistemi aracılığı ile gerçekleştirilmiştir (Brain Products, Berlin, Almanya). Sinyalin örnekleme frekansı 4 kHz dir. EMG sinyali için bir aktif biri referans olmak üzere iki elektrot kullanılmış



Şekil 1. Deneysel tasarım.

olup, bu elektrotlar *flexor digitorum superficialis* kasının üzerine yerleştirilmiştir. Elde edilen EMG sinyalleri, ilk olarak 50 Hz şehir şebeke geriliminden 2. derece bir sonsuz dürtü tepkisi (Infinite Impulse Response-IIR) filtre kullanılarak arındırılmıştır. Bu işlem için MATLAB'daki *iirnotch* fonksiyonundan faydalanılmıştır. Daha sonra 5-450 Hz'lik 4. derece bir butterworth band geçiren filtre kullanılarak sinyalin yüksek frekanslardaki gürültüleri yok edilmiştir. Bu işlemlerden sonra, EMG sinyalimizin mutlak değerini alarak tam dalga doğrultması (full-wave rectification) gerçekleştirilmiştir. Tam dalga doğrultmasından sonra sinyalimiz 1 saniyelik hareketli ortalama filtre (moving average filter) ve 5 saniyelik hareketli ortalama karekökü (Root Mean Square) alınarak ile yüksek frekanslı bileşenler bastırılmıştır.

### İYKAS Sinyal Kaydı

iYKAS sinyalleri, NIRScout iYKAS sistemi (NIRx Medizintechnik GmbH, Berlin, Almanya) kullanılarak toplanmıştır. Sistemin, ölçüm aldığı dalga boyları 760 nm ve 850 nm iken, örnekleme frekansı 12.5 Hz'dir. Yakın kızılaltı ışık kaynağı ile dedektörler arasındaki mesafe 3 cm'dir. Dedektörlerden alınan optik yoğunluk değişimleri uyarlanmış Beer-Lambert yasası [27] kullanılarak oksihemoglobin ( $\Delta HbO$ ) ve deoksihemoglobin ( $\Delta Hb$ ) konsantrasyon değişimleri elde edilmiştir. Uyarlanmış Beer-Lambert yasasında,  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  her 760 ve 850 nm dalga boylarını,  $d$  kaynak-dedektör arası mesafeyi, DPF fotonların dokuya gönderildikten sonra doku içerisinde katettiği ortalama mesafenin

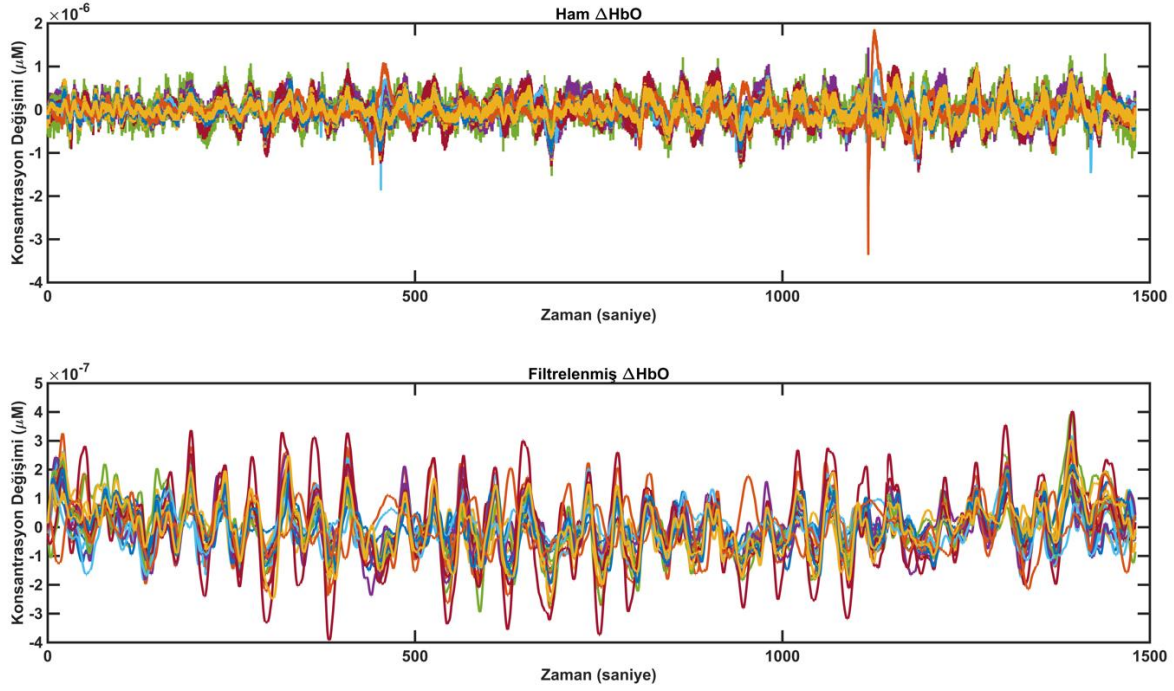
kaynak dedektör mesafesine oranını,  $\Delta OD$  optik yoğunluk değişimini,  $\epsilon$  emilim katsayısını gösterdiğinde,  $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$  yi elde etmek için;

$$\begin{bmatrix} \Delta OD_{\lambda_1} \\ \Delta OD_{\lambda_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{Hb}^{\lambda_1} d DPF & \epsilon_{HbO}^{\lambda_1} d DPF \\ \epsilon_{Hb}^{\lambda_2} d DPF & \epsilon_{HbO}^{\lambda_2} d DPF \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Hb \\ \Delta HbO \end{bmatrix} \quad (1)$$

eşitliğini kullanırız. Burada değişim kavramının kullanılmasındaki temel amaç, deney başlamadan önce elde edilecek olan referans  $HbO$  ve  $Hb$  değerlerinin deney başladıktan sonra değişim miktarını temsil etmektir. DPF değeri bu çalışmada 760 nm için 5.98, 850 nm için 7.54 olarak kullanılmıştır.

### İYKAS Ön-İşleme

Toplanan iYKAS sinyallerinin öncelikle kalite kontrolü gerçekleştirildi. Bunun için her katılımcının ayrı ayrı kanallarının Welch metodu ile güç spektrumları incelenerek kanallarda kalp atımına karşılık gelen yaklaşık 1-1.5 Hz arasında bir güç spektrumunun olup olmadığı kontrol edilmiştir [30, 31]. Bu durum kanallardaki kafatası-optod kuplajının başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Kalp atımının güç spektrumunda temsiliyeti olmayan kanallar ihmal edilmiştir. Sinyal kalitesinin kontrolünden sonra dalgacık dönüşümü tabanlı filtreleme gerçekleştirilerek iYKAS sinyallerinde görülen hareket artefaktları yok edilmiştir [32]. Kalp atımı ve solunum gibi fizyolojik gürültüleri yok etmek için 0.001-0.3 Hz kesim frekansları olan 2. derece bir bant geçiren butterworth filtre kullanılmıştır. Örnek bir ön-işleme sonucu Şekil 2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2. iYKAS ön işleme örneği. Üstteki grafikte ham, alttaki grafikte filtrelenmiş  $\Delta HbO$  sinyalleri görülmektedir.

EMG ve iYKAS sinyallerde ön işleme tamamlandıktan sonra tüm uyarılar (sağ el ve sol el) için EMG ve iYKAS tepkileri, 2 sn uyarın öncesi (pre-stimulus) ve 30 saniye uyarın sonrası (post-stimulus) olmak üzere çıkartılmıştır. Şekil 1.'de gösterilen deneysel tasarımda 21 saniye süren kavrama kuvveti görevinden, 9 saniye daha uzun bir uyarın sonrası veri alınmasının sebebi iYKAS sinyallerinin uyarın öncesi haline dönmüş halinin elde edilmesi içindir. 14 katılımcıdan toplamda 328 (164 sağ, 164 sol) tane uyarın sonrası cevap elde edilmiştir.

### İYKAS Kanal Konfigürasyonu

Optodlar, merkezi EEG 10-20 sistemindeki C3 ve C4 kanallarına denk gelecek şekilde 3 x 3 olarak iki grid şeklinde iki yarımküreye yerleştirilmiştir. C3 ve C4 elektrot pozisyonlarının primer motor korteks bölgelerine karşılık geldiği geçmiş çalışmalardan bilinmektedir [28, 29]. Her bir grid'de 5 tane kaynak ve 4 tane de dedektör olarak toplamda 10 kaynak ve 8 dedektörden ölçüm alınmaktadır. Kanal konfigürasyonu Şekil 3'de gösterilmektedir.

### Öznitelik Çıkartımı ve Seçimi

Öznitelik çıkartımı her bir el sıkma denemesinde (sağ el ve sol el) İYKAS için her bir kanaldan elde edilen sinyallerin ilgili ön işleme süreçlerini tamamladıktan sonra;

- Maksimum  $\Delta HbO$  değeri
- Minimum  $\Delta Hb$  değeri
- $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$ 'nin standart sapması
- $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$ 'nin çarpıklık (skewness) değeri
- $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$ 'nin basıklık (kurtosis) değeri

- Ortalama  $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$  değeri

iYKAS tabanlı öznitelikler tüm kanallardan (24 kanal) alındı. Dolayısı ile toplamda 240 tane öznitelik sadece iYKAS sinyallerinden çıkartıldı. Bu özniteliklere ek olarak EMG sinyalinin;

- Maksimum genlik değeri
- Ortalama genlik değeri
- Standart sapması
- Çarpıklık (skewness) değeri
- Basıklık (kurtosis) değeri

çıkartılmış olup toplamda 245 tane öznitelik elde edildi. Dolayısı ile sınıflandırma için öznitelik seçimi yapacağımız öznitelik vektörümüzün boyutları 328 x 245 olmuş oldu. Öznitelik vektörünü oluşturduktan sonra, uç değerleri normalize etmek için tüm özniteliklere Z-skor normalizasyonu uygulandı. Öznitelik seçimi için L1 cezalandırma yaklaşımı tabanlı bir öznitelik seçimi gerçekleştirdik ve yöntem olarak doğrusal destek vektör makinesini (DVM) kullandık [33]. DVM kullanılarak öznitelik seçiminin temel yaklaşımı; düzenleme parametresi (C) seyrekliği kontrol etmektedir. Düşük bir C değeri daha az öznitelik seçimi anlamına gelir. Burada da düzenleme parametresi C=0.01 olarak alınmıştır. L1 normlu DVM kullanarak öznitelikler seçerken, eğer veri setimize c tane örneklem içeren D der isek;

$$D = \{(s_i, l_i) | s_i \in R^d, l_i \in (-1, +1)\}_{i=1}^c \quad (2)$$

Denklem 2'de,  $s_i$  d tane özniteliği olan i. örneği ve  $l_i$  karşılığı olan sınıf etiketini göstermektedir.  $s_i$  d boyutlu satır vektörü olarak gösterilmektedir  $s_i = [s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{id}]$ . Denklem 2. de ifade ettiğimiz üzere eğer bu problem iki sınıfı sınıflandırma problem

olarak varsayarsak, DVM'nin ayırt edici hiperdüzlemi denklem 3'deki gibi gösterilir.

$$w^T s_i + b = l_i \quad (3)$$

Bu denklemde,  $w$  ağırlık vektörü ve  $b$  yanlılığı (bias) temsil etmektedir. Hedefimiz bu hiperdüzlemin marjin mesafesi olan  $(\frac{2}{\|w\|})$  değerini  $w$ 'yi minimize ederek maksimize etmektir. Bunu gerçekleştirmek için maliyet fonksiyonumuz denklem 4'de gösterilmektedir.

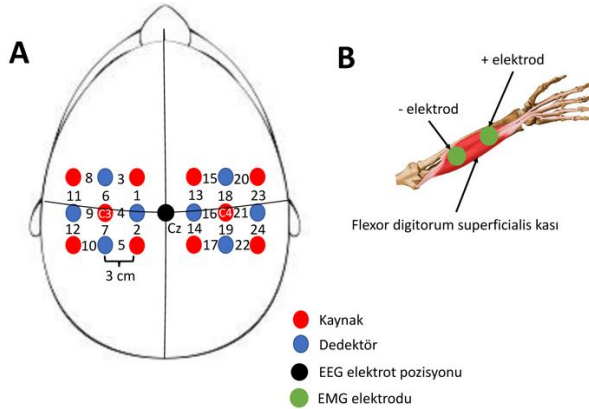
$$\min_{w,b,\xi} C \sum_{i=1}^c \xi(w, b; s_i, l_i) + \frac{1}{2} \|w\|_1 \quad (4)$$

$$\begin{cases} l_i(w^T s_i + b) \geq 1 - \xi(w, b; s_i, l_i) \\ \xi(w, b; s_i, l_i) \geq 0, \quad i = \overline{1, c} \end{cases}$$

Bu denklemlerde,  $s_i, l_i$ 'ye bağlı olan  $\xi$  gevşek değişkendir. Bu noktada,  $k$  sayıda optimal öznetelik  $d$  tane öznetelik arasından çıkarmamız gerekmektedir ( $1 \leq k \leq d$ ). Bunu gerçekleştiren her bir özneteliğin karşılık geldiği ağırlığı göz önüne alırız. Eğer bu ağırlıklar 0'dan büyük ise bu öznetelikler seçilir. Daha sonra, optimizasyon problem denklem 5'deki gibi tanımlanır.

$$\min_{w,b} C \sum_{i=1}^c \max(0, 1 - l_i(w^T s_i + b))^2 + \frac{1}{2} \|w\|_1 \quad (5)$$

Her öznetelik için  $w$  bulduktan sonra,  $w = 0$  olan öznetelikleri öznetelik matrisimizden çıkarttık.



Şekil 3. A) İYKAS optodlarının kafa yüzeyinde dizilim konfigürasyonu. B) EMG elektrotlarının flexor digitorum superficialis kası üzerindeki yerleşimi.

### Sınıflandırma

Öznetelik seçiminden sonra, çalışmamızda sağ ve sol el hareketini sınıflandırmak için K-en yakın komşuluk (K-EYK), doğrusal ve radyal temelli DVM, Gradyan Artırma (GA), Adaboost, Naive Bayes (NB), Doğrusal Diskriminant, Kuadratik Diskriminant ve Lojistik regresyon yaklaşımları kullanılmıştır. Öznetelik çıkarımını ve seçimini yaptıktan sonra elde edilen öznetelik vektörü üzerinde sınıflandırma işlemini gerçekleştirilirken, bir katılımcıyı dışarıda bırakmalı çapraz geçerlilik yöntemi (leave-one-subject-out cross-validation - LOSOCV) uygulanmıştır. Bu yöntemde

klasik birini dışarıda bırak çapraz geçerliliğinden farklı olarak ilgili katılımcıdan elde edilen tüm veri test verisi olarak kullanılırken, diğer katılımcılardan elde edilen veriler eğitim verisi olarak kullanılır. LOSOCV'yi kullanmaktaki temel amaç, sınıflandırıcının her bir katılımcı için performansını gözlemlemektir ve BBA çalışmalarında modelin başarımını test etmek için sıklıkla tercih edilen bir çapraz geçerlilik yaklaşımıdır[34-36]. Bununla birlikte çalışmamızda duyarlılık (sensitivity) ve özgüllük (specificity) sonuçları hesaplanırken Tablo 3. deki gibi bir karışıklık matrisi (confusion matrix) uygulanmıştır. Bu karışıklık matrisinde doğru pozitif (DP), yanlış pozitif (YP), doğru negatif (DN) ve yanlış negatif (YN) sağ ve sol el için tablodaki gibi temsil edilmiştir. Duyarlılık hesaplaması yapılırken tüm sol el sınıflarının % kaçını sol el olarak sınıflandırdığı (DP/(DP + YN)) ve özgüllük hesaplaması yapılırken (DN/(DN + YP)) tüm sağ el sınıflarının % kaçını sağ el olarak sınıflandırdığı belirlenmiştir.

Tablo 3. Karışıklık Matrisi

Gerçek Sonuç \ Model Sonucu	Sol El	Sağ El
Sol El	DP	YP
Sağ El	YN	DN

### Sonuçlar

Öznetelik seçimimiz sonrası çalışmamızda toplamda 6 tane öznetelik seçimi gerçekleştirdik. Bu kullanılan öznetelikler Tablo 1.'de gösterilmektedir.

Tablo 1. L1 norm tabanlı DVM tarafından seçilen öznetelikler

MODALİTE	KULLANILAN ÖZNETELİK
İYKAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kanal 15 (C4 superior horizontal-anterior) ortalama <math>\Delta Hb</math></li> <li>Kanal 16 (C4 superior horizontal-coronal) ortalama <math>\Delta Hb</math></li> <li>Kanal 19 (C4 horizontal-posterior coronal) Maksimum <math>\Delta HbO</math></li> <li>Kanal 20 (C4 inferior horizontal anterior) maximum <math>\Delta HbO</math></li> </ul>
EMG	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maksimum EMG genliği</li> <li>EMG zaman serisinin basıklık değeri</li> </ul>

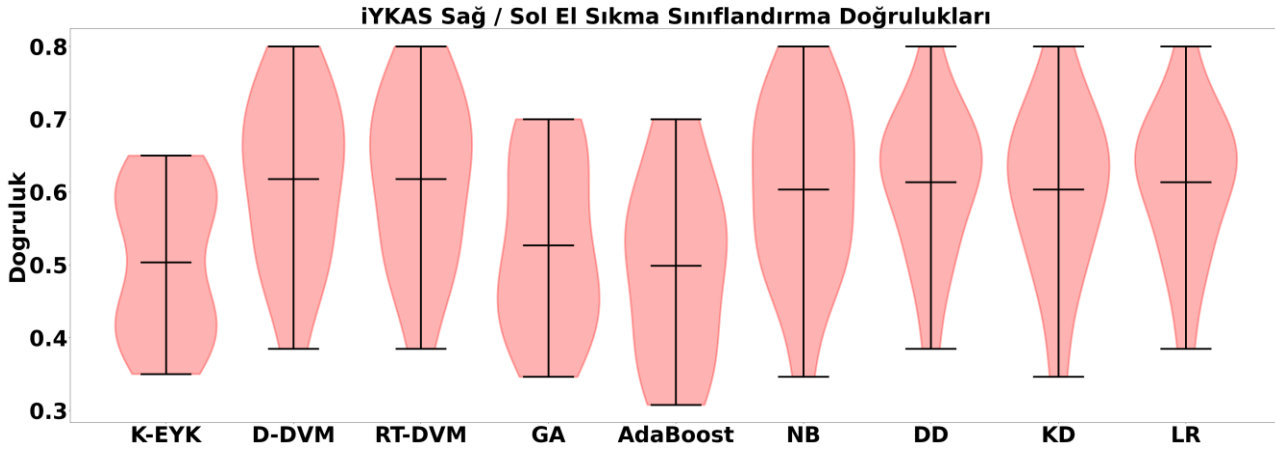
Öznitelikler çıkartıldıktan sonra hem İYKAS, hem EMG, hem de her iki modaliteden alınan öznitelikler birleştirilerek dokuz sınıflandırma algoritması kullanılarak sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de gösterilen İYKAS tabanlı özniteliklerden elde ettiğimiz sınıflandırma sonuçları Tablo 2.’de ve Şekil 4.’de verilmiştir. Buna göre, İYKAS tabanlı öznitelikler kullanılarak bulunan en yüksek ortalama doğruluk, % 61 oranında Doğrusal DVM, Radyal tabanlı DVM, Doğrusal Diskriminant ve Lojistik Regresyon kullanılarak bulunmuştur. Diğer sınıflandırıcılara da bakıldığında genel olarak doğruluk değeri % 50 – 61 arasında

değişmektedir. Bu tek başına düşük bir sınıflandırma yüzdesidir. Öte yandan Tablo 1.’de verilen EMG tabanlı özniteliklerden elde ettiğimiz sonuçlar Tablo 2.’de ve Şekil 5.’de verilmiştir. EMG tabanlı özniteliklerle gerçekleştirilen sınıflandırma sonucunda, ortalama en yüksek doğruluk değeri %83 olarak Doğrusal Diskriminant algoritması tarafından bulunmuştur. EMG kullanılan öznitelikler ile yapılan sınıflandırmalarda bulunan doğruluk değerleri % 61-83 arasında bulunmuştur. Buradan kıyaslandığında EMG tabanlı özniteliklerin ayırt ediciliği İYKAS tabanlı özniteliklere nazaran daha yüksektir.

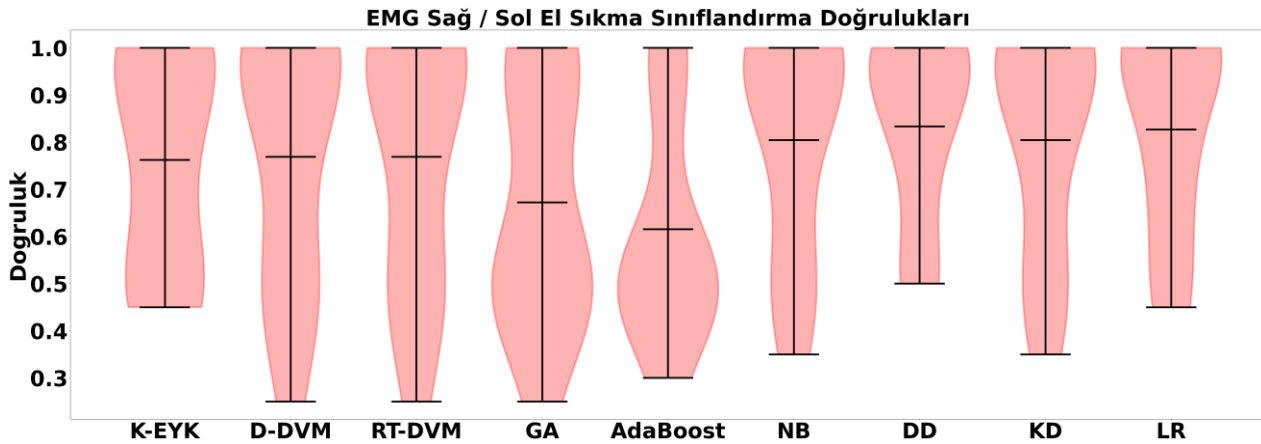
Tablo 2. Sınıflandırma işlemi sonrası tüm katılımcılar için ve ortalama doğruluk sonuçları. K-EYK: K-en yakın komşuluk, D-DVM: Doğrusal Destek Vektör Makinesi, RT-DVM: Radyal Tabanlı Destek Vektör Makinesi, GA: Gradyan Arttırma, NB: Naive Bayes, DD: Doğrusal Diskriminant, KD: Kuadratik Diskriminant, LR: Lojistik Regresyon. Ort.: Ortalama. Std.: Standart sapma, Alg: Algoritma, Mod.: Modalite

		Katılımcılar														
Alg.	Mod.	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	Ort.± Std.
K-EYK	İYKAS	0.60	0.57	0.42	0.42	0.53	0.61	0.65	0.35	0.60	0.40	0.60	0.42	0.46	0.38	0.50 ± 0.10
	EMG	0.45	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	0.80	0.80	1.00	0.70	0.50	0.46	0.96	1.00	0.76 ± 0.23
	İYKAS + EMG	0.75	0.61	0.88	0.61	0.73	0.84	0.90	0.85	0.95	0.75	0.70	0.53	0.80	0.88	0.77 ± 0.12
D-DVM	İYKAS	0.75	0.69	0.61	0.38	0.61	0.80	0.65	0.70	0.50	0.75	0.53	0.50	0.50	0.50	0.61 ± 0.12
	EMG	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.25	1.00	0.80	0.45	0.50	0.96	1.00	0.76 ± 0.26
	İYKAS + EMG	0.80	0.65	0.92	0.65	0.73	1.00	1.00	0.40	0.90	0.55	0.75	0.76	0.88	0.84	0.77 ± 0.17
RT-DVM	İYKAS	0.75	0.69	0.61	0.38	0.61	0.65	0.80	0.65	0.70	0.50	0.75	0.53	0.50	0.50	0.61 ± 0.12
	EMG	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.25	1.00	0.80	0.45	0.50	0.96	1.00	0.76 ± 0.26
	İYKAS + EMG	0.80	0.65	0.92	0.65	0.73	1.00	1.00	0.40	0.90	0.55	0.75	0.76	0.88	0.84	0.77 ± 0.17
GA	İYKAS	0.65	0.61	0.38	0.42	0.53	0.61	0.45	0.50	0.65	0.45	0.70	0.46	0.53	0.38	0.52 ± 0.10
	EMG	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	0.25	0.50	0.50	0.46	1.00	0.67 ± 0.26
	İYKAS + EMG	0.50	0.50	0.50	0.50	0.76	1.00	0.85	0.80	1.00	0.70	0.50	0.50	0.46	1.00	0.68 ± 0.21
Ada Boost	İYKAS	0.55	0.69	0.34	0.46	0.57	0.38	0.60	0.35	0.55	0.50	0.70	0.30	0.53	0.42	0.49 ± 0.12
	EMG	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0.85	0.50	1.00	0.30	0.50	0.50	0.46	1.00	0.61 ± 0.23
	İYKAS + EMG	0.50	0.50	1.00	0.61	0.84	1.00	0.85	0.80	1.00	0.60	0.40	0.50	0.80	1.00	0.74 ± 0.19
NB	İYKAS	0.70	0.73	0.61	0.34	0.50	0.73	0.60	0.70	0.65	0.50	0.80	0.57	0.50	0.50	0.60 ± 0.10
	EMG	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	0.75	1.00	0.85	0.35	0.50	0.96	1.00	0.80 ± 0.20
	İYKAS + EMG	0.65	0.46	0.96	0.57	0.92	0.92	0.90	0.85	1.00	0.85	0.40	0.69	0.92	0.96	0.79 ± 0.10
DD	İYKAS	0.70	0.69	0.61	0.38	0.53	0.69	0.65	0.60	0.65	0.65	0.80	0.61	0.50	0.50	0.61 ± 0.11
	EMG	1.00	0.50	1.00	1.00	0.84	1.00	0.90	0.80	1.00	0.70	0.50	0.50	0.92	1.00	0.83 ± 0.23
	İYKAS + EMG	0.85	0.73	0.92	0.65	0.76	0.96	1.00	0.90	0.90	0.90	0.70	0.80	0.76	0.88	0.84 ± 0.20
KD	İYKAS	0.70	0.73	0.50	0.34	0.61	0.65	0.55	0.65	0.65	0.60	0.80	0.65	0.53	0.46	0.60 ± 0.11
	EMG	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	0.75	1.00	0.85	0.35	0.50	0.96	1.00	0.80 ± 0.23
	İYKAS + EMG	0.40	0.69	0.92	0.69	0.96	0.96	0.90	0.85	1.00	0.85	0.40	0.61	0.92	1.00	0.79 ± 0.20

LR	iYKAS	0.70	0.69	0.61	0.38	0.53	0.69	0.65	0.60	0.65	0.65	0.80	0.61	0.50	0.50	0.61 ± 0.10
	EMG	1.00	0.50	1.00	1.00	0.96	1.00	0.75	0.75	1.00	0.70	0.45	0.50	0.96	1.00	0.82 ± 0.21
	iYKAS + EMG	0.85	0.53	0.96	0.73	0.96	1.00	0.85	0.90	0.95	0.75	0.55	0.76	0.88	0.96	0.83 ± 0.14



Şekil 4. Sadece iYKAS sinyallerinden elde edilen öznitelikler kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarının keman grafiği ile gösterimi. Siyah çizgi ortalama değeri göstermektedir. Keman grafiğinde, simetrik olarak 14 katılımcıdan alınan doğruluk değerlerinin istatistiksel dağılımı görülmekte olup, ortalama değer ile ortanca değer hemen hemen birbirine yakındır. K-EYK: K-en yakın komşuluk, D-DVM: Doğrusal Destek Vektör Makinesi, RT-DVM: Radyal Tabanlı Destek Vektör Makinesi, GA: Gradyan Arttırma, NB: Naive Bayes, DD: Doğrusal Diskriminant, KD: Kuadratik Diskriminant, LR: Lojistik Regresyon



Şekil 5. EMG sinyallerinden elde edilen öznitelikler kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçlarının keman grafiği ile gösterimi. Siyah çizgi ortalama değeri göstermektedir. Keman grafiğinde, simetrik olarak 14 katılımcıdan alınan doğruluk değerlerinin istatistiksel dağılımı görülmektedir. K-EYK: K-en yakın komşuluk, D-DVM: Doğrusal Destek Vektör Makinesi, RT-DVM: Radyal Tabanlı Destek Vektör Makinesi, GA: Gradyan Arttırma, NB: Naive Bayes, DD: Doğrusal Diskriminant, KD: Kuadratik Diskriminant, LR: Lojistik Regresyon

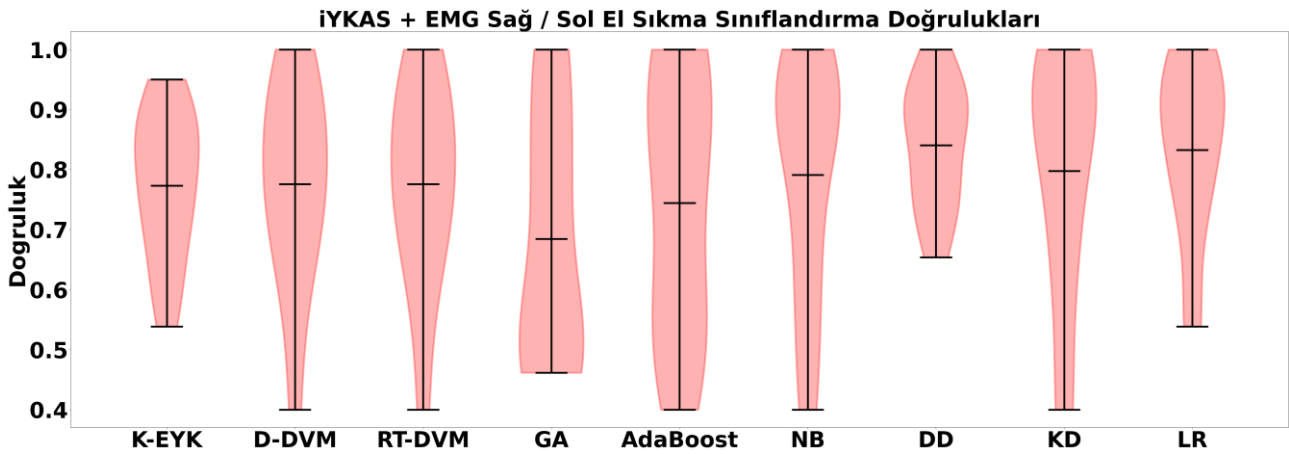
Öte yandan hem iYKAS hem de EMG tabanlı özniteliklerin füzyonu sonucu Tablo 1'de gösterilen toplam 6 öznitelik kullanılarak elde edilen sınıflandırma sonuçları Tablo 2. ve Şekil 6'da gösterilmektedir. Her iki modalite kullanıldığında ise en yüksek doğruluk değeri %84 olarak Doğrusal Diskriminant algoritması kullanılarak bulunmuştur. Bununla birlikte tüm algoritmalarda iYKAS ve EMG tabanlı özniteliklerin

kullanılması sonucu elde edilen doğruluk değerleri iYKAS tabanlı özniteliklerin kullanılması sonucu elde edilen doğruluk değerlerinden daha yüksek bulunmuştur. Öte yandan, dokuz algoritmanın yedi tanesinde iYKAS ile EMG tabanlı özniteliklerin kullanılması, EMG tabanlı özniteliklerden elde edilen doğruluk değerlerinden daha yüksek doğruluk değerleri bulurken, Naive Bayes ve Kuadratik Diskriminant algoritmalarında sadece

EMG'nin kullanılması dahi başarılı bir sonuç vermektedir. İstatistiksel olarak karşılaştırıldığında sadece AdaBoost algoritmasının kullanılmasında iYKAS ile EMG kaynaklı özniteliklerin sağladıkları doğruluk değeri, sadece EMG kaynaklı özniteliklerin sağladığı doğruluk değerinden anlamlı olarak daha yüksektir ( $t(13)=-2,569, p=0.023$ ).

Doğruluk değerlerinin yanı sıra 14 katılımcıdan LOSOCV sonucu alınan ortalama duyarlılık ve özgüllük sonuçları da Tablo 4.'de verilmiştir. Sonuçlara göre en yüksek doğruluk elde ettiğimiz iYKAS ve EMG özniteliklerini kullanan doğrusal diskriminant

sınıflandırıcısı ile %80 oranında duyarlılık ve %87 oranında özgüllük elde ettik. Tüm sınıflandırıcılar ve modaliteler içerisinde en yüksek elde ettiğimiz duyarlılık sonucu doğrusal diskriminant ile %80 iken, Gradyan Arttırma sınıflandırıcısı ile %91 oranında bir özgüllük elde ettik. Ancak Gradyan Arttırma sınıflandırıcısının duyarlılık oranı her üç öznitelik seti için de çok düşük değerlerde olduğu için bu sınıflandırıcı daha çok sağ el verisini sınıflandırmada duyarlı bir sınıflandırıcı olarak göze çarpmıştır. Dolayısı ile optimal düzeyde bakıldığında doğrusal diskriminant sınıflandırıcısının her iki sınıftan da veriyi %80 ve üstü bir başarımla sınıflandırdığını söylemek mümkündür.



Şekil 6. iYKAS ve EMG sinyallerinden elde edilen öznitelikler birleştirilen sınıflandırma sonuçlarının keman grafiği ile gösterimi. Siyah çizgi ortalama değeri göstermektedir. Keman grafiğinde, simetrik olarak 14 katılımcıdan alınan doğruluk değerlerinin istatistiksel dağılımı görülmektedir. K-EYK: K-en yakın komşuluk, D-DVM: Doğrusal Destek Vektör Makinesi, RT-DVM: Radyal Tabanlı Destek Vektör Makinesi, GA: Gradyan Arttırma, NB: Naive Bayes, DD: Doğrusal Diskriminant, KD: Kuadratik Diskriminant, LR: Lojistik Regresyon

## Tartışma

Çalışmamızda, en yüksek doğruluğu, iYKAS ve EMG bazlı öznitelikler ile Doğrusal Diskriminant algoritmasını kullanarak %84 olarak elde ettik. Bununla birlikte tüm algoritmalarda EMG ile iYKAS'ın birlikte kullanıldığı sınıflandırma sonuçlarında iYKAS'ın doğruluk değerlerine kıyasla doğruluk yüzdesinde artış gözlemledik. Çalışmamızda iYKAS odaklı özniteliklere baktığımızda sağ motor korteks'e yakın bölgelerde  $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$  odaklı öznitelikler kullanılmıştır.  $\Delta HbO$  zaman serileri ağırlıklı olarak BBA sistemlerinde öznitelik sağlayıcı olarak kullanılmaktadır [10]. Bunun en temel sebebi  $\Delta Hb$ 'e nazaran yüksek bir sinyal-gürültü-oranı (SGO) olmasıdır [37-40]. Ancak bunun yanısıra,  $\Delta Hb$  zaman serilerinin düşük SGO'ları olması da ekstraserebral ve intraserebral artifaktlardan az düzeyde etkilenmesinden kaynaklanabilir, bu da sağ ve sol el arasındaki sınıflandırmanın sağlanmasında etkili olabilir [41]. Bununla birlikte, sınıflandırmada kullanılan EMG bazlı öznitelikler maksimum EMG genliği ve EMG zaman serisinin basıklık (kurtosis) değeridir. Bu öznitelikler önceki yıllarda yapılan EMG tabanlı makine

öğrenmesi çalışmalarında en sıklıkla faydalanan özniteliklerdendir [42]. Sınıflandırma skorlarına baktığımızda, EMG'nin iYKAS ile birlikte kullanılması efektif bir el sıkma hareketi odaklı bir BBA geliştirmek için yeterli olabilirken, algoritmaya bağlı olarak sadece EMG de yeterli olabilmektedir. iYKAS tek başına BBA modelleri geliştirmek için, özellikle motor icraatçı görevler (motor execution) sıklıkla kullanılmaktadır [43-46]. Bu çalışmada, en temel fark bir dinamometre ile el sıkma görevi gerçekleştirilmiştir. Benzer bir çalışmada, sağ ve sol el hareketlerinin bir dinamometre ile sıklığı sonucu elde edilen EEG sinyallerinden 8-30 Hz sensorimotor olaya ilişkin desenkronizasyon verisi kullanılarak yapılan el sıkılmasının kuvvet tahmini doğruluğu sağ el kullanılarak %55, sol el kullanılarak %53 olarak bulunmuştur. Katılımcılara, sağ ve sol elleri ile dinamometre sıkma paradigması uygulanan başka bir çalışmada, sadece iYKAS sinyalleri kullanılarak geliştirilen bir derin öğrenme modeli ile %80 oranında sağ / sol el sıkma tahmin edilmiştir [47]. Benzer başka iYKAS ve EMG çalışmasında ise sağ ve sol el sıkma arasındaki fark klasik doğrusal modellerle istatistiksel yöntemlerle ayırt edilememiştir [48].

Tablo 4. Sınıflandırıcıların LOSOCV sonucu duyarlılık (sol el sınıflandırma) ve özgülük (sağ el sınıflandırma) ortalamaları

Sınıflandırıcı	Modalite	Duyarlılık	Özgüllük
K-EYK	İYKAS	0.53	0.47
	EMG	0.64	0.88
	İYKAS + EMG	0.79	0.75
D-DVM	İYKAS	0.72	0.51
	EMG	0.64	0.89
	İYKAS + EMG	0.72	0.82
RT-DVM	İYKAS	0.72	0.51
	EMG	0.64	0.89
	İYKAS + EMG	0.72	0.82
GA	İYKAS	0.51	0.52
	EMG	0.35	0.91
	İYKAS + EMG	0.45	0.90
AdaBoost	İYKAS	0.51	0.48
	EMG	0.28	0.94
	İYKAS + EMG	0.59	0.89
NB	İYKAS	0.58	0.61
	EMG	0.71	0.89
	İYKAS + EMG	0.75	0.82
DD	İYKAS	0.62	0.60
	EMG	0.78	0.88
	İYKAS + EMG	0.80	0.87
KD	İYKAS	0.61	0.58
	EMG	0.71	0.89
	İYKAS + EMG	0.75	0.83
LR	İYKAS	0.62	0.60
	EMG	0.78	0.86
	İYKAS + EMG	0.80	0.86

Çalışmamızda bulduğumuz %84 doğruluk, daha önce bulunan doğruluk oranlarından daha yüksektir. Ayrıca tek bir modaliteden elde edilen doğruluk değerlerinden daha yüksek bir doğruluk değeri her iki modaliteden elde edilen özneliklerden elde edilmiştir. Bu da her iki modalitenin birlikte kullanılmasının avantajlı olacağını göstermektedir. Öte yandan, bireysel düzeyde sınıflandırma sonuçlarına baktığımızda, sınıflandırma skorları arasında yüksek bir değişkenlik gözlemlenmektedir. Sınıflandırıcı doğrulukları arasındaki %10 -26 arasında bir değişkenlik görülmektedir. Bu değişkenlik İYKAS sisteminden elde edilen  $\Delta HbO$  ve  $\Delta Hb$  sinyallerinin hem katılımcı bazında (intra-subject) hem de grup bazında (inter-subject) bir değişkenliğin olmasından kaynaklanabilir. Bu değişkenlik genel olarak, dikkat ve hafıza yükü gibi psiko-fizyolojik faktörlerin elde edilen sinyallere katkısından kaynaklanabilir [49]. Öte yandan bazı sınıflandırıcıların sağ ve sol el kavrama kuvvetinden elde edilen öznelikler sonucu spesifik olarak bir eli

sınıflandırmaya daha yatkın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak en yüksek doğruluğu bulduğumuz doğrusal diskriminant algoritması bize hem sağ elde hem de sol el de %80 ve üstü başarı vererek her iki elin kavrama kuvveti sonucu elde edilen EMG ve İYKAS aktivitesini başarı ile sınıflandırmıştır.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, İYKAS ve EMG ölçüm sistemleri kullanılarak el sıkma odaklı bir BBA sisteminin başarımı incelenmiştir. Çalışmada hem İYKAS tabanlı, hem EMG tabanlı öznelikler ile dokuz tane farklı sınıflandırma algoritması kullanılarak hem algoritmalar arasındaki sonuçlar hem de modalitelerden elde edilen özneliklerin etkinliği elde edilen doğruluk skorlarına göre karşılaştırılmıştır. Önerilen modaliteler ve öznelikler, özellikle inme gibi hastalıklarda nörorehabilitasyon amaçlı kullanılacak nöromusküler BBA yaklaşımlarını geliştirme konusunda ileriki çalışmalara fikir vermesi bakımından önemli olduğu düşünülmektedir. Literatürde daha önce herhangi bir EMG ve İYKAS tabanlı BBA çalışması bulunmadığından bu çıkartılan öznelik ve algoritmaların özelliklerinin başarımlarının karşılaştırılması için ileriki yıllarda bu alanda yapılacak çalışmalara ihtiyaç vardır.

## Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynaklar

- [1] L. F. Nicolas-Alonso and J. Gomez-Gil, "Brain computer interfaces, a review," *Sensors (Basel)*, vol. 12, no. 2, pp. 1211-79, 2012, doi: 10.3390/s120201211.
- [2] J. J. Shih, D. J. Krusienski, and J. R. Wolpaw, "Brain-computer interfaces in medicine," *Mayo Clinic proceedings*, vol. 87, no. 3, pp. 268-79, Mar 2012, doi: 10.1016/j.mayocp.2011.12.008.
- [3] C. L. Pulliam, S. R. Stanslaski, and T. J. Denison, "Industrial perspectives on brain-computer interface technology," *Handb Clin Neurol*, vol. 168, pp. 341-352, 2020, doi: 10.1016/B978-0-444-63934-9.00025-1.
- [4] J. Kogel, J. R. Schmid, R. J. Jox, and O. Friedrich, "Using brain-computer interfaces: a scoping review of studies employing social research methods," *BMC Med Ethics*, vol. 20, no. 1, p. 18, Mar 7 2019, doi: 10.1186/s12910-019-0354-1.
- [5] R. Carabalona, P. Castiglioni, and F. Gramatica, "Brain-computer interfaces and neurorehabilitation," *Studies in health technology and informatics*, vol. 145, pp. 160-76, 2009. [Online]. Available:



- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19592793>
- [6] <https://ebooks.iospress.nl/publication/12265>. S. Sreedharan, R. Sitaram, J. S. Paul, and C. Kesavadas, "Brain-computer interfaces for neurorehabilitation," *Critical reviews in biomedical engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 269-79, 2013, doi: 10.1615/critrevbiomedeng.2014010697.
- [7] M. J. Young, D. J. Lin, and L. R. Hochberg, "Brain-Computer Interfaces in Neurorecovery and Neurorehabilitation," *Semin Neurol*, vol. 41, no. 2, pp. 206-216, Apr 2021, doi: 10.1055/s-0041-1725137.
- [8] R. Sitaram *et al.*, "fMRI brain-computer interface: a tool for neuroscientific research and treatment," *Comput Intell Neurosci*, p. 25487, 2007, doi: 10.1155/2007/25487.
- [9] S. Machado *et al.*, "EEG-based brain-computer interfaces: an overview of basic concepts and clinical applications in neurorehabilitation," *Rev Neurosci*, vol. 21, no. 6, pp. 451-68, 2010, doi: 10.1515/revneuro.2010.21.6.451.
- [10] N. Naseer and K. S. Hong, "fNIRS-based brain-computer interfaces: a review," (in eng), *Front Hum Neurosci*, vol. 9, p. 3, 2015, doi: 10.3389/fnhum.2015.00003.
- [11] J. Mellinger *et al.*, "An MEG-based brain-computer interface (BCI)," *Neuroimage*, vol. 36, no. 3, pp. 581-93, Jul 1 2007, doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.03.019.
- [12] S. H. Kohl, D. M. A. Mehler, M. Luhrs, R. T. Thibault, K. Konrad, and B. Sorger, "The Potential of Functional Near-Infrared Spectroscopy-Based Neurofeedback-A Systematic Review and Recommendations for Best Practice," *Front Neurosci*, vol. 14, p. 594, 2020, doi: 10.3389/fnins.2020.00594.
- [13] S. Balasubramanian, E. Garcia-Cossio, N. Birbaumer, E. Burdet, and A. Ramos-Murguialday, "Is EMG a Viable Alternative to BCI for Detecting Movement Intention in Severe Stroke?," *IEEE transactions on biomedical engineering*, vol. 65, no. 12, pp. 2790-2797, Dec 2018, doi: 10.1109/TBME.2018.2817688.
- [14] J. Rouillard *et al.*, "Hybrid BCI Coupling EEG and EMG for Severe Motor Disabilities," *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 29-36, 2015/01/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.104>.
- [15] V. de Seta *et al.*, "Cortico-muscular coupling to control a hybrid brain-computer interface for upper limb motor rehabilitation: A pseudo-online study on stroke patients," *Frontiers in Human Neuroscience*, Original Research vol. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2022.1016862>.
- [16] A. Chowdhury, H. Raza, Y. K. Meena, A. Dutta, and G. Prasad, "Online Covariate Shift Detection-Based Adaptive Brain-Computer Interface to Trigger Hand Exoskeleton Feedback for Neuro-Rehabilitation," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 1070-1080, 2018, doi: 10.1109/TCDS.2017.2787040.
- [17] A. Chowdhury, H. Raza, Y. K. Meena, A. Dutta, and G. Prasad, "An EEG-EMG correlation-based brain-computer interface for hand orthosis supported neuro-rehabilitation," *J Neurosci Methods*, vol. 312, pp. 1-11, Jan 15 2019, doi: 10.1016/j.jneumeth.2018.11.010.
- [18] T. Sadoyama, T. Masuda, and H. Miyano, "Relationships between muscle fibre conduction velocity and frequency parameters of surface EMG during sustained contraction," *European journal of applied physiology and occupational physiology*, vol. 51, no. 2, pp. 247-256, 1983/08/01 1983, doi: 10.1007/BF00455188.
- [19] C. Byung Chan and S. Bo Hyeok, "Development of new brain computer interface based on EEG and EMG," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 22-25 Feb. 2009 2009, pp. 1665-1670, doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913251. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?tp=&arnumber=4913251&ref=>
- [20] R. Leeb, H. Sagha, R. Chavarriaga, and R. Millan Jdel, "A hybrid brain-computer interface based on the fusion of electroencephalographic and electromyographic activities," *J Neural Eng*, vol. 8, no. 2, p. 025011, Apr 2011, doi: 10.1088/1741-2560/8/2/025011.
- [21] N. A. Bhagat *et al.*, "Design and Optimization of an EEG-Based Brain Machine Interface (BMI) to an Upper-Limb Exoskeleton for Stroke Survivors," *Front Neurosci*, vol. 10, p. 122, 2016, doi: 10.3389/fnins.2016.00122.
- [22] J. Zhang, B. Wang, C. Zhang, Y. Xiao, and M. Y. Wang, "An EEG/EMG/EOG-Based Multimodal Human-Machine Interface to Real-Time Control of a Soft Robot Hand," *Front Neurobot*, vol. 13, p. 7, 2019, doi: 10.3389/fnbot.2019.00007.
- [23] Z. Wang *et al.*, "Incorporating EEG and EMG Patterns to Evaluate BCI-Based Long-Term Motor Training," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 648-657, 2022, doi: 10.1109/THMS.2022.3168425.
- [24] A. Scano *et al.*, "NIRS-EMG for Clinical Applications: A Systematic Review," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 15, doi: 10.3390/app9152952.
- [25] P. Ortega, T. Zhao, and A. A. Faisal, "HYGRIP: Full-Stack Characterization of Neurobehavioral Signals (fNIRS, EEG, EMG, Force, and Breathing) During a Bimanual Grip

- Force Control Task," *Front Neurosci*, vol. 14, p. 919, 2020, doi: 10.3389/fnins.2020.00919.
- [26] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, no. null, pp. 2825–2830, 2011.
- [27] M. Cope and D. T. Delpy, "System for long-term measurement of cerebral blood and tissue oxygenation on newborn infants by near infrared transillumination," *Med Biol Eng Comput*, vol. 26, no. 3, pp. 289-94, May 1988. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2855531>
- [28] L. Koessler *et al.*, "Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system," *Neuroimage*, vol. 46, no. 1, pp. 64-72, May 15 2009, doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.02.006.
- [29] M. Okamoto *et al.*, "Three-dimensional probabilistic anatomical cranio-cerebral correlation via the international 10-20 system oriented for transcranial functional brain mapping," *Neuroimage*, vol. 21, no. 1, pp. 99-111, Jan 2004. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14741647>
- [http://ac.els-cdn.com/S1053811903005366/1-s2.0-S1053811903005366-main.pdf?\\_tid=b4eff368-3e5d-11e4-8c7e-00000aab0f27&acdnat=1410953471\\_c5a2dba1d0acdd9b6ef748fc21a01acd](http://ac.els-cdn.com/S1053811903005366/1-s2.0-S1053811903005366-main.pdf?_tid=b4eff368-3e5d-11e4-8c7e-00000aab0f27&acdnat=1410953471_c5a2dba1d0acdd9b6ef748fc21a01acd).
- [30] H. Ayaz *et al.*, "Optical imaging and spectroscopy for the study of the human brain: status report," *Neurophotonics*, vol. 9, no. Suppl 2, p. S24001, Aug 2022, doi: 10.1117/1.NPh.9.S2.S24001.
- [31] M. A. Yucel *et al.*, "Best practices for fNIRS publications," *Neurophotonics*, vol. 8, no. 1, p. 012101, Jan 2021, doi: 10.1117/1.NPh.8.1.012101.
- [32] B. Molavi and G. A. Dumont, "Wavelet-based motion artifact removal for functional near-infrared spectroscopy," *Physiological measurement*, vol. 33, no. 2, pp. 259-70, Feb 2012, doi: 10.1088/0967-3334/33/2/259.
- [33] V. N. Vapnik, "The Nature of Statistical Learning," *Theory*, 1995 1995. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10020951890/en/>.
- [34] J. Ying, Q. Wei, and X. Zhou, "Riemannian geometry-based transfer learning for reducing training time in c-VEP BCIs," *Scientific reports*, vol. 12, no. 1, p. 9818, Jun 14 2022, doi: 10.1038/s41598-022-14026-y.
- [35] K. Won, M. Kwon, M. Ahn, and S. C. Jun, "Selective Subject Pooling Strategy to Improve Model Generalization for a Motor Imagery BCI," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 16, Aug 12 2021, doi: 10.3390/s21165436.
- [36] A. M. Ray *et al.*, "A subject-independent pattern-based Brain-Computer Interface," *Frontiers in behavioral neuroscience*, vol. 9, p. 269, 2015, doi: 10.3389/fnbeh.2015.00269.
- [37] S. Montero-Hernandez *et al.*, "Estimating Functional Connectivity Symmetry between Oxy- and Deoxy-Haemoglobin: Implications for fNIRS Connectivity Analysis," *Algorithms*, vol. 11, no. 5, 2018, doi: 10.3390/a11050070.
- [38] H. Niu *et al.*, "Resting-state functional connectivity assessed with two diffuse optical tomographic systems," *Journal of biomedical optics*, vol. 16, no. 4, p. 046006, Apr 2011, doi: 10.1117/1.3561687.
- [39] Y. J. Zhang, C. M. Lu, B. B. Biswal, Y. F. Zang, D. L. Peng, and C. Z. Zhu, "Detecting resting-state functional connectivity in the language system using functional near-infrared spectroscopy," *Journal of biomedical optics*, vol. 15, no. 4, p. 047003, Jul-Aug 2010, doi: 10.1117/1.3462973.
- [40] F. Homae *et al.*, "Development of global cortical networks in early infancy," *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, vol. 30, no. 14, pp. 4877-82, Apr 7 2010, doi: 10.1523/JNEUROSCI.5618-09.2010.
- [41] E. Kirilina *et al.*, "The physiological origin of task-evoked systemic artefacts in functional near infrared spectroscopy," *Neuroimage*, vol. 61, no. 1, pp. 70-81, May 15 2012, doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.02.074.
- [42] A. Jaramillo-Yanez, M. E. Benalcazar, and E. Mena-Maldonado, "Real-Time Hand Gesture Recognition Using Surface Electromyography and Machine Learning: A Systematic Literature Review," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 9, Apr 27 2020, doi: 10.3390/s20092467.
- [43] J. Shin and J. Jeong, "Multiclass classification of hemodynamic responses for performance improvement of functional near-infrared spectroscopy-based brain-computer interface," *Journal of biomedical optics*, vol. 19, no. 6, p. 067009, Jun 2014, doi: 10.1117/1.JBO.19.6.067009.
- [44] M. Stangl, G. Bauernfeind, J. Kurzmann, R. Scherer, and C. Neuper, "A Haemodynamic Brain-Computer Interface Based on Real-Time Classification of near Infrared Spectroscopy Signals during Motor Imagery and Mental Arithmetic," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 21, no. 3, pp. 157-171, 2013/06/01 2013, doi: 10.1255/jnirs.1048.
- [45] R. Zimmermann *et al.*, "Detection of motor execution using a hybrid fNIRS-biosignal BCI: a feasibility study," *J Neuroeng Rehabil*, vol. 10, p. 4, Jan 21 2013, doi: 10.1186/1743-0003-10-4.
- [46] K. S. Hong, N. Naseer, and Y. H. Kim, "Classification of prefrontal and motor cortex signals for three-class fNIRS-BCI," *Neurosci Lett*, vol. 587, pp. 87-92, Feb 5 2015, doi: 10.1016/j.neulet.2014.12.029.

- [47] P. Ortega and A. Faisal, "HemCNN: Deep Learning enables decoding of fNIRS cortical signals in hand grip motor tasks," in *2021 10th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, 4-6 May 2021, pp. 718-721, doi: 10.1109/NER49283.2021.9441323.
- [48] G. Derosiere, F. Alexandre, N. Bourdillon, K. Mandrick, T. E. Ward, and S. Perrey, "Similar scaling of contralateral and ipsilateral cortical responses during graded unimanual force generation," *Neuroimage*, vol. 85 Pt 1, pp. 471-7, Jan 15 2014, doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.02.006.
- [49] A. Abdalmalak *et al.*, "Assessing Time-Resolved fNIRS for Brain-Computer Interface Applications of Mental Communication," *Front Neurosci*, vol. 14, p. 105, 2020, doi: 10.3389/fnins.2020.00105.



# Automatic Detection of Mild Cognitive Impairment from EEG Recordings Using Discrete Wavelet Transform Leader and Ensemble Learning Methods

Afrah SAID<sup>1\*</sup>, Hanife GÖKER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dumlupınar University, Electrical-Electronics Engineering Department, [afrah.said@ogr.dpu.edu.tr](mailto:afrah.said@ogr.dpu.edu.tr), Orcid No: 0000-0003-1016-6429.

<sup>2</sup> Gazi University, Health Services Vocational College, [gokerhanife@gazi.edu.tr](mailto:gokerhanife@gazi.edu.tr), Orcid No: 0000-0003-0396-7885.

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 31 December 2022

Received in revised form 23

February 2023

Accepted 3 March 2023

Available online 23 March 2023

### Keywords:

*Discrete wavelet transform leader, EEG, ensemble learning, MCI, automatic detection*

## ABSTRACT

Mild Cognitive Impairment (MCI) is a risk of cognitive decline, commonly referred to as a transitional stage between normal cognition and dementia. Patients with MCI typically progress to Alzheimer's disease (AD), which causes cognitive deficits such as deterioration of their thinking abilities. This study aims to detect MCI patients using electroencephalography (EEG) signals. The EEG dataset used in this study consists of EEG signals recorded from 18 MCI and 16 control groups. Firstly, EEG signals were denoised using multiscale principal component analysis (multiscale PCA). Then, 36 features were extracted from the EEG signals using the discrete wavelet transform leader (DWT leader) feature extraction method. Finally, using the extracted feature vectors, control groups, and MCI groups were classified by ensemble learning algorithms. As a result, AdaBoostM1 algorithm gained the highest performance with 93.50% accuracy, 93.27% sensitivity, 93.75% specificity, 94.38% precision, 93.82% f1-score, and 86.97% Matthews correlation coefficient (MCC). By achieving quite satisfactory accuracy, this study proves that the ensemble learning algorithm can also be used for MCI detection.

Doi: 10.24012/dumf.1227520

\* Corresponding author

## Introduction

MCI is a stage between normal brain aging and dementia. It is a condition in which patients have a decline in short-term memory, along with forgetfulness about recent events. However, without obvious impairment in everyday functioning [1-2]. Age-related diseases are becoming more common around the world as a result of the progressive increase in lifespans. The most popular among age-related diseases are the MCI and AD. MCI is the early stage of dementia that could also be referred to the "mild cognitive disorder" classification category under the International Classification of Diseases by the World Health Organization [3-4].

Patients with MCI typically develop AD and those patients normally experience problems with motor, cognitive, and behavioral symptoms. Furthermore, they face difficulties in adapting to changes and external stressors. Consequently, this could lead them to a need for a caregiver due to their behavioral disturbances [5]. Therefore, MCI is a crucial step for the early identification of AD. This is because patients with MCI are more likely to develop AD than those without MCI. For that reason, early diagnosis will help patient selection for upcoming clinical trials. It will also motivate the patients to implement a new lifestyle. Furthermore, it

can assist the patient's family and the patients themselves in considering financial planning for future care needs. This is because MCI rates are increasing rapidly with 5% of the general population and around 15% developing dementia each year [3, 6-7].

For the detection of MCI, patients are generally checked in medical care using magnetic resonance imaging. This method is cost-effective and less effective in the early detection of MCI as its performance is limited to the late stage of dementia. Another technique used is positron emission tomography which is the most popular neuroimaging technique for diagnosing dementia. This method can show the presence of the amyloid protein, a protein in the brain that is associated with dementia, and neurometabolic abnormalities in the brain. However, this diagnosis requires special equipment which is expensive to perform. Moreover, it involves exposure to radiation which is harmful [2]. To avoid the expensive common diagnosis techniques mentioned above, recently, researchers are developing predictive modeling techniques. This is done by using the information of the brain activity of the patient, collected from EEG devices. Moreover, machine learning methods are also used due to their efficiency and low cost for the detection of MCI and AD.

Various investigations have been carried out for the early diagnosis of MCI. Kashfpoor et.al (2019) developed a new supervised dictionary-learning model called Correlation-based Label Consistent. This method is based on the analysis of the EEG signals using k-means and the singular value decomposition method. First, they extracted spectral features from the EEG signals applied frequency and time domains. After that, they started voting between the labels to have a final label for all the channels of each EEG signal. As a result, they achieved an accuracy of 88.9% [8]. Alvi et.al (2022) proposed a Long Short-Term Memory (LSTM) based framework for the early detection of MCI from EEG signals. To conclude their model performance, they designed 20 different LSTM models with 5-fold cross-validation and as a result, they achieved an accuracy of 91.41% [9]. Jamaloo et.al (2020) investigated the frequency bands of the EEG signals to distinguish between MCI and healthy subjects using hidden markov model. A model with hidden states. Firstly, they divided the EEG signals into 5 based on standard frequency bands, the delta (0.5–4 Hz), theta (4–8 Hz), alpha (8–12 Hz), beta (12–25 Hz), and gamma (25–35 Hz). After that, using leave one out cross-validation method, they divided them into train, test, and validation sets. As a result, they have seen and concluded that the alpha and gamma frequency bands produced the highest classification accuracy with  $95.9 \pm 0.4$  alpha and  $97.2 \pm 0.5$  Gamma [10].

Different from the above studies, a new model was proposed using ensemble learning algorithms that detect MCI patients using EEG signals. The accomplishments of this article are listed below.

- MCI and healthy subjects were classified with ensemble learning algorithms using feature vectors of the EEG signals that were extracted using the DWT leader feature extraction method.
- The best performance model was chosen after evaluating all the ensemble learning algorithms models.
- As a result, the proposed model was able to enhance classification accuracy.

## Material and Method

### Proposed Method

This study is carried out by first capturing the EEG signals of the subjects using an EEG cap. Then the EEG signals of each of the subjects were segmented into three parts of 10 minutes each. After the segmentation process, the EEG signals were explored using Multiscale PCA. This is because it looks for the subspaces that maximize the sum of all squared pairwise distances between data projections [11]. Then DWT leader feature extraction method has been used to extract the feature vectors of the EEG signals. Subsequently, 36 features were extracted using the DWT leader.

After that, ensemble learning algorithms such as bagging, AdaboostM1, Gentle Boost, Logit Boost, LP Boost, Robust Boost, RUS Boost, and Total Boost ensemble learning algorithms were used. These algorithms have been used to classify the subjects using the spectral feature vectors that have been extracted in the feature extraction step. After

classifying them, the performances of all the algorithms are analyzed to examine the algorithm with the highest performance. As well as to reach a conclusion of which algorithm was efficient in detecting MCI. Moreover, the implementation steps of the proposed model are shown in Figure 1.

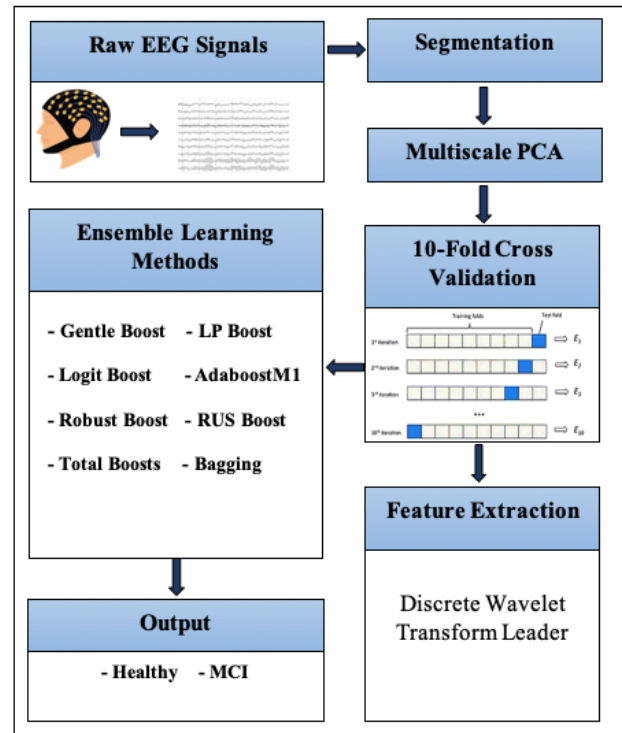


Figure 1: The implementation steps of the proposed model.

### Dataset

To conduct this study, a dataset that is publicly available on the internet that consists of EEG signals from 34 subjects (16 control and 18 MCI) has been used [8]. Where each participant had at least completed their upper or elementary education, and their ages ranged from 40 to 77. Each participant's EEG was continuously recorded for 30 minutes with a skin-electrode impedance of less than 5k and a 256 sampling rate. In addition to 19 electrodes positioned according to the 10-20 International System (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, and O2). Moreover, Mini-Mental State Examination (MMSE) tests were also conducted. Considering the score of MMSE between 21 and 26 as an MCI patient and scores greater than that being healthy. Additionally, the study process of the EEG signals has gained ethical approval from Isfahan University of Medical Sciences' deputy for research and technology. Moreover, written consent was taken from the participants concerning the description of the study procedure [8]. Figure 2 depicts electrode positioning for the international 10-20 system.

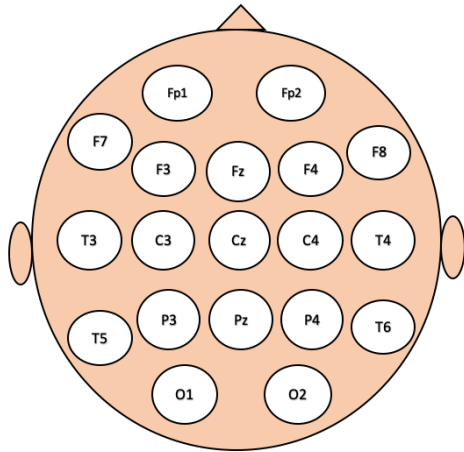


Figure 2: International 10-20 system electrode placement system.

### Segmentation Process and Multiscale PCA

In the segmentation process, each of the 34 participants of the EEG recordings consists of 30 minutes with 256 sampling rates. Meaning that there are 19 electrodes with 460800 (256 x 60 x 30) rows for each participant. Therefore, processing this enormous dataset requires computational support and requires an expense of time. For that reason, we have segmented each of the recordings into three segments where each segment consisting of 10 minutes. As a result, there are 3 segments for each subject and a total of 102 segments is produced with a size of 153600 (256 Hz x 60 seconds x 10 minutes) samples x 19 channels. Correspondingly the total number of the dataset is 1938 (3 segments x 34 subjects x 19 channels). The segmentation process was carried out to increase the number of dataset data so that the developed dataset can be practical and computationally efficient. Moreover, the dataset is segmented to restore the spectral and temporal characteristics of EEG. Furthermore, to prevent data loss when feature extraction is performed on the EEG signal which has a very large length [12-13]. EEG signals are nonstationary and this means that they are vulnerable to noises. Therefore, there must be a method to eliminate or reduce the noise from the signals. This can be done using de-noising methods such as band-pass filtering and PCA. However, the use of the filtering technique depends on the nature of the signals. Accordingly, in this study as the signals are based on wavelets, multiscale PCA was used. After segmenting the dataset, the multiscale PCA was used which is the combination of potential PCA and orthonormal wavelets. The orthonormal wavelets are responsible for splitting the stochastic processes and the PCA for extracting the relationship between multiple variables [12].

### K-Fold Cross Validation

For the division of the dataset into training and test sets, the k-fold cross-validation method has been used. K-fold cross-validation is a technique to evaluate the results produced by the model by dividing the dataset into a training set to train the model and a testing set to evaluate it [14]. It is used to achieve an unbiased estimate of the model performance by dividing the dataset into k subsets of equal size. Therefore,

building models k times and every time removing out one of the subsets from the training set and then using it as the test set. It is also used to minimize errors in the model [15]. The characteristics of the dataset are shown in Table 1.

Table 1. The characteristics of the dataset.

Class	Number of subjects	Total number of datasets
MCI	18	1026
Healthy	16	912
Total	34 subjects x 19 channels x 3 segments =	1938

### Discrete Wavelet Transform Leader (DWT Leader) Feature Extraction

Feature extraction methods are used to minimize irrelevant features. Thereby only extracting the important features from the EEG signals to increase the performance of the classification model and avoid overfitting of the data which could happen without feature extraction [16-17]. EEG signals are non-stationary and obtaining frequency information during brain activity is a challenging process. This is due to electromagnetic interference between the oscillators' high frequency and the low frequency produced by eye blinks. Thus, classifying the raw signals eventually affects the accuracy of the model [16]. Therefore, in this study DWT leader feature extraction method was used to extract the most important features and to estimate the singularity of the spectrum. Wavelet transform is used for time-frequency analysis. Whereas, DWT is a feature extraction method that analyzes the signal with different resolutions by breaking down the approximation and detailed coefficient signals in different frequency bands. When resolving high-frequency components in a minor window, the DWT method requires large time windows to solve low-frequency components. Because the signal consists of both low and high frequency components it attempts to provide the best resolution in terms of both time and frequency [18]. Recently, a new form called DWT leader was built from DWT by Jaffard and his co-workers. DWT leader is a method that works well with non-stationary and non-linear signals [19]. DWT leader is the local supremum of the wavelet coefficient of the signal. This method was introduced to improve the usual wavelet methods. This method uses wavelet analysis to estimate the multifractal spectrum which is a tool for the analysis of fluctuations. Given that it describes the unique behavior of a signal. The DWT is an effective time-frequency analysis tool and its wavelet coefficients are suitable measurements to examine its regularity. However, its drawback is that it fails for signals with fluctuating singularities. The wavelet leader method fixed that drawback. Moreover, DWT leader has low computational complexity and offers robust and fast estimation. Furthermore, it performs better and is more effective than DWT at capturing oscillating signals [20-23]. The DWT of a signal  $X(t)$  is shown in equation 1, whereas the local supremum of the wavelet coefficients in the dyadic cube is known as the DWT leader and it is shown in equation 2 [19].

$$d_x(j, k) = \int_R X(t)2^{-j}\psi(2^{-j}t - k)dt \quad (1)$$

$$L_x(j, k) = \sup_{\lambda' \in \Gamma} |d_{x,\lambda}| \quad (2)$$

Whereas,  $\lambda$  is the dyadic interval and the  $\Gamma$  is the dyadic cube and their equations are as follows [19].

$$\lambda = [k. 2^j, (k + 1)2^j] \quad (3)$$

$$\Gamma = 3\lambda = \lambda_{jk-1} \cup \lambda_{jk} \cup \lambda_{jk+1} \quad (4)$$

In this study, using the DWT leader as a feature extraction method, 36 features were extracted from the EEG signals.

### Ensemble Learning Classification Algorithms

Ensemble learning is referred to as multiple classifier systems where multiple learners are trained and combined to address a learning problem [24]. Ensemble learning helps improve model performance. It is the most well-known and comprehensive machine learning field. This is due to its better performance than machine learning algorithms [25]. The framework of the ensemble learning method works by first training a group of learners individually. Then merging them through some strategies thereby gaining high performance. Whereas the reason behind its high performance is that, the generalization ability of an ensemble group of learners is stronger than that of an individual learner [24].

### Boosting

Boosting algorithms begin their process by first training a base learner and then modifying the distribution of the training samples. This depends on the base learner's performance so that samples that were mistakenly classified would be given more focus by subsequent base learners. The training sample distribution is again modified once the second base learner has been trained using the first base learner's adjusted training samples. Moreover, the process is repeated again and again until a certain number of base learner's "T" has been reached. As a result, the base learners are combined and weighted [24]. AdaBoost is the most popular boosting algorithm where the additive model boosting equation is shown in equation (5).

$$H(x) = \sum_{t=1}^T \alpha_t h_t(x) \quad (5)$$

Where  $\alpha_t$  is the target  $t$ ,  $h_t(x)$  is the chosen base learner at each stage to minimize the loss function [24].

### Bagging

Bagging is an effective and useful ensemble learning algorithm used in classification and regression models [26]. It generates sampling subsets by randomly picking and copying one sample from the original dataset to the sampling subset. Then the process is repeated several times. Then using those subsets, the base classifiers are trained and

combined, where the training of the basic algorithm is performed in a parallel way [24, 26]. The combining method uses the simple voting approach for classification problems. While for regression tasks, it uses the simple averaging method. The equation of the bagging algorithm is shown in equation (6).

$$H^{ob}(x) = \underset{y \in Y}{arg \ arg \ max} \sum_{t=1}^T |(h_t(x) = y)| \quad (6)$$

$$|(x \notin D_t)$$

Where,  $D_t$  represents the set of samples used by the learner  $h_t$ , and  $H^{ob}(x)$  represents the prediction of sample  $x$  of out-of-bag. Thereby, only taking into consideration of the predictions made by base classifiers that did not use the sample  $x$  for training [24].

### Performance Evaluation Metrics

The efficiency of a model that is proposed for the classification depends on counting all the correct predictions that are made from all the predictions that were made [27]. Therefore, to assess how well the classification model performed at predicting whether the subject had MCI or not, performance evaluation metrics using confusion matrix parameters were used and their equations are shown below. Where TP, FN, FP, and TN stand for True Positive, False Negative, False Positive, and True Negative respectively. Moreover, the values of TP and TN represent how many samples were correctly identified whereas the values of FP and FN represent how many samples were misclassified.

$$\text{Precision (Prec)} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FP}) \quad (7)$$

$$\text{Accuracy (ACC)} = (\text{TP} + \text{TN})/(\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}) \quad (8)$$

$$\text{Sensitivity (Sens)} = \text{TP rate} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FN}) \quad (9)$$

$$\text{Specificity (Spec)} = \text{TN rate} = \text{TN}/(\text{TN} + \text{FP}) \quad (10)$$

$$\text{F1-score} = 2\text{TP}/(2\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (11)$$

$$\text{MCC} = \frac{(\text{TN} \times \text{TP} - \text{FP} \times \text{FN})}{\sqrt{(\text{TN} + \text{FN}) \times (\text{FP} + \text{TP}) \times (\text{TN} + \text{FP}) \times (\text{FN} + \text{TP})}} \quad (12)$$

### Experimental Results and Discussion

After segmenting the dataset of the 34 participants into 3 segments, a total of 1938 (3 segments x 34 subjects x 19 channels) datasets were generated. Then using multiscale PCA the signals were explored and important features were extracted from the signals by the DWT leader. Following the next step is the dataset division. The dataset was divided using the k-fold cross-validation method. Where  $k=10$ , meaning one-tenth for testing and the rest for training the model. Thus, repeating the process ten times, each time using a different tenth for testing. After dividing the dataset, the model was trained with the training set and tested with the testing set. Then ensemble learning algorithms were used to classify the MCI subjects from the healthy subjects.

To check whether the classification of the subjects was accurately classified or not, confusion matrix parameters of ensemble learning algorithms such as bagging, AdaboostM1, Gentle Boost, Logit Boost, LP Boost, Robust Boost, RUS Boost, and Total Boost were calculated and the outcome of each algorithm is shown in Table2.

Table 2. Confusion matrix parameters of Ensemble Learning methods.

Ensemble Learning Methods	TN	FN	FP	TP	TP+TN	FP+FN
Bagging	857	207	55	819	1676	262
AdaboostM1	855	69	57	957	1812	126
Gentle Boost	841	191	71	835	1676	262
Logit Boost	791	154	121	872	1663	275
LP Boost	841	305	71	721	1562	376
Robust Boost	797	193	115	833	1630	308
RUS Boost	791	184	121	842	1633	305
Total Boost	752	153	160	873	1625	313

After analyzing the confusion matrix parameters of the ensemble learning algorithms that are shown in Table 2, it is seen that the AdaboostM1 algorithm has the highest proportion of correctly classified samples with 1812 and 126 inaccurately classified samples. Moreover, to evaluate the performance of the algorithms they were assessed with the evaluation performance metrics namely, sensitivity, specificity, precision, f1-score, MCC, and accuracy, and their values are shown in Table 3.

Table 3. Performance evaluation metrics of Ensemble Learning methods.

Ensemble Learning Methods	Sens.	Spec.	Prec.	F1-score	MCC	ACC
Bagging	79.82	93.97	93.71	86.21	74.02	86.48
AdaboostM1	93.27	93.75	94.38	93.82	86.97	93.50
Gentle Boost	81.38	92.21	92.16	86.44	73.63	86.48
Logit Boost	84.99	86.73	87.81	86.38	71.62	85.81
LP Boost	70.27	92.21	91.04	79.32	63.45	80.60
Robust Boost	81.19	87.39	87.87	84.40	68.48	84.11
RUS Boost	82.07	86.73	87.44	84.67	68.68	84.26
Total Boost	85.09	82.46	84.51	84.80	67.57	83.85

Table 3 was examined to check the best performance among the ensemble learning algorithms based on their accuracy value. After examining their accuracy, it is seen that the AdaboostM1 algorithm had the highest accuracy with 93.50%. Stating that the AdaboostM1 algorithm was the best algorithm for classifying MCI from healthy ones among the other algorithms. In Figure 3, the accuracy values of ensemble learning methods are given.

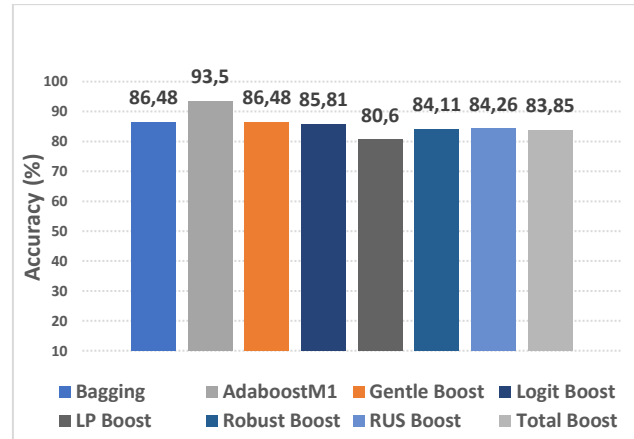


Figure 3: Accuracy performance of the classification algorithms.

AdaboostM1 algorithm had the highest accuracy (93.50%) among the other algorithms. The reason why AdaboostM1 gained the highest accuracy among the rest of the algorithms is due to its higher prediction accuracy. The AdaboostM1 algorithm is a powered variant of the Adaboost algorithm. AdaboostM1 improves the performance of classifiers for less classification errors. Also, the advantages of AdaboostM1 over other ensemble learning algorithms are its strong theoretical foundation, simplicity in implementation, high prediction accuracy, and overfit protection by training on small subdivisions of training data and weighted training data. In addition, AdaboostM1 employs an exponential loss function and provides the ability to identify complex composite classifiers from small amounts of data [28-29]. Given the benefits listed above regarding the AdaBoostM1 algorithm, it is preserved to be the best classifying algorithm for the detection of MCI. Moreover, previous studies based on MCI detection using EEG signals were compared with this study and this is shown in Table 4.

Table 4. A comparative analysis with relevant literature studies.

Study	Signal Processing	Subjects	Best Classifier	ACC
Ruiz-Gómez et al. [30]	Spectral and non-linear analyses	37 AD, 37 MCI, 37 healthy	MLP	78.43%
Poza et.al [31]	RP and SF	19 MCI, 37 AD, 29 healthy	LDA	79.2%
Hadiyoso & Tati [32]	Hjorth Descriptor	5 healthy, 5 MCI	KNN	80.00%
Hadiyoso et al. [33]	Linear QEEG based power spectral features	16 healthy, 11 MCI	KNN	81.5%
Kashefpoor et al. [34]	Spectral features	16 healthy, 11 MCI	NF with KNN	88.89%
Proposed model	DWT leader	16 healthy, 18 MCI	Adaboost M1	93.50%

RP: Relative power; SF: Spectral flux; NF: Neuro fuzzy; MLP: Multi-layer perceptron; KNN: K-nearest neighbors.



Several studies explored the detection of MCI using different methods, five of them are mentioned in this study for comparison. The study of Ruiz-Gómez et.al proposed a model using three different classification models with spectral analyses and non-linear analyses for the extraction of spectral features from the EEG signals. As a result, they have maintained to achieve an accuracy of 78.43% with the MLP model. The study of Poza et.al developed a model using LDA with RP to analyze the conventional EEG frequency bands and SF to explore the Spatio-temporal fluctuations. As a result of their research, they attained 79.2% accuracy. The studies of [33] and [34] used the same dataset that is used in this study. However, the study of [33] used a different technique for the signal processing of the EEG signals by using linear QEEG based power spectral features. However, the study of [32] used small dataset that consist of only 10 subjects, with 17 subjects less than that of study [33], [34], and 24 subjects less than that of this study. Besides that, they used a hjorth descriptor for their signal processing and they also used the same classifier that used study [33], the KNN classifier. However, the study of [33] gained a higher accuracy than the study of [32] with an accuracy of 81.5%, 1.5% greater than that of [32]. While the study of [34] used spectral features for signal processing as in this study. However, they have extracted 19 spectral features from each of the 19 channels for each of the participants. After that, they classified them using the NF system with the KNN classifier, thereby achieving an accuracy of 88.89%. The study of [30] and [31] used a different dataset than the dataset used in this study and study [32], [33], and [34]. Moreover, the number of their subjects is quite higher than the number of the subjects of this study and the study of [32], [33], and [34]. With the comparison of previous studies using the same dataset and using a different dataset, it is clear that this study outperformed all these works and maintained to achieve an accuracy of 93.50%. The cause behind the high accuracy is the employment of ensemble learning algorithms. This is because ensemble learning algorithms improve model performance by independently training a group classifier. After that, it combines them using specific techniques, which is why it outperforms machine learning algorithms.

## CONCLUSION

To conclude, an ensemble learning-based model has been proposed with DWT leader as a feature extraction method to extract the feature vectors of the EEG signals. After that, we classified them using ensemble learning algorithms, namely Bagging, AdaboostM1, Gentle Boost, Logit Boost, LP Boost, Robust Boost, RUS Boost, and Total Boost. The confusion matrix parameters of the ensemble learning classification algorithms were calculated. The performance results of the ensemble learning algorithms were compared with performance evaluation metrics. As a result of the comparison, it is noticed that the AdaboostM1 algorithm gained the highest accuracy among them. It has achieved an accuracy of 93.50%, 93.27% sensitivity, 93.75% specificity, 94.38% precision, 93.82% f1-score, and 86.97% MCC. Using ensemble learning algorithms with DWT leader, we have developed a new model that can be

used for the detection of MCI. This model also demonstrates that the ensemble learning algorithm can be used to detect MCI and gain quite a high accuracy. Moreover, this finding suggests that an ensemble learning algorithm-based model can help physicians to differentiate MCI from healthy groups.

## Ethics committee approval

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

## Conflict of Interest Statement

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

## References

- [1] Y. Tao, Y. Han, L. Yu, Q. Wang, S.X. Leng, and H. Zhang, "The predicted key molecules, functions, and pathways that bridge mild cognitive impairment (MCI) and Alzheimer's disease (AD)," *Frontiers in Neurology*, vol. 11, p. 233, 2020.
- [2] S. J. Lim, Z. Lee, L. N. Kwon, and H. W. Chun, "Medical health records-based Mild Cognitive Impairment (MCI) prediction for effective dementia care," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 17, p. 9223, 2021.
- [3] M. N. Sabbagh, M. Boada, S. Borson, M. Chilukuri, P. M. Doraiswamy, B. Dubois, and H. Hampel, "Rationale for early diagnosis of mild cognitive impairment (MCI) supported by emerging digital technologies," *The Journal of Prevention of Alzheimer's Disease*, vol. 7, no.3, pp. 158-164, 2020.
- [4] N. T. Lautenschlager, K. L. Cox, and K. A. Ellis, "Physical activity for cognitive health: what advice can we give to older adults with subjective cognitive decline and mild cognitive impairment?" *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 2022.
- [5] R. Baschi, A. Luca, A. Nicoletti, M. Caccamo, C. E. Cicero, C. D'Agate, and R. Monastero, "Changes in motor, cognitive, and behavioral symptoms in Parkinson's disease and mild cognitive impairment during the COVID-19 lockdown," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 11, p. 590134, 2020.
- [6] M. Maruta, H. Makizako, Y. Ikeda, H. Miyata, A. Nakamura, G. Han, and T. Tabira, "Association between apathy and satisfaction with meaningful activities in older adults with mild cognitive impairment: A population-based cross-sectional study," *International Journal of Geriatric Psychiatry*, vol. 36, no.7, pp. 1065-1074, 2021.
- [7] K. Ritchie, "Mild cognitive impairment: an epidemiological perspective," *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 2022.
- [8] M. Kashefpoor, H. Rabbani, and M. Berekatain, "Supervised dictionary learning of EEG signals for

- mild cognitive impairment diagnosis,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 53, p. 101559, 2019.
- [9] A. M. Alvi, S. Siuly, H. Wang, K. Wang, and F. Whittaker, “A deep learning based framework for diagnosis of mild cognitive impairment,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 248, p. 108815, 2022.
- [10] F. Jamaloo, M. Mikaeili, and M. Noroozian, “Multi metric functional connectivity analysis based on continuous hidden Markov model with application in early diagnosis of Alzheimer’s disease,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 61, p. 102056, 2020.
- [11] E. Andries, and R. Nikzad-Langerodi, “Dual-Constrained and Primal-Constrained principal component analysis,” *Journal of Chemometrics*, e3403, 2022.
- [12] J. Kevric, and A. Subasi, “The effect of multiscale PCA de-noising in epileptic seizure detection,” *Journal of Medical Systems*, vol. 38, no. 10, pp. 1-13, 2014.
- [13] H. Zhang, M. Zhao, C. Wei, D. Mantini, Z. Li, and Q. Liu, “EEGdenoiseNet: A benchmark dataset for deep learning solutions of EEG denoising,” *Journal of Neural Engineering*, vol. 18, no. 5, p. 056057, 2021.
- [14] D. K. Barrow, and S. F. Crone, “Crogging (cross-validation aggregation) for forecasting—A novel algorithm of neural network ensembles on time series subsamples,” *IEEE proceedings of 2013 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2013, pp. 1-8.
- [15] H. L. Vu, K. T. W. Ng, A. Richter, and C. An, “Analysis of input set characteristics and variances on k-fold cross validation for a Recurrent Neural Network model on waste disposal rate estimation,” *Journal of Environmental Management*, vol. 311, p. 114869, 2022.
- [16] A. Al-Qerem, F. Kharbat, S. Nashwan, S. Ashraf, and K. Blaou, “General model for best feature extraction of EEG using discrete wavelet transform wavelet family and differential evolution,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 16, no. 3, p. 1550147720911009, 2020.
- [17] S. H. Syed, and V. Muralidharan, “Feature extraction using Discrete Wavelet Transform for fault classification of planetary gearbox—A comparative study,” *Applied Acoustics*, vol. 188, p. 108572, 2022.
- [18] M. Ustundag, “A novel analog modulation classification: discrete wavelet transform-extreme learning machine (DWT-ELM),” *Bitlis Eren University Journal of Science*, vol. 10, no. 2, pp. 492-506, 2021.
- [19] D. Benouioua, D. Candusso, F. Harel, and L. Oukhellou, “Multifractal analysis of stack voltage based on wavelet leaders: A new tool for PEMFC diagnosis,” *Fuel Cells*, vol. 17, no. 2, pp. 217-224, 2017.
- [20] E. Serrano, and A. Figliola, “Wavelet leaders: a new method to estimate the multifractal singularity spectra,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol.388, no.14, pp. 2793-2805, 2009.
- [21] R. F. Leonarduzzi, G. Schlotthauer, and M. E. Torres, “Wavelet leader based multifractal analysis of heart rate variability during myocardial ischaemia,” *In 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 2010, pp. 110-113.
- [22] K. Gadhomi, D. Do, F. Badilini, M. M. Pelter, and X. Hu, “Wavelet leader multifractal analysis of heart rate variability in atrial fibrillation,” *Journal of Electrocardiology*, vol. 51, no. 6, pp. S83-S87, 2018.
- [23] Z. Tan, and J. Chen, “Detecting stock market turning points using wavelet leaders method,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 565, p. 125560, 2021.
- [24] Z. H. Zhou, “Ensemble learning,” *In Machine learning*, Singapore: Springer, 2021, pp. 181-210. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1967-3\\_8#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1967-3_8#citeas)
- [25] A. A. ABRO, “Vote-based: Ensemble approach,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 25, no. 3, pp. 858-866, 2021.
- [26] R. Salam, and A. R. M. T. Islam, “Potential of RT, Bagging and RS ensemble learning algorithms for reference evapotranspiration prediction using climatic data-limited humid region in Bangladesh,” *Journal of Hydrology*, vol. 590, p. 125241, 2020.
- [27] A. Saday, and I. A. Ozkan, “Classification of epileptic EEG signals using DWT-based feature extraction and machine learning methods,” *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, vol. 9, no. 4, pp. 122-129, 2021.
- [28] P. Chen, and C. Pan, “Diabetes classification model based on boosting algorithms,” *BMC Bioinformatics*, vol. 19, pp.1-9, 2018.
- [29] S. Krishnaveni, and M. Hemalatha, “A perspective analysis of traffic accident using data mining techniques,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 23, no. 7, pp. 40-48, 2011.
- [30] S. J. Ruiz-Gómez, C. Gómez, J. Poza, G. C. Gutiérrez-Tobal, M. A. Tola-Arribas, M. Cano, and R. Hornero, “Automated multiclass classification of spontaneous EEG activity in Alzheimer’s disease and mild cognitive impairment,” *Entropy*, vol. 20, no. 1, p. 35, 2018.
- [31] J. Poza, C. Gomez, M. Garcia, M. A Tola-Arribas, A. Carreres, M. Cano, and R. Hornero, “Spatio-temporal fluctuations of neural dynamics in mild cognitive

- impairment and Alzheimer's disease," *Current Alzheimer Research*, vol. 14, no. 9, pp. 924-936, 2017.
- [32] S. Hadiyoso, and L. E. Tati, "Mild Cognitive Impairment Classification using Hjorth Descriptor Based on EEG Signal," *In 2018 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, 2018, pp. 231-234.
- [33] S. Hadiyoso, C. L. F. A. R. Cynthia, M. T. L. ER, and H. Zakaria, "Early detection of mild cognitive impairment using quantitative analysis of EEG signals," *IEEE proceedings of 2019 2nd International Conference on Bioinformatics, Biotechnology and Biomedical Engineering (BioMIC)-Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2019, pp. 1-5.
- [34] M. Kashefpoor, H. Rabbani, and M. Barekatin, "Automatic diagnosis of mild cognitive impairment using electroencephalogram spectral features," *Journal of Medical Signals and Sensors*, vol. 6, no. 1, p. 25, 2016.



# Maximum Power Control and Optimization of Switched Reluctance Generators for Wind Turbines

Gökhan PARLA<sup>1</sup>, Merve YILDIRIM<sup>2\*</sup>, Mehmet ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, gokhan.parla@gmail.com, Orcid No: 0000-0002-1525-5108

<sup>2</sup> Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, merveyildirim@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-1284-7324

<sup>3</sup> Firat University, Electrical-Electronics Engineering Department, mozdemir@firat.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-1178-060X

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 10 January 2023  
Received in revised form 28  
January 2023  
Accepted 1 February 2023  
Available online 23 March 2023

### Keywords:

*Asymmetric bridge type converter,  
maximum power point tracking,  
optimization, switched reluctance  
generator, wind power plant.*

Doi: 10.24012/dumf.1232026

\* Corresponding author

## ABSTRACT

In this paper, a maximum power control and optimization of a 4-phase 8/6-pole Switched Reluctance Generator (SRG) are realized for a wind energy conversion system by using MATLAB/Simulink. Unlike conventional generators, using of the SRGs has increased in variable speed wind turbines due to important advantages such as lower copper losses, simple structure, flexible control, and a good performance in a wide speed range. However, since SRGs work with switching logic, their torque production is fluctuating and optimum turn-on/turn-off angles of the phases must be determined to work as a generator. Therefore, in this study, these angles are optimized based on the speed of the SRG and Maximum Power Point Tracking (MPPT) is realized. Besides, a voltage control is provided by keeping the DC bus voltage at the output of the system constant at the desired value with the help of a chopper controlled unloader. The results obtained from the optimized model for variable wind speed conditions are compared with that of the unoptimized model. It is observed that the SRGs can work more stable with a proper optimization method and the power obtained from the system follows the maximum output power.

## Introduction

With the rapidly developing technology and increasing world population, the demand for the electrical energy continues to increase day by day. Therefore, renewable energy sources have gained more importance. These can be classified as wind energy, hydroelectric, solar energy, biomass, and geothermal. Today, approximately 30% of the energy consumed worldwide is met by using renewable energy sources, and 17% of this is energy obtained from the wind [1].

In Wind Power Plants (WPP) which have an important share in terms of the energy production, obtaining maximum output power at variable wind speeds is the most important factor in terms of the efficiency. Switched Reluctance Generators (SRG), which have been increasingly used in these power plants, come to the fore with their significant features such as providing flexibility in the control under variable speed conditions and operating in a wide speed range, lower copper losses because of without windings in the rotors, simple structure, flexible control [2-5]. However, torque ripple is occurred in the SRGs due to working as switching logic. Therefore, switching angles of the phases must be set optimally to work as a generator. Determining right optimization techniques will increase the use of the SRGs in the WPPs.

The power of a wind turbine depends on the mass and rotational speed. To obtain the maximum power from the wind turbine, optimal tip speed ratio should be set [3]. Therefore, there are three common MPPT methods in the literature which are Perturb and Observe (P&O), Power Signal Feedback (PSF), and Tip Speed Ratio (TSR). In this paper, TSR method is used. This control method is based on the principle of controlling the shaft speed to maintain the optimum value of the blade tip speed ratio at any wind speed. The reference shaft speed value obtained from the wind speed is compared with the instantaneous shaft speed value and sent to the controller. With the help of the power electronics circuit, the switching process is performed so that the instantaneous shaft speed reaches the required reference shaft speed value.

In the literature, the studies realized on this field are examined in detail. First of all [6] presents an output power optimization method of the SRG for the wind turbine applications. To obtain an optimal power generation, DC bus voltage level and phase voltage switching angles are taken as the control variables. For this reason, a Differential Evolution (DE) algorithm is used to determine the optimal control variables under multiple operating conditions. The proposed method is tested on a SRG prototype. It is observed that the DE algorithm is proper for the optimal power generation. In [7],

the performance of a SRG is optimized for variable speed wind generation systems. The parameters of a driver affect the power generation, torque ripples, and the losses. Therefore, optimal parameters of the SRG must be selected for the operation in a wide speed range. These are obtained by minimizing the cost functions in the realized simulations. The simulation results are validated by comparing the experimental results which are obtained from a wind turbine system. In another study [8], the control of an 8/6 pole SRG with four phases is realized. Torque ripple is minimized by using an Artificial Neural Network (ANN) algorithm. Besides, a new MPPT approach is proposed for the SRG by modifying the classical Hill Climb Searching technique. Thanks to this method, Total Harmonic Distortion is also reduced about 1.45% by utilizing a multi-level diode clamped inverter. A control of the SRG used in the wind power systems is carried out for variable speeds in [9, 10]. A simulation and real-time implementation of the SRG driver are realized by using MATLAB/Simulink and DS1103 Ace kit digital signal processor. The phases currents and output voltage curves of the SRG are examined in the simulations. The simulation results are validated by the experimental results. In [11], a maximum power control method is also proposed for the SRGs used in the wind turbines. To increase the efficiency of the SRG, the switching angle is optimized in the simulations. Then, the simulation results are tested on a 3 kw prototype SRG and the presented algorithm is validated by comparing with each other. Authors in [12, 13] examine the performance of the SRG in variable wind generation systems. Two Direct Power Controls (DPC) which are hysteresis of the SRG phase current for low speed and a single pulse of the current for the high speed operation moods are presented. The results of the DPCs are compared with the Sliding Mode (SM) and PI controllers. It is seen that commutation of the DPCs is occurred with a smooth transition and the operation of the SRGs can be a self-excited mode. The design and control of the SRG are explained to obtain maximum output power and decrease the torque ripple in [14-16]. Phase self-inductance, DC bus voltage, shaft speed, and the switching angles are the design and control parameters in the system. The output powers of 1 Hp and 3 kW generators are handled in the simulations. The switching control is realized by using the DPC and hysteresis control methods. By increasing the efficiency and reducing the torque ripple, the simulation results are validated by the experimental studies. In [17], three-phase SRG is developed for the wind power applications. The transient phase current and energy analyses of the SRG are examined. By setting the switching angles, the closed-loop output power control of the SRG is realized based on the fuzzy logic algorithm. The proposed method is tested on a 500 kW SRG prototype. It is observed that this control approach provides a good performance with 2.2% error. In [18-20], maximum power extraction is studied for a SRG used in the wind turbines by controlling the firing angles. In this studies, turn-on and turn-off angles are optimally set by using PSO and PI controller. By this approaches, high efficiency and power, low torque ripple are provided to verify the proposed approach, the simulation results are compared with the experimental results obtained from a prototype SRG.

As seen from the literature, there are many studies in the field of obtaining maximum output power in the WPPs where

conventional generators are used. However, the applications where the Switched Reluctance Machines (SRMs) are mostly operated as a motor are placed. Recently, the studies on the operation of the SRMs as a generator and their performance have also started to gain importance. Therefore, in this paper, a study on the WPP using a SRG which has an important share in the renewable energy sources in terms of the generation is realized. The SRG is preferred due to eliminating many disadvantages of traditional generators. An MPPT is carried out using the blade tip speed ratio method for a variable speed wind turbine system with 8/6 poles 4 phase SRG and a rated output power of 745 W. In addition to the significant advantages of the SRGs, there is a drawback which is the torque ripple. To solve this problem, an optimization of the SRG is also realized by determining optimum turn-on and turn-off angles. The results obtained from the optimized system are compared with that of the unoptimized system. It is observed that the optimized system works more stable for different wind speeds and follows the maximum output power with a great accuracy. Contrary to the studies in the literature used a lot of optimization methods such as the DE, SM, PI, DPC, and ANN, the power gain is also examined for different wind speeds by the proposed optimization method in this study. It is observed that the highest power gain is obtained as 35.45% for the 12.5 m/s wind speed. As a result, it has contributed to the literature on the widespread use of the SRGs in the WPPs by operating more efficiently and maximizing the output power of the WPPs produced using the SRG.

The paper consists of seven parts. Firstly, topology, inductance profile, power converter circuit of the SRGs are handled in Section 2. Then, control of the SRGs is defined in Section 3. The characteristics of a wind turbine are explained in Section 4. After that, power optimization and MATLAB/Simulink model of the SRG are carried out in Sections 4 and 5. The simulation results and discussions are given in Section 6. The general conclusions are explained in the last Section 7.

## Switched Reluctance Generators

### Topology

Switched Reluctance Generators (SRGs) are simple electrical machines since they have a stator and rotor with salient poles and only windings on the stator, there are no windings or permanent magnets on the rotor [21]. Due to significant properties of the SRGs such as simple structure, robustness, low manufacturing and maintenance costs, high performance and working in the variable speed range, they are a proper candidate for the wind applications [22, 23].

### Inductance profile of the SRGs

In the SRMs, as the number of the phases increases, the torque ripple decreases. However, this causes rising the number of solid-conductor elements in the driver circuit. Thus, the cost also increases. To determine the direction of the rotation at the time of acceleration and start by itself as a motor, the SRM must have at least three-phase and the number of stator and rotor poles must be different to accelerate. Hence, in this study, an 8/6 pole 4-phase SRG is preferred as a generator as seen in Fig. 1.

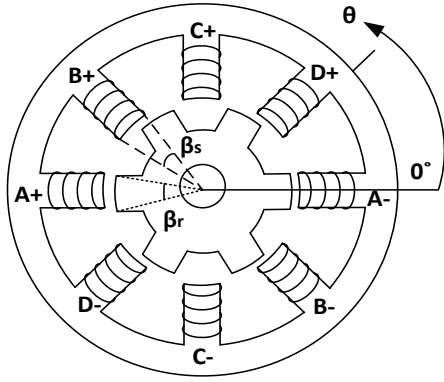


Figure 1. Four-phase 8/6 pole SRG

The variations of the phase inductance for the phase A of an 8/6 pole 4-phase SRG based on the rotor position and the phase currents are shown in Fig. 2.

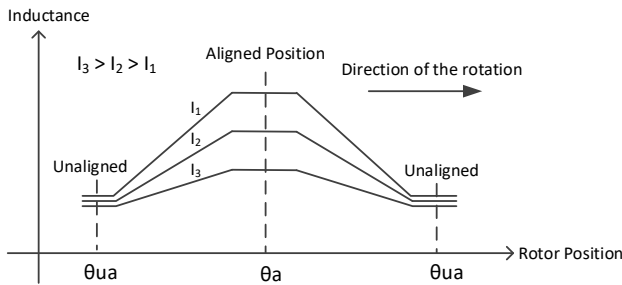


Figure 2. Variation of the phase A inductance of 8/6 pole 4 phase SRG according to the rotor position and phase current

As shown in the Fig. 2, the value of the phase inductance is the minimum in the unaligned position and it is the maximum when it approaches the aligned position. The phase inductance also changes based on the phase current. While the value of the inductance is the highest at the phase current  $I_1$ , it is the minimum at the phase current  $I_3$  due to the saturation.

### Power converter circuit for the SRG

In the operation of the SRGs, the phases of them must be energized sequentially and a driver must be used to ensure the current flowing from the phases based on the rotor position. In the literature, there are various driver circuits for the control of the SRGs. In this study, an Asymmetric Half Bridge (AHB) converter is preferred as shown in Fig. 3.

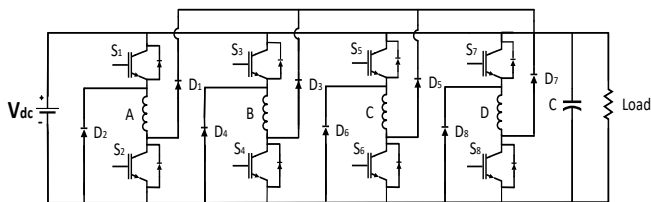


Figure 3. Asymmetric half bridge type converter structure of the 8/6 pole 4-phase SRG

In the AHB circuit, different switching modes of the SRG driver are shown for the phase A in the Fig. 4.

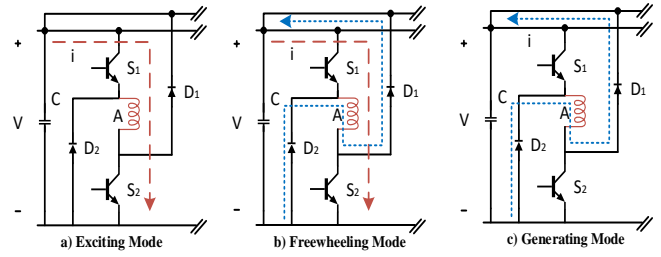


Figure 4. Different switching modes of the SRG driver for the phase A

As seen from the Fig. 4 (a), the exciting mode is a motor operation which is the positive torque region. In this mode, the current flows from the voltage source through the  $S_1$  and  $S_2$  switches and the inductance of the phase A ( $L_A$ ).  $D_1$  and  $D_2$  diodes are off. In Fig. 4 (b) which is the freewheeling mode, only one of the switches  $S_1$  or  $S_2$  is on and the other is off. This operation mode is used for low and medium speed applications. In Fig. 4 (c) which is the generating mode, both switches  $S_1$  and  $S_2$  are off and the current flows from the  $D_1$  and  $D_2$  diodes and  $L_A$  to the voltage source. The value of the inductance reduces and the generator current is produced. Thus, this is the negative torque region.

According to the one phase equivalent circuit of the SRG, the phase voltage can be written as follows

$$V = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

where  $V$ ,  $R$ ,  $i$ , and  $\psi$  are one phase voltage, the phase resistance, phase current, and the magnetic flux, respectively.

The magnetic flux can be explained as follows

$$\psi = L(i, \theta).i \quad (2)$$

When the equation of the phase voltage is rearranged, Equation 7 is obtained as follows

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

where  $d\theta/dt$ ,  $\theta$ , and  $L$  are the rotational speed, the rotor position, and the phase inductance, respectively.

Lastly, the phase voltage is obtained as follows

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (4)$$

where  $e$  is the back electromotive force.

By neglecting the magnetic saturation, the torque produced by a phase can be defined as follows [22]

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5)$$

### Control of the SRG

In the controlling of the SRGs, main quantities are the excitation time, operating speed, and excitation voltage. In applications where the load is connected directly to the converter as shown in the Fig. 5, a controlled voltage must be supplied to the load. To keep the generated voltage constant in case of a change in the load, a control system is used by comparing the reference voltage with the load voltage. In this system, the error value obtained from the voltage difference is passed through a PI controller and the reference current value is obtained. Then, this current is compared with the actual phase current value at the output of the machine to keep the phase current at the desired value. The obtained error is controlled by the PI current controller. This method called as the voltage control method is important for some applications such as automotive and aerospace where the DC bus voltage must be kept at a constant value.

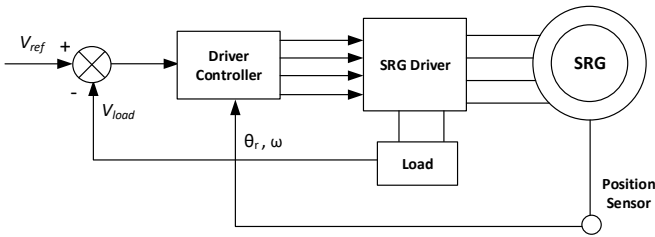


Figure 5. The block diagram of the SRG voltage control method

Besides in the power control method, the power produced by the SRG must be directly controlled. The SRG is connected to the electrical network via DC/AC converter. To implement these control methods, the AHB converter circuit can be activated by three methods which are Pulse Width Modulation (PWM), a current hysteresis regulator and single-pulse operation.

### The Characteristics of a Wind Turbine

A wind turbine converts the wind kinetic energy into the mechanical energy with the movement of turbine blades. The mechanical torque  $T_m$  applied to the wind turbine shaft can be expressed by [9]

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A R \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} V_w^2 \quad (6)$$

where  $\rho$ ,  $A$ ,  $R$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ , and  $V_w$  are the air density whose value is  $1.244 \text{ kg/m}^3$ , area swept by the blades, the turbine blade radius, turbine power coefficient, tip speed ratio, and wind speed, respectively.

The wind power can be explained by

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p A V_w^3 \quad (7)$$

The turbine power coefficient is given as follows

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_1} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\left( \frac{C_5}{\lambda_1} \right)} + C_6 \lambda \quad (8)$$

where the parameters indicated by the index  $C$  are the design parameters of the turbine and  $\beta$  is the blade pitch angle.  $C_p$  is a non-linear function of the blade pitch angle.

The tip speed ratio  $\lambda$  can be calculated as follows

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (9)$$

The variations of the  $\lambda$  and  $C_p$  for different  $\beta$  values are shown in Fig. 6.

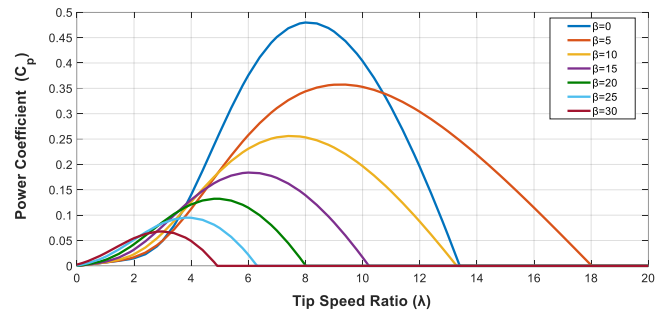


Figure 6. The change of the power coefficient versus the tip speed ratio [23]

It is observed from the Fig. 6 that setting the power coefficient at an appropriate value depends on keeping the  $\beta$  and  $\lambda$  within a certain range. Thus, the design parameters of the turbine are selected as  $C_1=0.5176$ ,  $C_2=116$ ,  $C_3=0.4$ ,  $C_4=5$ ,  $C_5=21$ ,  $C_6=0.068$ , and  $C_{pmax}=0.48$ .

In this study, a wind turbine with a nominal output power of 745 W is designed, and  $R$  and  $\lambda$  are calculated. Accordingly, the relationship between the turbine speed and output power of the designed wind turbine at different wind speeds is shown in Fig. 7.

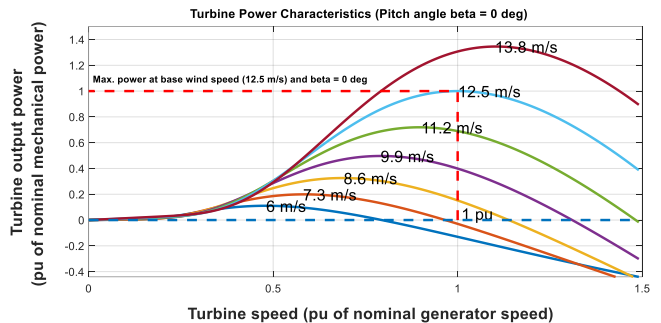


Figure 7. The power characteristics of the designed 745 W wind turbine

As seen from the Fig. 7, the maximum power can be obtained by the turbine speed of 1 pu and the wind speed of 12.5 m/s.

The turbine blade radius can be found by

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{10}$$

Accordingly, the turbine rotor speed can be calculated as follows

$$\omega = \frac{\lambda V_r}{R} \tag{11}$$

### The Power Optimization of the SRG

The output power of the SRGs depends on the excitation current, excitation voltage, rotor position, and rotor speed parameters. To increase the efficiency obtained from the SRGs, optimal control of these parameters is required. For this reason, commonly used control methods are the Angle Position Control (APC), Soft-Chopping Current Control (SCCC), and Voltage Chopping Control (VCC). In this study, the APC method is used due to significant advantages which are wide torque setting range, enabling more than one phase to conduct at the same time, and increasing the efficiency by finding the optimum switching angles where minimum torque fluctuation occurs. This method is based on controlling the phase currents by adjusting the turn-on/turn-off angles at the constant voltage applied to the phase winding. Hence, the output power can be adjusted.

### MATLAB/Simulink Simulation Model of the SRG used in the Wind Turbine

In this study, a MATLAB/Simulink model of the WPP and optimization of an 8/6 pole 4-phase SRG having 745 W nominal power used in the model are realized. The parameters of the SRG used in the MATLAB/Simulink model are given in Table 1.

Table 1. The parameters of the SRG.

SRG Parameters	Values
Stator Resistance	2.15 Ω
Moment of Inertia	0.004 kg.m <sup>2</sup>
Maximum Inductance	250 mH
Minimum Inductance Position	0.5 mH
Rated Current	5 A
Rated Flux Connection	0.3 Vs
Stator Resistance	2.15 Ω
Moment of Inertia	0.004 kg.m <sup>2</sup>
Maximum Inductance	250 mH
Minimum Inductance Position	0.5 mH

Initially, the system is designed without using any optimization. Then, MATLAB/Simulink model of a WPP is realized by using an APC optimization method. The results of both systems are given comparatively.

#### Designed model without using optimization

A MATLAB/Simulink model of the system is created by a simple controller without any optimization. The block diagram of the designed system is given in Fig. 8.

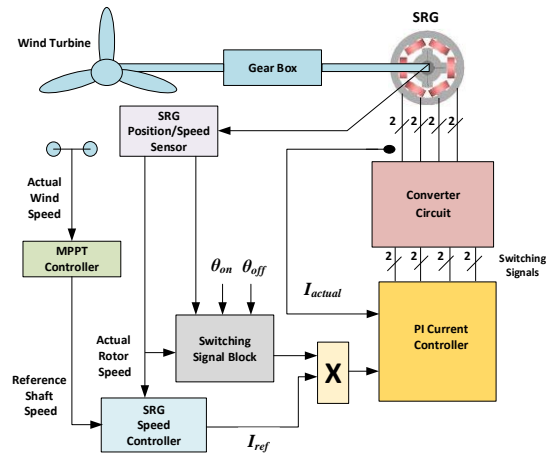


Figure 8. The block diagram of the designed system without using any optimization

In the designed system in the Fig. 8, a MPPT controller and a speed controller blocks are included. The reference speed obtained from the MPPT controller is compared with the actual speed in the speed controller block. The reference current value is obtained by passing a PI control. Then, it is sent to the simpler controller block, where the opening and closing angles are entered manually and the switching signals are generated by obtaining the position information from the SRG speed. A new reference current value is created by multiplying the switching signal and the reference current value. This new reference current is compared with the actual value of the phase current, and the fault current is passed through a relay. After that, the switching signals are generated for the AHB converter at the relay output. These are sent directly to the lower and upper row switches of each phase in the AHB converter.

#### Designed model with using optimization

In this study, an optimization of the WPP is realized by using the APC method. The block diagram of the designed system is shown in Fig. 9.

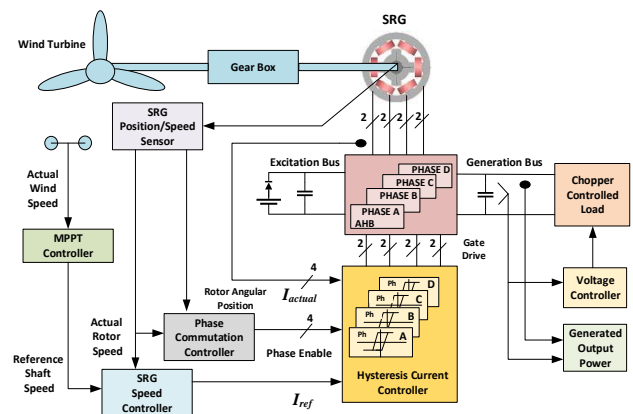


Figure 9. The block diagram of the system designed by the APC method

As shown in the Fig. 9, this APC method that the switching angles change continuously depending on the speed is applied to minimize the torque ripple and keep the phase currents in the desired range. Then, a MATLAB/Simulink model of the system is realized by using the block diagram in Fig. 10.



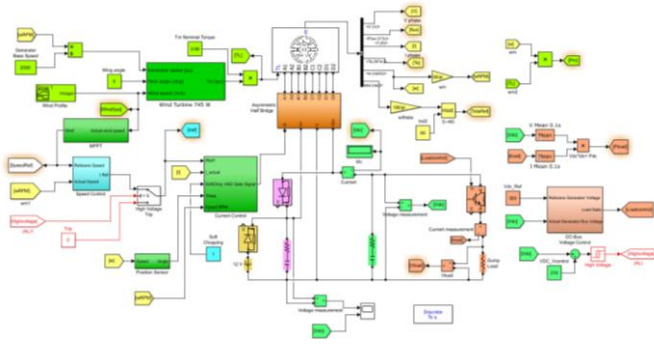


Figure 10. MATLAB/Simulink model of the WPP using an optimization method

In the Fig. 10, the wind speed is first detected by the MPPT controller block and the optimum SRG speed is calculated to obtain the maximum output power. The calculated optimum speed is used by the speed controller block as the reference speed and the speed error is obtained by comparing the actual SRG shaft speed with the reference speed. The speed error is converted to the reference current using a PI control. Then, the reference current is used by the hysteresis current control loop.

### Results and Discussions

In this paper, MATLAB/Simulink results of the 8/6 pole 4-phase SRG are obtained for 30 V supply voltage,  $\theta_{on}=15^\circ$  and  $\theta_{off}=30^\circ$ , and 1500 rpm SRG speed (157 rad/s). As a result of the simulations, the current, voltage, inductance, and switching signal curves for all phases of the SRG are examined for the optimized and unoptimized systems. In the model, the variations of the wind speeds applied to the turbine inlet of both systems are shown in Fig. 11.

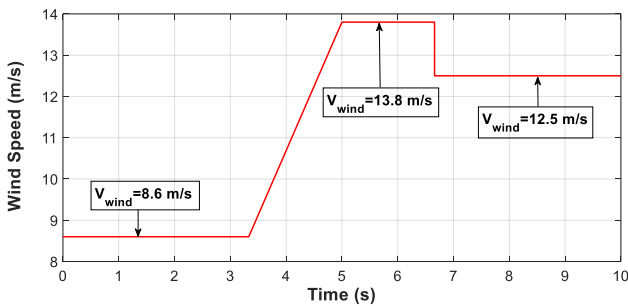


Figure 11. Variation of the wind speeds applied to the entrance of the system

For the wind speeds given in Fig. 11, the SRG shaft speeds which the maximum turbine output power will be obtained are given in Table 2.

Table 2. The SRG speeds required for the MPPT

Wind Speed (m/s)	Turbine Speed for $P_{max}$ (Pu)	Turbine Output Power $P_{out}$ (Pu)	Turbine Output Power $P_{out}$ (W)	SRG Shaft Speed (rpm)
8.6	0.7	0.32	238	1377
12.5	1	1	745	2000
13.8	1.1	1.35	1005	2210

As seen from the Table 2, the wind turbine output power should be 1 pu corresponding to 745 W at a wind speed of 12.5 m/s and the wind turbine shaft speed should be 1 pu corresponding to 2000 rpm. According to these wind speeds, the SRG shaft speed adjusted by the MPPT controller is obtained from the system without and with optimization in Fig. 12 and 13, respectively.

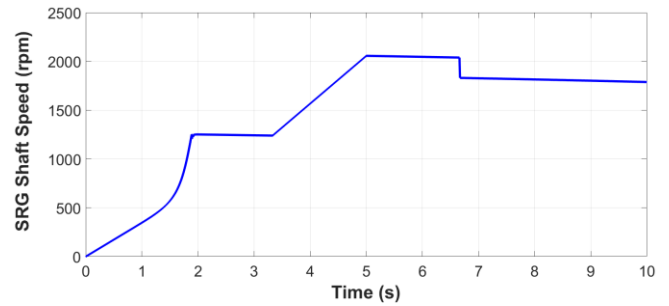


Figure 12. The SRG shaft speed with MPPT controller in the unoptimized system for different wind speeds

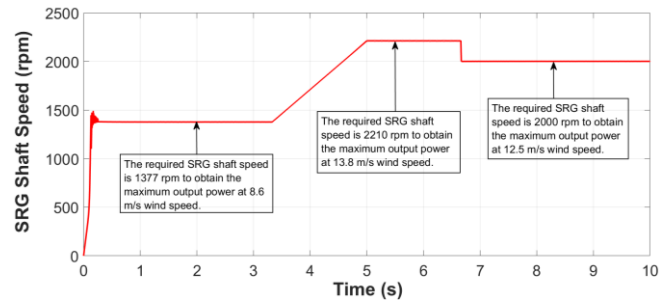


Figure 13. The SRG shaft speed with MPPT controller in the optimized system for different wind speeds

In the system with optimization, it is observed in Fig. 13 that same SRG shaft speed values given in Table 2 are obtained. Initially, a wind speed of 8.6 m/s is applied to the system input for more than 3 s. Accordingly, the shaft speed of the SRG reaches the required shaft speed value which is 1377 rpm for the maximum power in a much shorter time than 1 s while this time is 2 s in the non-optimization system. Besides, the other shaft speed values including 2210 d/d and 2000 d/d, which should be reached for the wind speeds of 13.8 m/s and 12.5 m/s, are also reached quickly in the optimized system. However, in the unoptimized system, the SRG shaft speed moves in a fluctuating manner after catching the reference speed and it has no stability. Under these operating conditions, the turbine maximum output power is drawn for the both systems in Fig. 14 and 15, respectively.

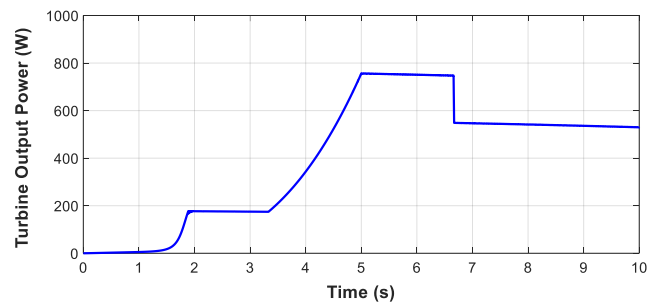


Figure 14. Turbine output power in the unoptimized system for different wind speeds

In the system without optimization in Fig. 14, it is observed that the maximum output power point is followed only at 8.6 m/s wind speed and the system reaches this point in about 2 s, and also the maximum power point values could not be reached for other applied wind speeds.

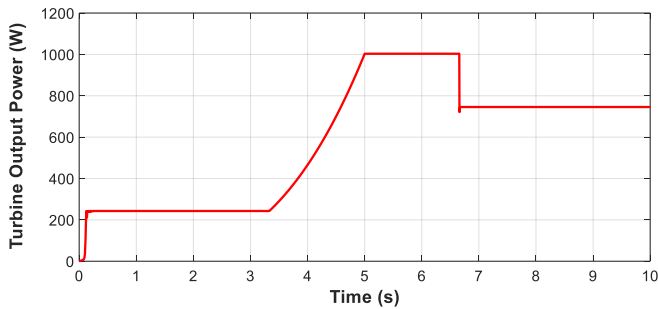


Figure 15. Turbine output power in the optimized system for different wind speeds

In the system with optimization in Fig. 15, 238 W, 745 W and 1005 W output powers are obtained for 6.8 m/s, 13.8 m/s and 12.5 m/s wind speeds applied to the system input, respectively. Furthermore, the turbine output power reaches the first maximum power point of 238 W in less than 1 s.

Under these operating conditions, the variations of the electromagnetic torque ( $T_e$ ) and DC bus voltage are given for two systems which are unoptimized and optimized in Fig. 16, 17, 18, and 19, respectively.

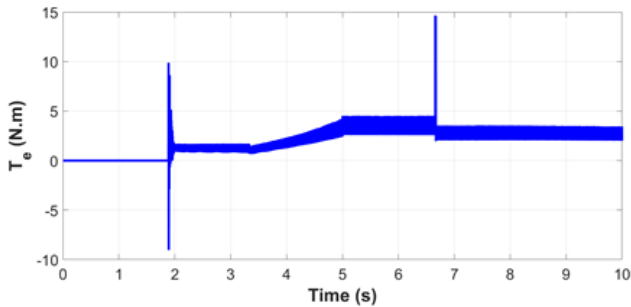


Figure 16. Variation of electromagnetic torque in the unoptimized system

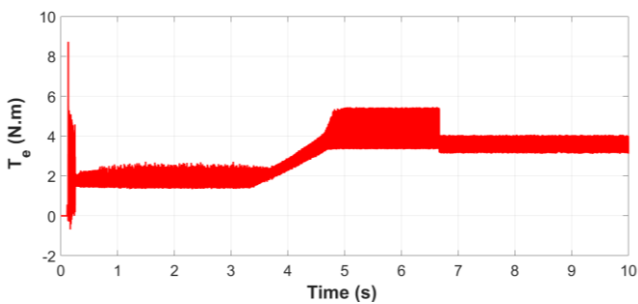


Figure 17. Variation of electromagnetic torque in the optimized system

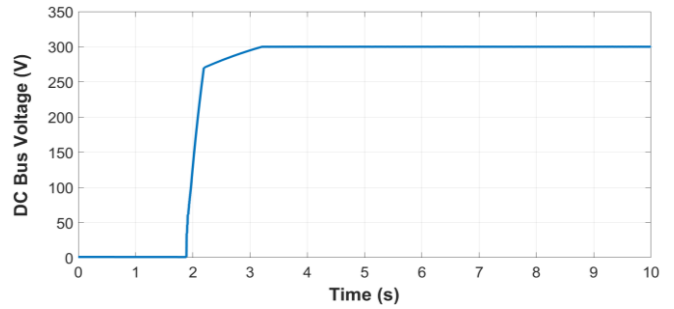


Figure 18. Variation of DC bus voltage in the unoptimized system

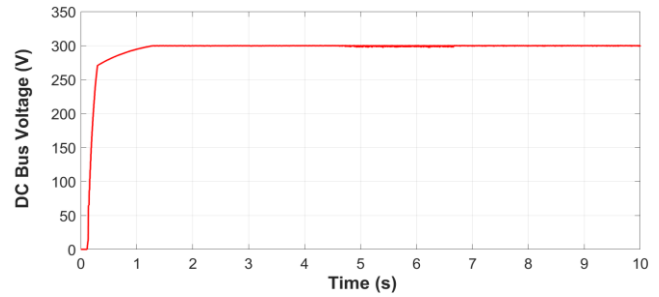


Figure 19. Variation of DC bus voltage in the optimized system

The wind profile, which is given in Fig. 11 is applied to the system input and the simulation is run for 10 s. Then, the variations of the output parameters are examined for the both systems in Fig. 20 and 21, respectively.

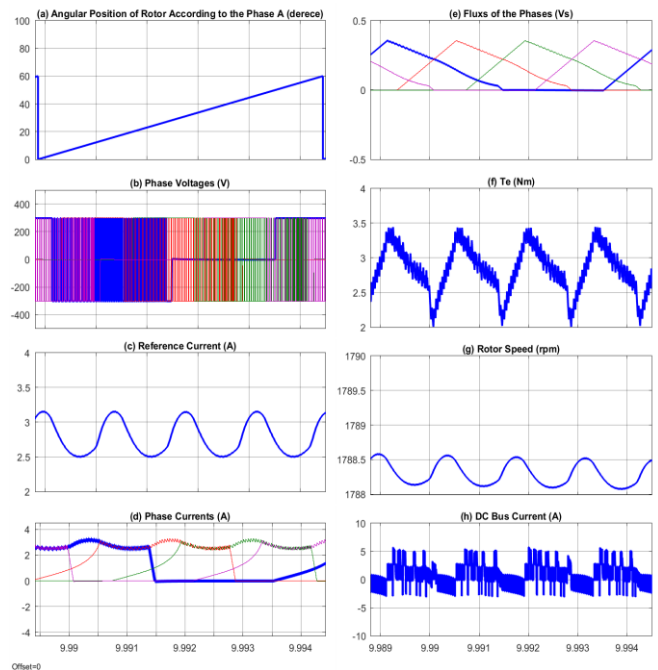


Figure 20. The simulation results obtained from the unoptimized system during a switching period for a wind speed of 12.5 m/s

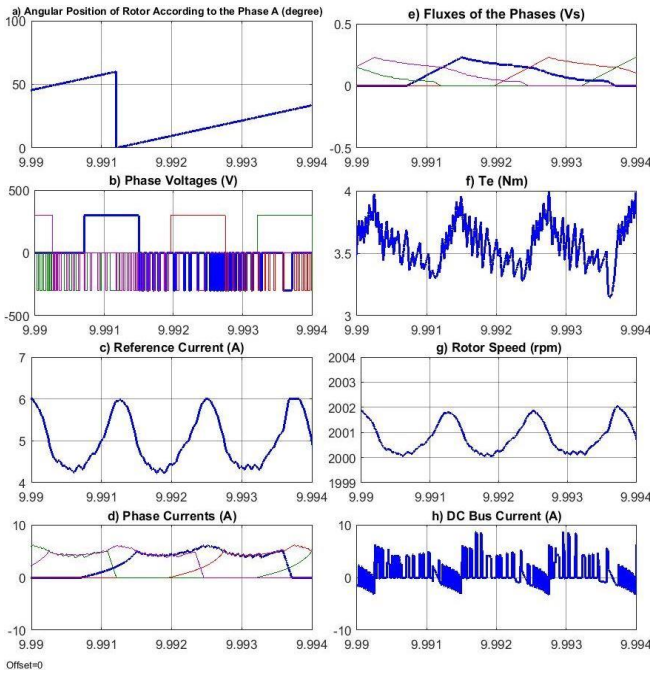


Figure 21. The simulation results obtained from the optimized system during a switching period for a wind speed of 12.5 m/s

As seen from the Fig. 21, the angular position curve of the rotor given in Fig. 21(a) changes from  $0^\circ$  and  $60^\circ$  which correspond to the aligned position ( $\theta_a$ ). Here,  $30^\circ$  corresponds to the unaligned position ( $\theta_{ua}$ ) for the phase A. Blue, red, green and purple colors refer to the phases A, B, C and D in Fig. 21(b), (d) and (e), respectively. The voltage of each phase is shown in Fig. 21(b). For the phase A, the switches  $S_{A1}$  and  $S_{A2}$  of the phase A in the AHB are opened at  $\theta_{on}$ . The DC excitation voltage is applied to the phase winding until the actual phase current reaches the reference phase current. Then, both switches are closed and the current flows through the diodes  $D_{A1}$  and  $D_{A2}$ . In the situation that the value of the phase current is smaller than the reference current,  $S_{A2}$  is opened. Thus, the regeneration of the phase current is achieved by using the induced EMF. When the actual phase current equals to the reference value, the switch  $S_{A2}$  is closed and the current flows back to the DC generation bus via diodes  $D_{A1}$  and  $D_{A2}$ . This process is repeated until  $\theta_{off}$ . The waveform of the reference current is shown in Fig. 21(c). In this curve, some ripples are seen at the phase change points. The actual phase current waveform is illustrated in Fig. 21(d). It is seen that it follows the reference current. However, high frequency fluctuation is occurred because of the hysteresis current control. The flux connections of the phase windings are examined in the Fig. 21(e). The maximum value of the fluxes is 0.3 Vs near the zero aligned position at  $\theta_{on}$  and then, it also drops to zero when the phase current reduces to zero. The curve of the SRG electromagnetic moment  $T_e$  is obtained in Fig. 21(f). Thanks to the hysteresis current control, a low amplitude high frequency torque ripple is observed. Besides, a torque ripple with larger amplitude and low frequency is obtained at the change of the phases. The rotor speed of the SRG is illustrated in the Fig. 21(g). The torque ripple causes the ripple in the rotor speed. The DC generation bus current is also seen in the Fig. 21(h). Due to the switching angles where two phase currents are produced at the same time, 10

A peaks are seen in the curve of the current. The negative values in the curve mean that the current flows from the excitation bus through the  $D_E$  excitation diode. As a result, in this paper, the comparison of the optimized and unoptimized results is realized and the power gain obtained from the optimized system is calculated for different wind speeds in Table 3.

Table 3. The comparison of the optimized and unoptimized results obtained from the designed MATLAB/Simulink model

	Unoptimized System		Optimized System		
	Turbine Output Power (W)	SRG Shaft Speed (rpm)	Turbine Output Power (W)	SRG Shaft Speed (rpm)	Power Gain (%)
8.6	178	1250	238	1377	33.70
12.5	550	1840	745	2000	35.45
13.8	760	2060	1005	2210	32.23

As seen from the results in Table 3, in the optimized system, turbine output power and shaft speed values of the SRG are higher than the unoptimized system. While the highest values of them are also obtained in the wind speed of 13.8 m/s, the highest power gain is obtained in the wind speed of 12.5 m/s for the optimized system.

## Conclusion

In this paper, a MPPT is carried out using the blade tip speed ratio method for a variable speed wind turbine system whose the rated output power is 745 W with 8/6 poles 4-phase SRG. Besides, an optimization of the SRG is realized by determining the optimum turn-on and turn-off angles where the minimum torque ripple occurs. The results obtained from the optimized model are compared with that of the model without any optimization. According to this comparison, the obtained results are given as follows.

- In the non-optimized operating situation that is constant switching angles for all speed values, the maximum power point in the system cannot be followed for three different wind speeds applied to the input. An excessive speed and torque fluctuations also occur in the system, and the SRG operates with the low efficiency due to not reaching the nominal phase current value. These results show that the AHB converter circuit has great importance about the efficiency of the SRG.
- In the optimized operating situation, different switching angles are set so that minimum torque fluctuation will occur for all speed values. It has been observed that the system works more stable, responds quickly to the changes in the wind speed, and follows the maximum output power point with great accuracy.
- In addition, an average of 33% power gain is achieved by the optimization method at the wind speeds of 8.6 m/s below the nominal wind speed in terms of the output power and 12.5 m/s, which is the nominal wind speed, compared to the unoptimized system. At a wind speed of

13.8 m/s above the nominal wind speed, the turbine output power also decreases due to the drop of the turbine power coefficient which is caused by exceeding the optimum value of the blade tip speed ratio in the optimized system. Thus, a small drop in the power gain is observed.

In conclusion, it is observed from this study that the use of SRGs in variable speed WPP with the right optimization methods is the right choice in terms of obtaining more efficiency from the system due to less losses compared to the conventional generators.

### Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared.

There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared.

### References

- [1] "Global energy review," *International Energy Agency*, 2021.
- [2] A. Y. Anekunu, "Control of switched reluctance generator for wind energy applications," *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology (IJAERT)*, vol. 3, pp. 290-295, 2015.
- [3] N. Fernandes, R. Bindu, and S. George, "Control of switched reluctance generator in wind energy system," in *IEEE Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, Nov. 2016, pp. 1-7.
- [4] M. Yildirim and H. Kurum, "Influence of poles embrace on in-wheel switched reluctance motor design," in *IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, August 2018, pp. 562-567.
- [5] M. Yildirim, M. Polat, and H. Kurum, "A survey on comparison of electric motor types and drives used for electric vehicles," in *IEEE 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Sept. 2014, pp. 218-223.
- [6] H. Yahia, N. Liouane, and R. Dhifaoui, "Differential evolution method-based output power optimisation of switched reluctance generator for wind turbine applications," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 7, pp. 795-806, 2014.
- [7] T. A. Barros, P. J. Neto, S. N. Paulo Filho, A. B. Moreira, and E. Ruppert, "Approach for performance optimization of switched reluctance generator in variable-speed wind generation system," *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 114-128, 2016.
- [8] N. H. Saad, A. A. El-Sattar, and M. E. Metall, "Artificial neural controller for torque ripple control and maximum power extraction for wind system driven by switched reluctance generator," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2255-2264, 2018.
- [9] Z. Omac and C. Cevahir, "Control of switched reluctance generator in wind power system application for variable speeds," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2665-2672, 2021.
- [10] D. W. Choi, S. I. Byun, and Y. H. Cho, "A study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind turbine," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 1, pp. 1-4, 2013.
- [11] T. A. dos Santos Barros, P. J. dos Santos Neto, P. S. Nascimento Filho, A. B. Moreira, and E. Ruppert Filho, "An approach for switched reluctance generator in a wind generation system with a wide range of operation speed," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8277-8292, 2017.
- [12] P. Asadi, M. Ehsani, and B. Fahimi, "Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power," in *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'06)*, March 2006, pp. 1639-1644.
- [13] G. M. A. Dranca, M. M. Radulescu, and D. Petreus, "Design and control of a direct-driven three-phase switched reluctance generator for micro-wind power applications," in *IEEE 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, March 2021, pp. 1-8.
- [14] P. J. dos Santos Neto, T. A. dos Santos Barros, M. V. de Paula, R. R. de Souza, and E. Ruppert Filho, "Design of computational experiment for performance optimization of a switched reluctance generator in wind systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 1, pp. 406-419, 2017.
- [15] H. Chen, "Implementation of a three-phase switched reluctance generator system for wind power applications," in *IEEE 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, June 2008, pp. 1-6.
- [16] X. Deng, Y. Huo, Q. Wang, R. Zhao, H. Chen, X. Ma, and X. Wang, "Design of switched reluctance generator system for wind power maximization," in *IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, February 2015, pp. 306-310.
- [17] H. Hajiabadi, M. Farshad, and M. A. S. Nejad, "Maximum power extraction for switched reluctance generator wind turbine using optimal firing angles control," in *IEEE 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, June 2019, pp. 1-7.

- [18] C. Mademlis and I. Kioskeridis, "Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 556-565, 2005.
- [19] D. Susitra, E. Jebaseeli, E. Annie, and S. Paramasivam, "Switched reluctance generator-modeling, design, simulation, analysis and control a comprehensive review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 12-25, 2010.
- [20] M. Heidarian and B. Ganji, "Design optimization of switched reluctance generator to maximize efficiency and gen-power ratio," in *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, June 2017, pp. 1-5.
- [21] F. P. Scalcon, G. Fang, C. J. Volpato Filho, H. A. Gründling, R. P. Vieira, and B. Nahid-Mobarakeh, "A review on switched reluctance generators in wind power applications: Fundamentals, control and future trends," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 69412-69427, 2022.
- [22] A. Amissa and A. B. Ibrahim, "Switched reluctance generator for variable speed wind energy applications," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 2, no. 1, 2011.
- [23] H. B. Perçin and A. Çalışkan, "Analysis of pitch angle Control in wind energy conversion systems with different control techniques," in *IEEE Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, October 2021, pp. 1-6.



## Federe Öğrenmede Birleştirme Algoritmalarının Model Performansına Etkisi

*The Impact of Aggregation Algorithms on Federated Learning Models*Mehmet Nergiz<sup>1\*</sup><sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, [mnergiz@dicle.edu.tr](mailto:mnergiz@dicle.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0867-5518>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 24 Ocak 2023  
Revizyon 2 Şubat 2023  
Kabul 4 Şubat 2023  
Online 23 Mart 2023

## Anahtar Kelimeler:

Federe Öğrenme, FedAVG,  
ResNet, MobileNet, Veri gizliliği,  
Derin Öğrenme

## ÖZ

Hammaddesi büyük veri olan Yapay zeka (YZ) teknolojileri özellikle son yıllarda verinin gizliliği ve güvenliği gibi önemli gerekçelerle veriye ulaşmayı zorlaştıran sebeplerden ötürü bir takım zorluklarla karşılaşmaktadır. Öte yandan büyük verinin merkezi bir lokasyonda toplanmasının zorlukları ve yüksek kapasiteli depolama ve işlemci ihtiyaçları da YZ alanında karşılaşılan zorluklardır. Bu zorluklardan esinlenerek geliştirilen İşbirlikçi YZ konsepti olan Federe Öğrenme (FÖ), işbirliğine katılan katılımcıların, veri gizliliğini ihlal etmeden YZ model parametrelerinin kendi verileri ile işlenip model parametrelerinin güncellenmesi ve güncellenen parametrelerin bir sunucuda belirli algoritmalar aracılığıyla birleştirilmesi ile iteratif olarak gerçekleştirilen bir konsepttir. FÖ konsepti, katılımcıların öznitelik ve örnek uzaylarının ortaklığına bağlı olarak Yatay FÖ, Dikey FÖ ve Federe Transfer Öğrenme şeklinde yaklaşımlar ile uygulanmaktadır. Bu çalışmada öznitelik uzaylarının ortak olduğu Yatay FÖ yaklaşımı için geliştirilen model parametrelerini birleştirme algoritmalarından FedAVG, FedAVGM ve FaultTolerantFedAVG'nin 5 katılımcı arasında özdeş olmayan bir şekilde dağıtılmış olan MNIST veri setinin ResNet-18 ve MobileNet V3 small sınıflandırıcılarının performansına etkisi incelenmektedir.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 24 January 2023  
Received in revised form 2  
February 2023  
Accepted 4 February 2023  
Available online 23 March 2023

## Keywords:

Federated Learning, Centralized  
Learning, Distributed Learning, Big  
Data, Data Privacy, Machine  
Learning

## ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) technologies, whose raw material is big data, have been encountering some difficulties especially in recent years due to important reasons like data privacy and security concerns. On the other hand, the difficulties of collecting big data in a central location and the necessity of high-capacity storage and processors are also the challenges in the field of AI. Federated Learning (FL), which is a Collaborative AI concept inspired by these challenges, is an iterative concept that is carried out by the participants in the collaboration, by processing AI model parameters with their own local data, updating the model parameters, and then combining the updated parameters on a server through certain algorithms without violating data privacy. The FL concept is implemented with approaches such as Horizontal FL, Vertical FL and Federated Transfer Learning, depending on the feature and sample spaces of the partnership of the collaborator participants. In this study, the effect of the model parameter aggregation algorithms such as FedAVG, FedAVGM and FaultTolerantFedAVG which are developed for the Horizontal FL approach are analyzed using the ResNet-18 and MobileNet V3 small classifiers on the MNIST dataset which is distributed non-identically among 5 participants.

Doi: 10.24012/dumf.1241947

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Bilişim teknolojilerinin yaklaşık son 30 yıldaki hızlı gelişimi ile sağlık, eğitim, güvenlik, ticaret gibi neredeyse her alanda logaritmik şekilde artan devasa miktarlarda dijital veri birikmektedir. Gücünü büyük veriden alan Derin Öğrenme (DÖ) [1] algoritmaları için bu verilerin işlenmesi kritik derecede önemlidir. Ancak bu boyutlarda verinin depolanması ve işlenmesi gibi zorlukların yanında özellikle son yıllarda veri gizliliği ve güvenliği gibi endişelerle veriye erişimde de engeller ile karşılaşmaktadır.

Klasik Merkezi Öğrenme konseptinde verilerin belirli bir lokasyonda toplanması gerekmektedir ve bu konseptte güçlü işlemci ve yüksek depolama kapasitesi gibi zorlukların yanında veri gizliliğinin ihlali söz konusudur. Verinin işlenmesi ve depolanmasına ilişkin Dağıtık Öğrenme gibi teknolojilerden faydalanarak çözümler üretilmiş olmasına karşın veri güvenliğinin sağlanması ve veri gizliliğinin korunması adına bu dağıtık teknolojiler de gerekli ve yeterli çözümü üretememiştir.

Bunlara ek olarak veri güvenliği ve gizliliği ile ilgili kişisel ve toplumsal hassasiyetin arttığı gözlemlenmektedir. 2018 yılında Facebook veri tabanından kişisel verilerin çalınması hadisesi ile beraber bu hassasiyet Uluslararası toplumu harekete geçirmiş veri güvenliği Avrupa Birliği Genel Veri Koruma Tüzüğü'nde [2] yer alarak güvence altına alınmıştır.

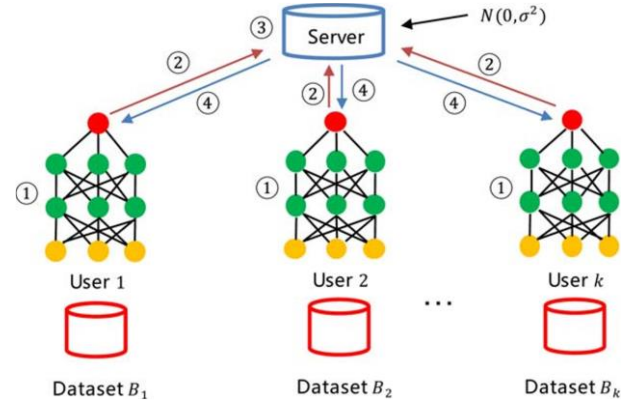
Veriye erişim & veri gizliliği ikilemini çözmek adına Google Yapay Zekâ ekibi tarafından ilk olarak 2016 yılında Federe Öğrenme (FÖ) [3] konsepti önerilmiştir. FÖ veri gizliliğini sağlamanın yanında modelin kullanıcının kendi yerel kaynakları üzerinde kendi verisi ile eğitilmesini gerçekleştirerek işlemci ve veri depolama yükünün de katılımcılara dağıtılmasını sağlamaktadır. FÖ sürecinde katılımcılar verilerini paylaşmazken merkezi koordinatör sunucusundan aldıkları ortak bir modeli kendi verisi ile öz kaynaklarını kullanarak model eğitimini gerçekleştirir. FÖ konseptinde modellerin hata toleransı daha yüksektir. Model eğitimi katılımcılar üzerinden gerçekleştiğinden dolayı FÖ, DÖ'ye nispeten ağdaki yükü azaltır. Ek olarak model eğitimi için tüketilen güç de geleneksel yaklaşımlardan daha azdır. Yapılan çalışmalar incelenince FÖ konseptinin henüz emekleme aşamasında olduğu ve gelişime açık bir alan olduğu anlaşılmaktadır.

## Federe Öğrenme

Şekil 1 'de görüleceği üzere temel FÖ konsepti [4] 4 adımdan oluşur:

1. Katılımcılar koordinatör sunucudan global modeli alır.
2. Her katılımcı, aldığı modeli kendi özel verisiyle eğitir. Bu işlem neticesinde model parametreleri güncellenmiş olur.
3. Güncellenen model parametreleri koordinatöre gönderilir.
4. Koordinatör, güncellenen parametreleri belirli algoritmalar kullanarak birleştirir. Ve yeni parametreler katılımcılara gönderilir.

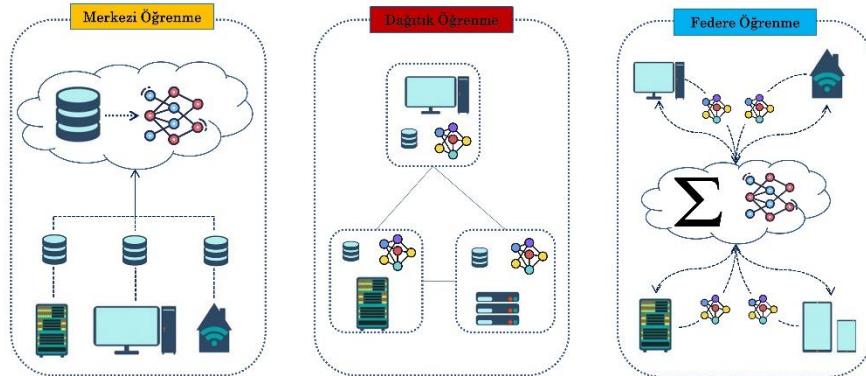
Bu döngü model yakınsayana kadar devam eder.



Şekil 1. FÖ temel konsepti [5]

İncelenen problemin niteliğine göre 3 farklı FÖ türünden bahsedilebilir [6]. Öznitelik uzayının katılımcılar arasında ortak olduğu problemlerde Yatay FÖ, örnek uzayının katılımcılar arasında ortak olduğu problemlerde ise Dikey FÖ kullanılmalıdır. Öte yandan hem öznitelik, hem de örnek uzayının cüzi miktarlarda ortak olduğu modeller için ise Federe Transfer Öğrenme tercih edilmektedir.

Bu çalışmada Yatay FÖ birleştirme algoritmalarının sınıflandırıcıların performansına etkisi araştırılmıştır. Çalışmada literatürde sıkça görüntü sınıflandırma araştırmalarında benchmark testleri amacıyla kullanılan MNIST veri seti kullanılmıştır. FÖ birleştirme algoritmalarından FedAVG, FedAVGM ve FaultTolerantFedAVG algoritmalarının sonuca etkisi incelenmiştir.



Şekil 2. Merkezi, Dağıtık ve FÖ yaklaşımları

Makalenin geri kalan kısmında ilk olarak literatürde FÖ birleştirme algoritmaları ile ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Materyal bölümünde çalışmada kullanılan veri seti tanıtılmıştır. Metod bölümünde katılımcılarda kullanılan DÖ modelleri ve FÖ sırasında kullanılan birleştirme algoritmaları detaylandırılmıştır. Uygulama bölümünde deneyler için dizayn edilen senaryolar tanıtılmıştır. Son olarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## Literatür

Literatürde Federe Öğrenme Birleştirme algoritmaları ile yapılan çalışmalardan bir kısmı:

Nilsson ve ark. [7] 3 FÖ algoritmasını kıyaslamış ve performanslarını verilerin merkezi bir sunucuda toplandığı yaklaşımla kıyaslamışlardır. Çalışmada Federated Averaging (FedAvg), Federated Stochastic Variance Reduced Gradient ve CO-OP algoritmaları, verilerin hem IID hem de non-IID durumlarında kıyaslanmıştır. Veri seti olarak MNIST kullanılmıştır. Sonuçlar, hem IID hem non-IID veri durumunda FedAvg'nin birleştirme algoritmaları arasında en yüksek doğruluğu elde ettiğini göstermiştir. FedAvg ile merkezi öğrenme arasındaki karşılaştırmada, IID verileri kullanılması durumunda sonuçların çok yakın olduğu, ancak merkezileştirilmiş yaklaşımın non-IID verilerde FedAvg'den daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Sannara ve ark. [8] katılımcıların belirli nöronları arasındaki farklılıkları belirleyerek model mimarisini değiştirebilen FedDist adlı yeni bir birleştirme algoritması önermişlerdir. Veri seti olarak HAR (Human Activity Recognition-Akıllı Telefonlarla İnsan Etkinliğini Tanıma) veri seti kullanılmıştır. Çalışmada önerdikleri FedDist algoritması klasik FedAVG, FedMA (Federated Matched Averaging), FedPER (Federated Learning with Personalization Layers) olmak üzere 3 adet FÖ birleştirme algoritmasıyla karşılaştırılmıştır. 200 FÖ turu neticesinde elde ettikleri sonuçlara göre önerdikleri FedDist birleştirme algoritmasının diğerlerinden daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

Campos ve ark. [9] bir IoT senaryosundaki farklı saldırıların tespiti için farklı veri dağılımlarını dikkate alan çok sınıflı bir sınıflandırıcıya dayalı FÖ özellikli bir IDS (Intrusion Detection System-Saldırı Tespit Sistemi) yaklaşımını değerlendirmişlerdir. Çalışmada en güncel IDS veri setlerinden biri olan ToN-IoT veri setini IoT cihazlarının IP adreslerine ve saldırı türlerine göre bölümlenerek elde ettikleri üç farklı senaryoda değerlendirmişlerdir. FÖ uygulaması olarak en son IBMFL çerçevesini kullanarak FedAVG ile FED+ birleştirme algoritmalarının da kıyaslamalarını yapmışlardır.

## Materyal

### Veri Seti

Bu çalışmada literatürdeki görüntü sınıflandırma ile ilgili yapılan birçok bilimsel araştırmada benchmark veri seti olarak kabul gören MNIST (Modified National Institute of Standards) veri seti kullanılmıştır.



Şekil 3. MNIST veri setinden bir kesit

Tablo 1. MNIST verisinin 5 katılımcı üzerindeki dağılımı

	K1	K2	K3	K4	K5
0	5923	100	100	100	100
1	6742	100	100	100	100
2	100	5958	100	100	100
3	100	6131	100	100	100
4	100	100	5842	100	100
5	100	100	5421	100	100
6	100	100	100	5918	100
7	100	100	100	6265	100
8	100	100	100	100	5851
9	100	100	100	100	5949

MNIST veri seti el yazması 0' dan 9'a kadar olan rakamların 28x28 piksel boyutlarında dijital ortama aktarıldığı bir veri kümesidir. Şekil 3 de veri setinden bir kesit görülmektedir. MNIST veri seti eğitim ve test amaçlı sırasıyla toplamda 60000 ve 10000 adet görüntü içermektedir [10]. Bu çalışmada MNIST veri setine ait görüntüler 5 katılımcıya özdeş olmayan bir şekilde dağıtılmıştır. Bu şekilde non-IID veri durumunda değişik derin öğrenme algoritmalarının değişik birleştirme algoritmaları bağlamında performans değişiklikleri incelenmiştir. Bu çalışmada katılımcılar arasındaki özdeş olmayan veri dağılımı Tablo 4'te gösterilmiştir.

## Metod

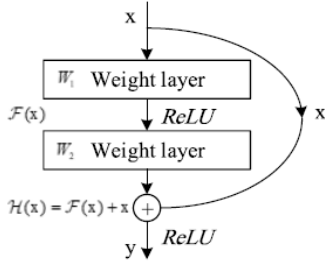
Bu bölümde FÖ sürecinde katılımcılarda kullanılan derin ağ modelleri ve FÖ birleştirme algoritmaları tanıtılmaktadır.

### ResNet-18

Resnet (Residual Networks) ağları 2015 yılında Kaiming He ve ark. [11] tarafından sunulan ve çoğunlukla görüntü işleme alanında kullanılan bir derin ağ modelidir. Şekil 4

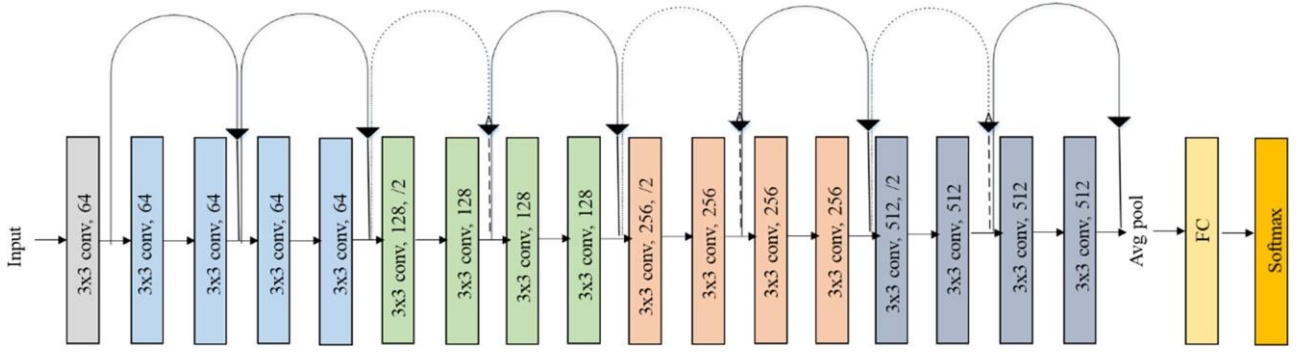


'te 1 artk blok Şeması gsterilmiŐtir. EĞik ok kısıyol bağlantısını temsil etmektedir.



Şekil 4. ResNet Artık Blok Yapısı

Giriş ile çıkış arasındaki bağlantı deklm 1'de gsterilmiŐtir.



Şekil 5. Orijinal ResNet-18 Modeli [12]

### MobileNet V3 small

MobileNet ağları adından da anlaşılacağı üzere mobil uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan Tensorflow 'un ilk mobil bilgisayar gsterntu işleme modelidir. Özellikle g ve işlemci kaynağı kısıtlı olduğu durumlarda minimum parametre ile doğruluğu maximize etmeyi amaçlar.

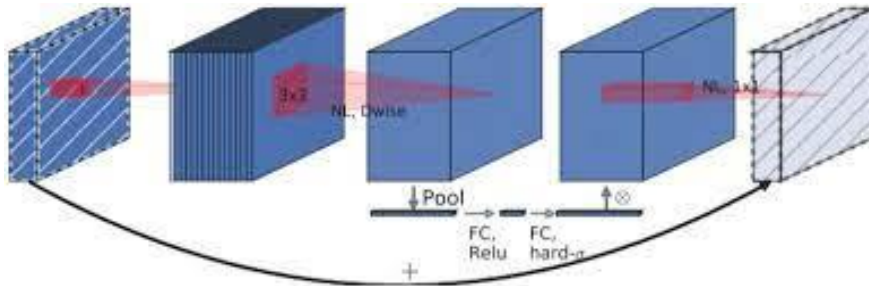
MobileNET V3 modeli; MobileNET V1, MobileNET V2 ve MnasNet (Mobile Neural Architecture Search Network) ağlarında sırasıyla bulunan derinlemesine ayrılabilir konvlsyon, ters artk ve doğrusal darboğaz ile sıkma ve uyarma bloklarını içermektedir. Ayrıca doğrusal olmayan fonksiyon olarak ReLU yerine h-swish fonksiyonu kullanılmıştır. h-swish (hard-swish)

fonksiyonu x input olmak üzere denklem 2'de gsterilmiŐtir [13]:

$$h - swish[x] = x \frac{ReLU_6(x + 3)}{6} \quad (2)$$

Klasik Swish fonksiyonu  $x * sigmoid(x)$  ifadesi hesaplanıyor iken, hard-swish'te onun yerine normalize edilmiş, parçalı doğrusal Relu6() fonksiyonu kullanılarak performans arttırılmıŐtır [13]. MobileNet V3 orijinal blok Şeması Şekil 6 da gsterilmiŐtir.

AĞlarda aynı derinliğe sahip düzenli konvlsyonlara sahip ağa kıyasla parametre sayısını önemli ölçüde azaltır [13].



Şekil 6. MobileNet V3 blok yapısı [13]

## Federe Öğrenme Birleştirme Algoritmaları

Yatay FÖ 'de koordinatör sunucular konseptin en kritik bileşenlerinden biridir. Koordinatör sunuculuk görevini katılımcılardan biri yapabileceği gibi konseptin kullanım amacına bağlı olarak bağımsız bir sunucu da yapabilir. Koordinatör sunucu katılımcıların kendi kişisel verileri ile eğitmiş oldukları model parametrelerini belirli algoritmalar ile birleştirir. Bu çalışmada Flower-Federated çerçevesinin sunmuş olduğu FedAVG [3], FedAVGM [14] ve FedAVG Fault Tolerant algoritmaları kullanılmıştır.

### FedAVG

Federated Averaging algoritması ilk olarak Mc Mahan ve ark. tarafından FÖ 'nün ilk birleştirme algoritması olarak ortaya çıkmıştır. FederatedAveraging (FedAVG) her bir istemcideki yerel stokastik gradyan iniş (SGD) değerlerinin ortalamasını alarak yeni bir model oluşturur.  $K$  katılımcı sayısı,  $n$  bütün katılımcılarda bulunan toplam örnek sayısı,  $n_k$  k'ncü katılımcının örnek sayısını temsil etmek üzere FedAVG algoritmasının ağırlıklı ortalama alma formülü denklem 3 ve 4'teki gibidir:

$$w_t^k \leftarrow \sum_{k=1}^K \left( \frac{n_k}{n} w_t^k \right) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Güncelleme işlemi de matematiksel olarak:

$$w_{t+1}^k \leftarrow w_t^k - \nabla w_t^k \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir.

### FedAVGM

FedAVGM, standart FedAVG yöntemine sunucu momentumunun eklenmesi ile geliştirilmiştir. Temel olarak non-IID [15] terimi ile ifade edilen verinin katılımcılardaki dengesiz dağılımı durumunun klasik FedAVG nin performansını ciddi anlamda düşürmesine bir çözüm olarak önerilmiştir [14]. FedAVG'yi tanımlayan denklem 3 ve 4'teki formüllerden farklı olarak gradyan değişimleri için sunucudaki momentum ( $\beta$ ) kavramı bir yenilik olarak denklem 5 ve 6'daki gibi dâhil edilmiştir.

$$w_{t+1}^k \leftarrow w_t^k - v_t^k \quad (5)$$

$$v_t^k \leftarrow \beta v_t^k + \nabla w_t^k \quad (6)$$

### FaultTolerantFedAVG

Herhangi bir katılımcı bağlantısının kesilmesi veya gecikmesi durumunda hatalı katılımcı koşullarıyla başa çıkabilen, FLOWER kitaplığında kullanılan bir FedAvg çeşididir.

## Uygulama

Bu çalışmada kullanılan tüm derin öğrenme yöntemleri, Lokal Öğrenme (LÖ), Merkezi Öğrenme (MÖ) ve FÖ olmak üzere üç farklı mimari üzerinde yürütülmektedir. LÖ mimarisi, işbirliği yapan tüm katılımcıların kendi yerel verilerini kullanarak her birinin kendi farklı modellerini eğittiği ve ortak test verilerinin global olarak kullanıldığı durumu ifade eder. MÖ mimarisi, iş birliği yapan tüm katılımcıların verilerini tek bir sunucuda birleştirdiği ve mümkün olan en yüksek doğruluğun elde edilmesinin beklendiği durumu sunar. FÖ mimarisi ise iş birliği yapan tüm katılımcıların kendi yerel verilerini tuttıkları ve nihai genel modelin yalnızca model parametresi güncellemelerinin yinelemeli olarak merkezi bir sunucu ile paylaşılarak elde edildiği bir durumdur.

## Sonuçlar ve Tartışma

ResNet-18 ve MobileNet V3 small ağlarının her biri özdeş olmayan bir şekilde 5 katılımcı üzerinde dağıtılmış olan MNIST veri seti üzerinde LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre eğitilip test edilmiştir. LÖ ve MÖ için epok sayısı 50 olarak ayarlanmış ve iki epokta bir defa test veri seti ile test edilmiştir. FÖ konseptinde ise her bir katılımcının lokal kaynaklarındaki eğitimi sırasındaki epoch sayısı 1 olarak, katılımcılar ve sunucu arasındaki döngü sayısını ifade eden global epoch sayısı 50 olarak belirlenmiştir. ResNet-18 ve MobileNet V3 small modelleri IMAGENET1K\_V2 veri seti üzerinde ön eğitimden geçirilmiş olan pytorch torchvision kütüphanesindeki ağırlık değerleri ile eğitime başlatılmışlardır [16]. ResNet-18 ve MobileNet V3 small modelleri için LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre yapılan eğitimler sonucunda elde edilen performans sonuçları sırasıyla Tablo 2 ve 3'te verilmiştir. Performans farkları Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık, F1 skor ve AUC açısından ele alınmıştır. Bu çalışmada, AUC, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 skor verileri 10 adet sınıf için ayrı ayrı elde edildikten sonra ortalamaları alınarak aşağıdaki tablolarda performans karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır. AUC değeri OVR(one versus rest) mantığı ile yani her bir sınıfın AUC başarısı geriye kalan tüm sınıflara karşı hesaplanmıştır.

Tablo 2 verileri incelendiğinde, ResNet-18 modelinin LÖ konseptine göre 0.8127 ile 0.8840 arasında AUC başarımları gösteriyorken, MÖ konseptine göre 0.9873 AUC başarımları gösterdiği görülmektedir. FÖ konseptine göre ise en yüksek başarımın 0.9803 AUC değeri ile FedAVGM birleştirme algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. FÖ konseptine sahip diğer birleştirme algoritmaları olan FedAVG ve FaultTolerantFedAVG algoritmalarının da sırasıyla 0.9774 ve 0.9764 değerlerini elde ettiklerini görülmektedir. Dolayısıyla, FÖ konseptinin LÖ konseptine göre en az %9.24 AUC artışı avantajı sağladığı, MÖ konseptine göre ise en fazla % 1.04 kadar AUC değerinden feragat ettiği Tablo 2'de gözlenebilmektedir.

Tablo 2 diğer metriklere göre incelendiğinde FÖ'nün avantajı çok daha bariz bir şekilde görülmektedir. FÖ konseptinin LÖ konseptine göre, Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor metriklerine göre sağladığı avantaj sırasıyla en az %37.28 , %14.40 , %37.96 , %42.18 kadardır. Öte yandan, FÖ konseptinin MÖ konseptine göre, Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor metriklerine göre dezavantajı da sırasıyla en fazla %12.12 , %10.34 , %12.03 , %12.19 kadardır.

Tablo 3 verileri incelendiğinde, MobileNet V3 small modelinin LÖ konseptine göre 0.8112 ile 0.8803 arasında AUC başarımları gösteriyorken, MÖ konseptine göre 0.9868 AUC başarımları gösterdiği görülmektedir. FÖ konseptine göre ise en yüksek başarımın 0.9745 AUC değeri ile FedAVG birleştirme algoritması ile elde edildiği gözlenmektedir. FÖ konseptine sahip diğer birleştirme algoritmaları olan FedAVGM ve FaultTolerantFedAVG algoritmalarının da sırasıyla 0.9728 ve 0.9721 değerlerini elde ettiklerini görülmektedir. Dolayısıyla, FÖ konseptinin LÖ konseptine göre en az %9.18 AUC artışı avantajı sağladığı, MÖ konseptine göre ise en fazla %1.47 kadar AUC değerinden feragat ettiği Tablo 2'de gözlenebilmektedir.

Tablo 3 diğer metriklere göre incelendiğinde FÖ'nün avantajı net bir şekilde görülmektedir. FÖ konseptinin LÖ konseptine göre, Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor metriklerine göre sağladığı avantaj sırasıyla en az %34.43 , %9.94 , %34.94 , %40.57 kadardır. Öte yandan, FÖ konseptinin MÖ konseptine göre, Doğruluk, Kesinlik,

Duyarlılık ve F1 Skor metriklerine göre dezavantajı da sırasıyla en fazla %11.37 , %11.79 , %11.33 , %12.12 kadardır.

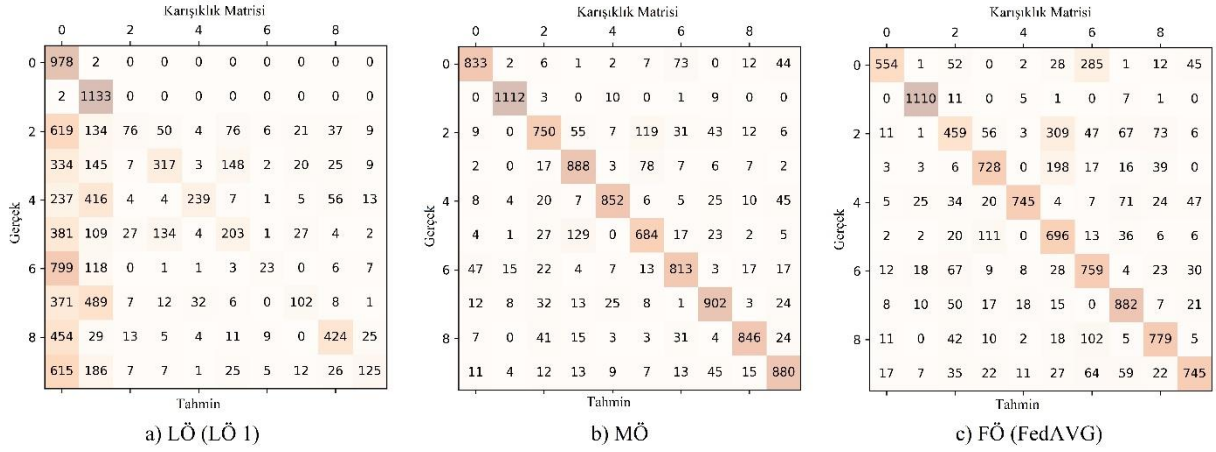
ResNet-18 ve MobileNet V3 small modellerinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre karışıklık matrisleri Şekil 7 ve 8'de gösterilmiştir. MobileNet V3 small ve ResNET-18 modelleri üzerinde FÖ konseptinde her bir katılımcının Eğitim Kaybı (training loss) ve Test Kaybı (validation loss) sırasıyla Şekil 10 ve 11'de gösterilmiştir. Hem Eğitim Kaybı hem de Test Kaybındaki azalma tüm epoklarda devam ettiği için, her üç birleştirme algoritmasının da hiçbir modelde veya katılımcıda aşırı öğrenme (overfitting) göstermediği anlaşılmaktadır. Şekil 9'da ise ResNet-18 ve MobileNet V3 small modellerinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre tüm katılımcıların AUC değerlerinin artış eğrileri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ResNet-18 modeli üzerinde öncelik sırasıyla FedAVGM, FaultTolerantFedAVG ve FedAVG, MobileNet V3 small modeli üzerinde ise sırasıyla FedAVG, FedAVGM ve FaultTolerantFedAVG birleştirme algoritmaları yakınsamaktadır. FÖ konseptinin, bu çalışmadaki gibi özdeş olmadan dağıtılmış 5 katılımcılı bir veri setinin 30 epok gibi bir sürede MÖ sınırına yakınsayabildiği gözlenmektedir. LÖ konseptinde ise her bir katılımcının kendi veri setindeki veri dağılımının temsil kapasitesine göre farklı AUC değerlerinden başlayarak MÖ ve FÖ'ye uzak bir noktaya yakınsadıkları görülmektedir.

Tablo 2. ResNet-18 modelinin 5 katılımcı üzerinde LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre eğitilerek elde edilen test sonuçları

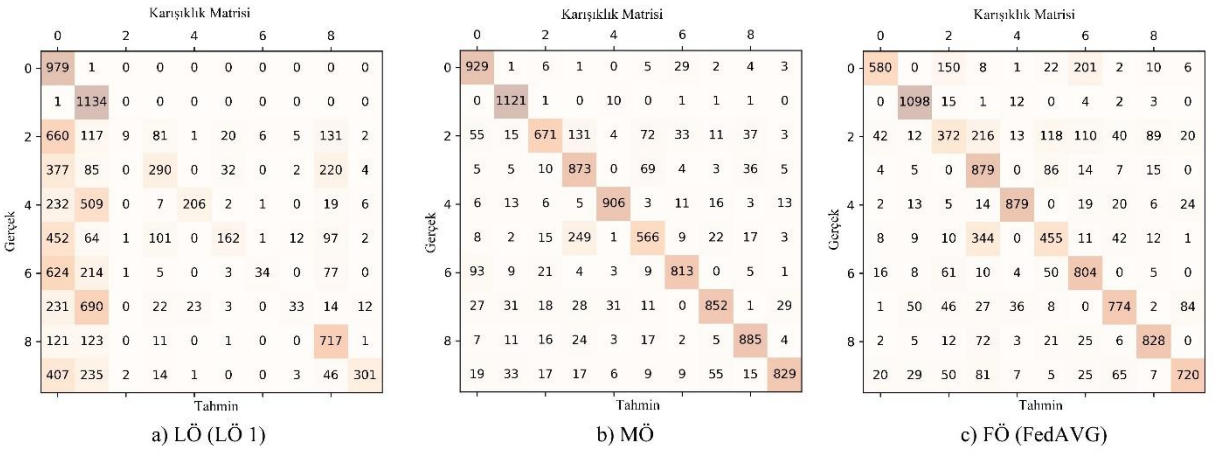
METRİK	LÖ 1	LÖ 2	LÖ 3	LÖ 4	LÖ 5	MÖ	FedAVG	FedAVGM	FaultTolerant
							FÖ	FÖ	FÖ
Doğruluk	0.3620	0.2275	0.2194	0.2094	0.2458	0.856	0.7457	0.7384	0.7348
F1 Skor	0.31	0.1220	0.1241	0.0924	0.1354	0.8537	0.7418	0.7318	0.7327
Kesinlik	0.5418	0.4053	0.4717	0.6079	0.5169	0.8553	0.7604	0.7519	0.7556
Duyarlılık	0.3537	0.2198	0.2328	0.2110	0.2412	0.8536	0.7436	0.7368	0.7333
AUC	0.8840	0.8127	0.8337	0.8681	0.8461	0.9873	0.9774	0.9803	0.9764

Tablo 3. MobileNet V3 small modelinin 5 katılımcı üzerinde LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre eğitilerek elde edilen test sonuçları

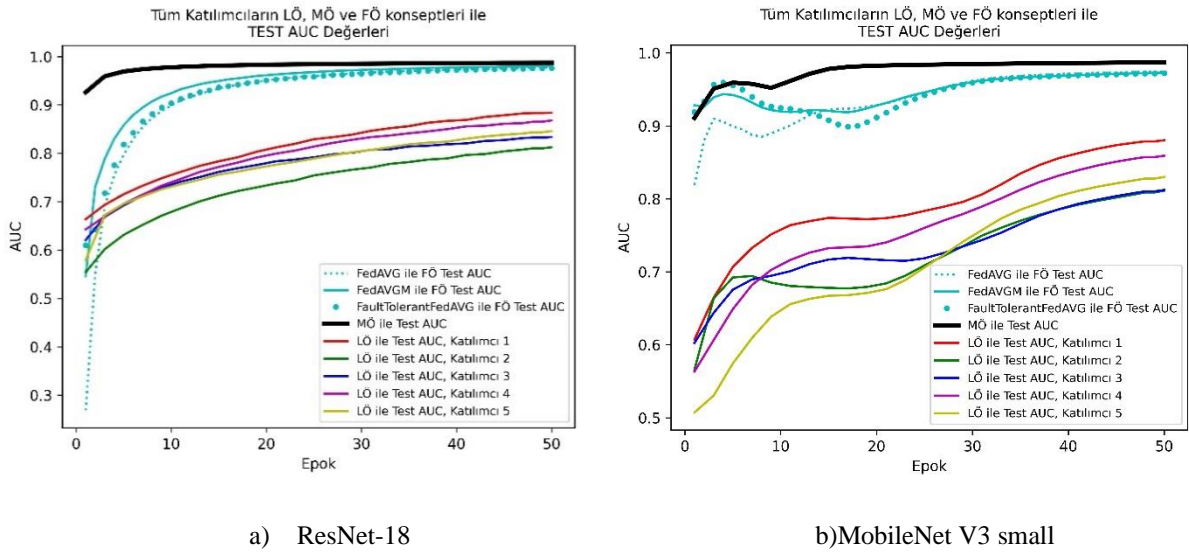
METRİK	LÖ 1	LÖ 2	LÖ 3	LÖ 4	LÖ 5	MÖ	FedAVG	FedAVGM	FaultTolerant
							FÖ	FÖ	FÖ
Doğruluk	0.3865	0.2050	0.2309	0.2183	0.2101	0.8445	0.7389	0.7333	0.7308
F1 Skor	0.3141	0.0886	0.1484	0.1069	0.0940	0.8410	0.7312	0.7237	0.7198
Kesinlik	0.6323	0.2076	0.4197	0.5301	0.2388	0.8496	0.7476	0.7425	0.7317
Duyarlılık	0.3787	0.1895	0.2436	0.2199	0.2101	0.8414	0.7351	0.7293	0.7281
AUC	0.8803	0.8112	0.8122	0.8590	0.8299	0.9868	0.9745	0.9728	0.9721



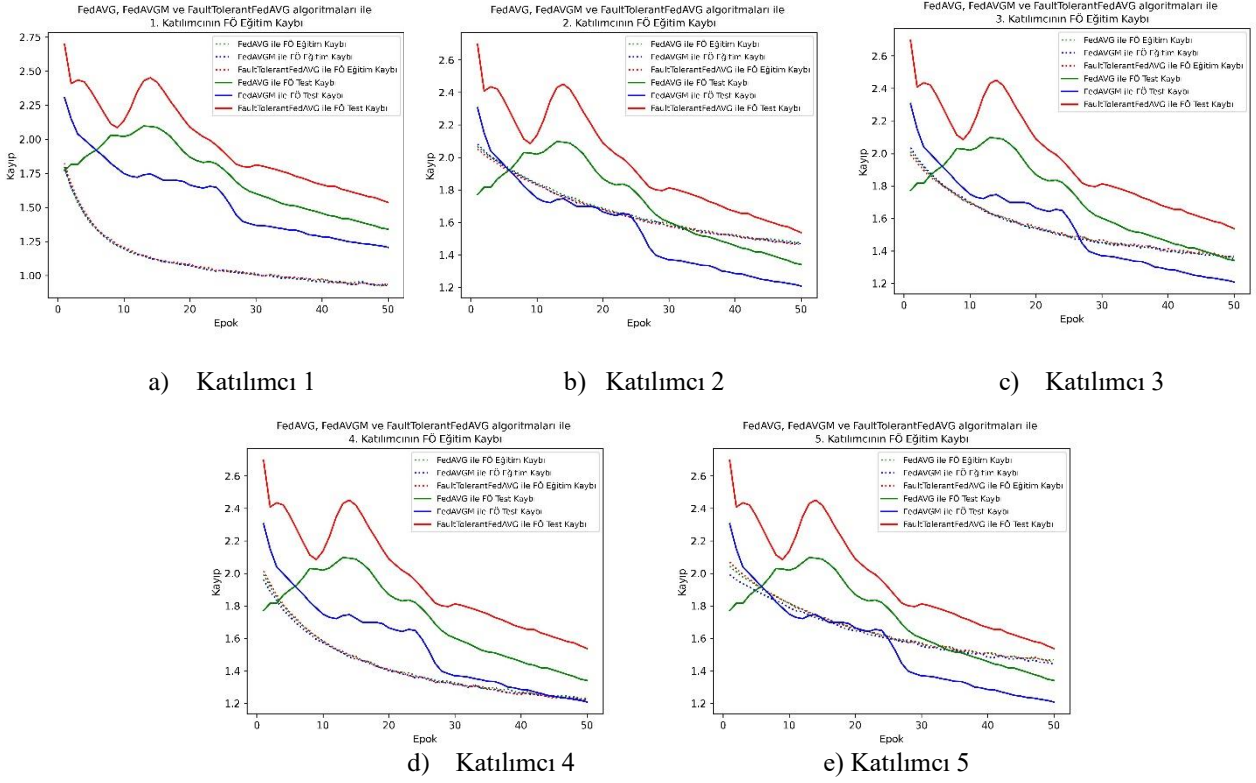
Şekil 7. ResNet-18 modelinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre karışıklık matrisleri



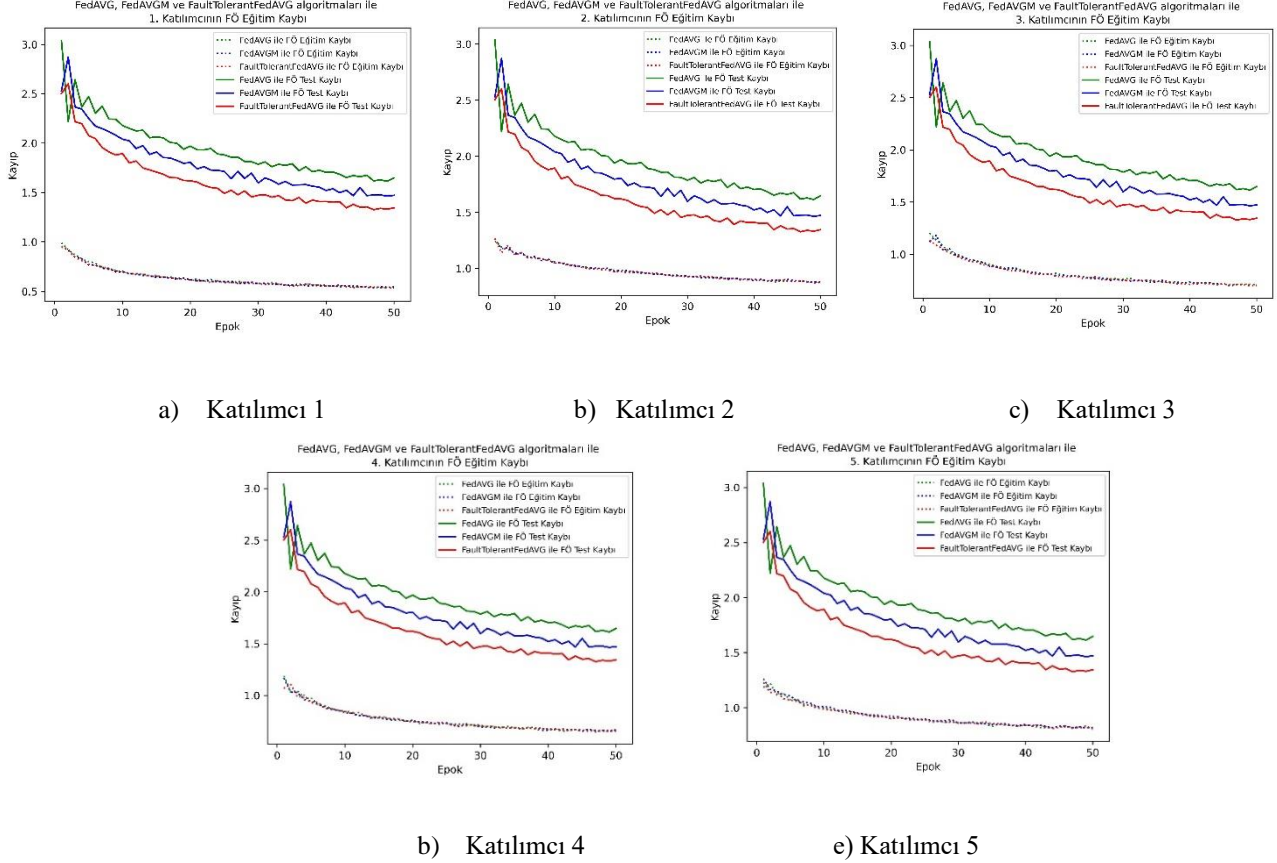
Şekil 8. MobileNet V3 small modelinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre karışıklık matrisleri



Şekil 9. ResNet-18 ve MobileNet V3 small modellerinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine tüm katılımcıların AUC değerleri



Şekil 10. MobileNet V3 small modelinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre FÖ Eğitim ve Test Kayırları



Şekil 11. ResNet-18 modelinin LÖ, MÖ ve FÖ konseptlerine göre FÖ Eğitim ve Test Kayırları

## Gelecek Çalışmalar

Mevcut çalışmanın ileride farklı birleştirme algoritmaları üzerinde test edilmesi, veri setinin farklı medikal görüntüler üzerinde uygulanması ve özgün birleştirme algoritmalarının tasarlanması planlanmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] J. Park *et al.*, “Communication-Efficient and Distributed Learning over Wireless Networks: Principles and Applications,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 5, pp. 796–819, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3055679.
- [2] “I (Legislative acts) REGULATIONS REGULATION (EU) 2016/679 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) (Text with EEA relevance).”
- [3] H. Brendan McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, and B. Agüera y Arcas, “Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data,” *Proc. 20th Int. Conf. Artif. Intell. Stat. AISTATS 2017*, vol. 54, 2017.
- [4] P. Kairouz *et al.*, “Advances and open problems in federated learning,” *arXiv*, pp. 1–105, 2019.
- [5] X. Huang, Y. Ding, Z. L. Jiang, S. Qi, X. Wang, and Q. Liao, “DP-FL: a novel differentially private federated learning framework for the unbalanced data,” *World Wide Web*, vol. 23, no. 4, pp. 2529–2545, Jul. 2020, doi: 10.1007/s11280-020-00780-4.
- [6] M. NERGİZ, “Collaborative Artificial Intelligence Concept: Federated Learning Review,” *DÜMF Mühendislik Derg.*, Jun. 2022, doi: 10.24012/dumf.1130789.
- [7] A. Nilsson, S. Smith, G. Ulm, E. Gustavsson, and M. Jirstrand, “A performance evaluation of federated learning algorithms,” in *DIDL 2018 - Proceedings of the 2nd Workshop on Distributed Infrastructures for Deep Learning, Part of Middleware 2018*, Dec. 2018, pp. 1–8, doi: 10.1145/3286490.3286559.
- [8] S. Ek, F. Portet, P. Lalanda, and G. Vega, “A Federated Learning Aggregation Algorithm for Pervasive Computing: Evaluation and Comparison,” Oct. 2021, doi: 10.1109/PERCOM50583.2021.9439129.
- [9] E. M. Campos *et al.*, “Evaluating Federated Learning for intrusion detection in Internet of Things: Review and challenges,” *Comput. Networks*, vol. 203, p. 108661, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMNET.2021.108661.
- [10] “MNIST dataset,” [Online]. Available: [https://github.com/myleott/mnist\\_png](https://github.com/myleott/mnist_png).
- [11] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep Residual Learning for Image Recognition,” Dec. 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1512.03385>.
- [12] F. Ramzan *et al.*, “A Deep Learning Approach for Automated Diagnosis and Multi-Class Classification of Alzheimer’s Disease Stages Using Resting-State fMRI and Residual Neural Networks,” *J. Med. Syst.*, vol. 44, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.1007/s10916-019-1475-2.
- [13] A. Howard *et al.*, “Searching for MobileNetV3.”
- [14] T.-M. H. Hsu, H. Qi, and M. Brown, “Measuring the Effects of Non-Identical Data Distribution for Federated Visual Classification,” Sep. 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1909.06335>.
- [15] Y. Zhao, M. Li, L. Lai, N. Suda, D. Civin, and V. Chandra, “Federated Learning with Non-IID Data,” 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1806.00582>.
- [16] “PYTORCH,” [Online]. Available: <https://pytorch.org/vision/stable/models.html>.



# Senkrosıkıştırma dönüşümü ve derin transfer öğrenimi ile Alzheimer hastalığının EEG tabanlı otomatik tespiti

## *EEG-based automated detection of Alzheimer's disease by synchrosqueezing transform and deep transfer learning*

Hasan Polat<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Bingöl Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, [hasanpolat@bingol.edu.tr](mailto:hasanpolat@bingol.edu.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5535-4832>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 1 Şubat 2023  
Revizyon 2 Mart 2023  
Kabul 3 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

#### Anahtar Kelimeler:

*Alzheimer hastalığı, Derin öğrenme, EEG, Senkrosıkıştırma, Sınıflandırma, Transfer öğrenimi*

### ÖZ

Alzheimer hastalığı, demansın en sık görülen türü olan ilerleyici bir nörodejeneratif bozukluktur. Hafıza kaybı, bilişsel kabiliyetlerde azalma ve davranışsal sorunlara yol açarak, günlük yaşamı derinden etkilemektedir. Hastalıkla mücadelede en önemli adımlardan biri hızlı ve doğru tanının konmasıdır. Dolayısıyla, bilgisayar destekli tanı sistemlerinin histopatolojik analizlere alternatif olarak geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Alzheimer hastalığının otomatik olarak tespitinde EEG tabanlı bir sınıflandırma modeli tanıtılmıştır. Önerilen model EEG senkrosıkıştırma temsillerinin çeşitli uyarlanmış ön eğitilmiş derin evrişimsel sinir ağı mimariler ile sınıflandırılmasından oluşmaktadır. Senkrosıkıştırma yöntemi, EEG işaretlerini zamanla değişen salınım özelliklerine sahip görüntü örüntülerine dönüştürmek için kullanılmıştır. Akabinde ise EEG görüntüleri ön eğitilmiş SqueezeNet, ResNet, InceptionV3 ve MobileNet derin mimarilerine girdi olarak sunulmuş ve elde edilen sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır. Deneyler, 19 elektrottan (Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, Cz, C3, C4, T3, T4, Pz, P3, P4, T5, T6, O1 ve O2) kayıt edilen EEG işaretlerinin her biri için ayrı ayrı uygulanmıştır. Bulgular P3 ve T5 kanallarının Alzheimer tespitinde en etkin serebral konumlar olduğunu ve en iyi sınıflandırma doğruluğunun InceptionV3 modeli ile elde edildiğini göstermiştir. InceptionV3 modeli ile her iki kanal için sınıflandırma doğrulukları sırasıyla %89.50 ve %90.57 olarak elde edilmiştir. Ayrıca serebral korteksteki elektriksel aktivitelerin hastalığa ilişkin karakteristik dinamikleri en belirgin olarak parietal ve temporal loblarda yansıtıldığı gözlemlenmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 February 2023  
Received in revised form 2 March 2023  
Accepted 3 March 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

*Alzheimer's disease, Deep learning, EEG, Synchrosqueezing, Classification, Transfer learning.*

Doi: 10.24012/dumf.1246052

\* Sorumlu Yazar

### ABSTRACT

Alzheimer's disease is a progressive neurodegenerative disorder that is the most common type of dementia. It profoundly affects daily life by causing memory loss, decreased cognitive abilities, and behavioral problems. In the fight against the disease, one of the most important steps is to make a rapid and accurate diagnosis. Therefore, it is crucial to develop computer-aided diagnosis systems as an alternative to histopathological analyzes. In this paper, an EEG-based classification model was introduced for the automatic detection of Alzheimer's disease. The proposed model is based on classifying EEG synchrosqueezing representations by various fine-tuned pretrained convolutional neural networks. The synchrosqueezing technique was used for converting EEG signals to image pattern that contains components with time-varying oscillatory characteristics. Then, EEG images were presented as input to the pre-trained deep architectures, including SqueezeNet, ResNet, InceptionV3, and MobileNet, and the classification performances obtained were compared. Experiments were performed separately for each of the EEG signals recorded from the 19 scalp electrodes (Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, Cz, C3, C4, T3, T4, Pz, P3, P4, T5, T6, O1, and O2). The results showed that P3 and T5 channels are the most efficient cerebral regions for Alzheimer's detection and InceptionV3 revealed the best performance. The pre-trained InceptionV3 model achieved classification accuracies for both channels as 89.50% and 90.57%, respectively. In addition, it has been observed that the electrical activities in the cerebral cortex reflect characteristic dynamics of the disease most prominently in the parietal and temporal lobes.

## Giriş

Alzheimer hastalığı, demansın ana nedenlerinden biri olan nörolojik bir bozukluktur. Dünya üzerinde yaklaşık olarak 25 milyon insan bu hastalıktan mustarıdır [1]. Alzheimer hastalığı ile birlikte vuku bulan en yaygın semptomlar; dikkat eksikliği, hafıza kaybı ve dil becerileri gibi bilişsel kabiliyetlerde bozulmalar şeklinde kendini göstermektedir [2]. Hastalığın kesin tanısı ancak histopatolojik analizlerle mümkün olduğundan, çeşitli alternatif biyolojik markerlerin referans alınması ile tanıyı destekleyici sistemlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Sistemlerin geliştirilmesinde invaziv olmayan tekniklerin uygulanması tercih edilmektedir. Bu kapsamda, beyin görüntüleme yöntemlerinden manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve elektroensefalografi (EEG) sıklıkla başvurulan tekniklerdir [3].

Beyin görüntüleme yöntemleri özellikle nörolojik hastalıklara ilişkin dinamiklerin irdelenmesinde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Beynin karmaşık olan yapısında hastalıkla birlikte meydana gelen spesifik değişimler beyin görüntüleme yöntemleri ile etkin bir şekilde yansıtılabilir [4]. EEG yönteminin düşük maliyetli oluşu, hızlı bir şekilde erişilebilirliği ve yüksek temporal çözünürlük sunması diğer yöntemlere kıyasla daha popüler bir yaklaşım olmasında esas etkenlerdir [5]. EEG yöntemi ile beyin içerisinde gerçekleşen sinaptik aktiviteler saçlı deriden kayıt edilerek, hastalığın beyin içerisinde etkileri yorumlanabilir. Böylelikle, olası demans tanısının henüz kesinlik kazanmadığı durumlarda hekimler tarafından alternatif tanı yöntemlerinin önü açılabilir [6]. EEG işaretlerindeki salınımların yavaşlaması ve karmaşıklık düzeyinde azalmalar Alzheimer hastalığının neden olduğu en belirgin örüntülerdir [2]. Ancak, EEG işaretlerinin görsel olarak irdelenmesi zaman alıcı olmakla birlikte hata yapma potansiyelini artırır [7]. Manuel analizlere ilişkin söz konusu handikaplar, bilgisayar destekli analizleri elzem kılmaktadır. Bilgisayar destekli tanı sistemlerince ham EEG kayıtlarından hastalığa ilişkin karakteristik özelliklerin tespiti, otomatik ve doğru bir şekilde sağlanabilir. Böylelikle, hastalığın erken veya ilerleyen fazlarında hekimler tarafından yapılacak daha isabetli teşhislerin önü açılabilir.

Literatürde çeşitli makine öğrenimi yaklaşımları kullanarak Alzheimer hastalığının otomatik olarak tanı ve takibi için çok sayıda bilgisayar destekli tanı sistemlerinin geliştirildiği görülebilmektedir. Bu kapsamda önerilen başarılı modeller, konvansiyonel ve derin öğrenme tabanlı olarak kategorize edilebilir. Konvansiyonel modeller, EEG işaretlerinden hastalığa ilişkin ayırt edici özelliklerin manuel olarak ayıklanmasını ve çıkarılan özelliklerin temel sınıflandırıcı algoritmalar ile sınıflandırılmasından oluşmaktadır. EEG işaretlerinden anlamlı özelliklerin çıkarılmasında dalgacık dönüşümü tabanlı yöntemler [8], çeşitli spektral yaklaşımlar [9], [10] ve karmaşıklık analizi [3], [11] başvurulan başlıca tekniklerdir. Sınıflandırıcı algoritma olarak ise çoğunlukla destek vektör makineleri (DVM), k-en yakın komşu algoritması (KNN) ve lineer diskriminant analiz (LDA) gibi araçların kullanıldığı görülebilmektedir. Son yıllarda görüntü işleme, nesne algılama ve ses işaretlerinin analizi gibi birçok alanda büyük bir atılım gösteren derin öğrenme mimarilerinden Alzheimer hastalığının otomatik olarak

tanısında da istifade edilmiştir. Ham verilerden hastalıklara özgü karakteristik özelliklerin otomatik olarak çıkarılması, derin öğrenme mimarilerini güçlü ve popüler kılan en önemli kabiliyettir. Bu çalışmalarda öncelikle, EEG işaretleri görüntü matrisleri olarak yeniden temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, İsmail ve ark. [12] EEG işaretlerinin görüntü formuna dönüştürülmesinde elektrot konumlarını ve alt frekans bilgilerini kullanmışlardır. Elde edilen görüntü matrisleri ESA mimarisi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Rodrigues ve ark. [7] Granger nedensellik, Pearson korelasyonu ve Spearman korelasyon tekniklerini kullanarak EEG işaretlerini matris bağlantıları olarak görüntü formuna dönüştürmüşlerdir. Çok boyutlu EEG örüntüleri basit bir ESA modeli girişine verilerek, önerilen modelin Alzheimer tanısında sunmuş olduğu başarı gözlemlenmiştir. Son olarak, Polat [13] yeni bir zaman-frekans karmaşıklık temsil yöntemi önererek, çok boyutlu karmaşıklık haritalarından EEG tabanlı Alzheimer tespit modeli önermiştir. Mevcut çalışmalarda, derin öğrenme tabanlı yaklaşımların genel olarak klasik yöntemlere kıyasla önemli performans iyileştirmeleri sundukları rapor edilmiştir [14].

Bu çalışmada EEG işaretlerinden Alzheimer hastalığının tespiti amaçlanmıştır. Derin öğrenme mimarilerinin görüntü işleme üzerindeki üstün kabiliyetlerinden etkin şekilde istifade etmek için bir boyutlu zaman serileri olan EEG işaretleri, boyutları artırılarak görüntü matrislerine dönüştürülmüştür. EEG işaretlerine dalgacık tabanlı senkrosıkıştırma yöntemi uygulanarak, çok boyutlu yeni serebral aktivite temsilleri elde edilmiştir. Derin öğrenme yaklaşımları olarak, görsel nesne tanıma modellerinin geliştirilmesi kapsamında ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması (ILSVRC) [15] için geliştirilen başarılı modellerin probleme özgü uyarlanmış modifikasyonları kullanılmıştır. Böylelikle, derin öğrenme mimarilerinin etkin bir şekilde eğitimi için gereken büyük ölçekli veri seti eksikliği dezavantajının üstesinden gelinmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, beyin içerisinde hastalığa özgü aktivitelerin EEG üzerine yansımaları kapsamlı olarak irdelenerek, tanı sistemi için en verimli elektrot konumları ve hastalığın belirgin şekilde ayırt edilebildiği beyin lobları belirlenmiştir.

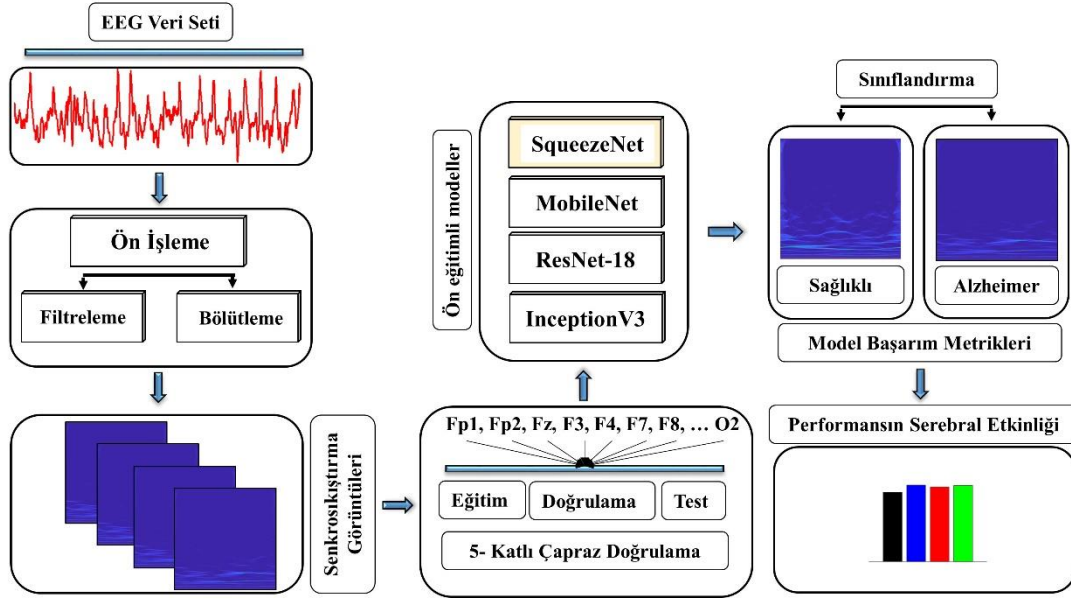
## Materyal ve metot

Bu çalışmada çok boyutlu EEG senkrosıkıştırma temsillerinden Alzheimer hastalığının serebral lob etkinliği ve tespiti amaçlanmıştır. Belirlenen amaçlar doğrultusunda uygulanan sınıflandırma çerçevesinin çekirdek yapıları ve kullanılan EEG verilerine ilişkin detaylar bu bölümde açıklanmaktadır. Önerilen EEG tabanlı otomatik tanı modelinin genel çerçevesi Şekil 1'de tasvir edilmektedir.

### Alzheimer veri Seti

EEG verileri Florida Üniversitesi araştırmacıları tarafından belirli bir paradigma doğrultusunda kayıt edilerek ve kamuya açık bir şekilde erişime sunulmuştur [16]. EEG kayıtlarının alınması, gözler açık ve kapalı olmak üzere iki farklı dinlenme durumunu içeren paradigmalara olarak yürütülmüştür. EEG kayıtları saçlı deri üzerine uluslararası 10-20 konumlandırma sistemi göre yerleştirilen 19 elektrottan (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1 ve O2) alınmıştır [2].





Şekil 1. Önerilen EEG tabanlı otomatik tanı ve değerlendirme modelinin genel çerçevesi

Elektrot etiketlerinde yer alan F, T, C, P ve O harfleri sırasıyla frontal, temporal, santral, parietal ve oksipital lobları ifade etmektedir. EEG kayıtları sağlıklı ve hasta olmak üzere iki gruba ayrıştırılmıştır. Sağlıklı grup, yaş ortalaması  $72 \pm 11$  olan ve daha önce herhangi bir nörolojik rahatsızlık öyküsü bulunmayan 12'sinin gözleri açık ve 12'sin gözleri kapalı olarak EEG kayıtları alınmış toplam 24 katılımcıdan oluşmaktadır. Hasta grup ise Ulusal Nörolojik ve İletişimsel Bozukluklar ve İnme Enstitüsü, Alzheimer Hastalığı ve İlişkili Bozukluklar Derneği (NINCDS ADRDA) kriterlerine uygun olarak Alzheimer tanısı konmuş, ortalama yaşları  $69 \pm 16$  olan 12'sinin gözleri açık ve 12'sin gözleri kapalı olarak EEG kayıtları alınmış 24 bireyden oluşmaktadır [7]. Her iki grupta yer alan bireylere ilişkin sekiz saniyelik EEG kayıtları, örnekleme hızı 128 Hz olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

### EEG işaretlerinin ön işlenmesi

EEG kayıtları göz hareketleri, kas hareketleri ve şebeke gürültüsünden kaynaklanan çeşitli artefaktlardan sıklıkla etkilenmektedir. Söz konusu girişimler, EEG kayıtlarının düşük sinyal gürültü oranına (SNR) sahip olmalarına yol açmaktadır. Bu çalışmada, EEG işaretleri Notch filtre kullanılarak 60 Hz şebeke frekansından arındırılmıştır. EEG işaretlerinden doğru akım (offset) gürültüsünün arındırılması ve önemli alt bantların elde edilmesi için 4. dereceden bant geçiren Butterworth filtresi uygulanmıştır.

Alzheimer hastalığının EEG görüntüleme yöntemi ile analizinde literatürde çoğunlukla 2 saniyelik dönemlerin dikkate alındığı görülmektedir [17]. Bu çalışmada önerilen EEG tabanlı otomatik tanı modeli için 2 saniyelik bölütlerin (epoch) kullanılması uygun bulunmuştur. Böylelikle, her bir katılımcı için sekiz saniyelik kayıtlarından dört EEG bölütü elde edilmiştir. Bölütleme işlemi sonucunda veri seti boyutu dört kat artırılarak, her bir EEG kanalı için 96 sağlıklı ve 96 hasta olmak üzere toplam 192 örüntü dikkate alınmıştır.

### Senkrosıkıştırma yöntemi

Senkrosıkıştırma dönüşümü (SSD) salınım karakteristikleri zamanla değişen çok bileşenli sinyaller için kullanışlı bir zaman-frekans analizi yöntemidir [18]. Birçok farklı uygulama için sinyallerin zamanla değişen spektral özellikleri önem taşımaktadır [19]. Bu kapsamda, kısa zaman Fourier dönüşümü (KZFD), sürekli dalgacık dönüşümü (SDD), Wigner-Ville dağılımı (WVD) gibi çeşitli zaman-frekans analiz yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Önerilen yöntemlerdeki lineer kaynaklı kısıtlamalar senkrosıkıştırma fikrini ortaya çıkarmıştır. SSD tekniği kullanılarak bir zaman-frekans temsil modülünden anlık frekans tahmininin yapılması ile yeniden zaman-frekans temsiline düzenlenmesi gerçekleştirilebilir. Böylelikle, SDD ve KZFD yöntemlerindeki mevcut lineer kısıtlamaların üstesinden gelinebilir. Dalgacık senkrosıkıştırma tekniği SDD ile yürütülen süreci devam ettirerek, lokalize zaman-frekans temsillerini sunmaktadır. Örnek olarak, sayısız bilimsel ve mühendislik uygulamaları için genel bir form olan  $x(t)$  sinyali aşağıdaki Eşitlik 1'deki gibi ifade edilebilir.

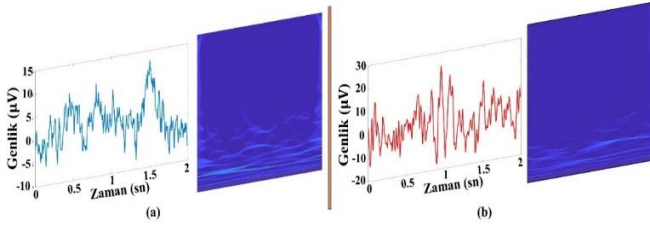
$$x(t) = \sum_{k=1}^k x_k(t) + e(t) \quad (1)$$

Burada her bir  $x(t)$  bileşeni  $x_k(t) = A_k(t) \cos(2\pi\phi_k(t))$  muhtemelen zamanla değişen genlik ve frekans ile Fourier benzeri bir salınım modudur.  $e(t)$  ise gürültü veya ölçüm hatasını temsil etmektedir. SSD yöntemi her bir  $k$  değeri için genlik ( $A_k(t)$ ) ve anlık frekansın ( $\phi_k(t)$ ) elde edilme işlemidir. İşlem üç adımla neticelendirilir. İlk olarak  $x(t)$  sinyalinin sürekli dalgacık dönüşümü alınır. SDD yönteminin matematiksel ifadesi Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$W_x(a, b) = \int a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (2)$$

Burada a ve b sırasıyla ölçekleme ve öteleme parametrelerini,  $W_x(a, b)$  ise SDD fonksiyonunu ifade eder.

SDD yöntemi ile elde edilen zaman-frekans temsillerinin başlangıç değerleri tahmin edilir. Akabinde ise tahmin edilen başlangıç değerleri yeniden atanma yöntemi ile  $W_x(a, b)$  'i sıkıştırmak için yeniden kullanılır [19]. Bu çalışmada, ilk etap olan başlangıç değerlerinin tahmininde Morlet dalgacığı kullanılmıştır. Analizlerin uyguladığı Matlab programlama ortamı tarafından söz konusu dalgacığının otomatik olarak etkin olduğu varsayılmıştır. Şekil 2'de sağlıklı ve hasta bireylerden alınan ham EEG kayıtlarından senkrosıkıştırma yöntemi uygulanarak elde edilen zaman-frekans temsilleri gösterilmektedir. Bir boyutlu sinyallerden 420x560x3 boyutunda oluşturulan görüntüler sırasıyla 224x224x3, 227x227x3 ve 299x299x3 çözünürlüğünde yeniden boyutlandırılmıştır.



Şekil 2. Ham EEG kayıtlarının SSD yöntemi uygulanarak görüntü formunda temsil edilmesi (a): Sağlıklı birey, (b): Alzheimer hastası

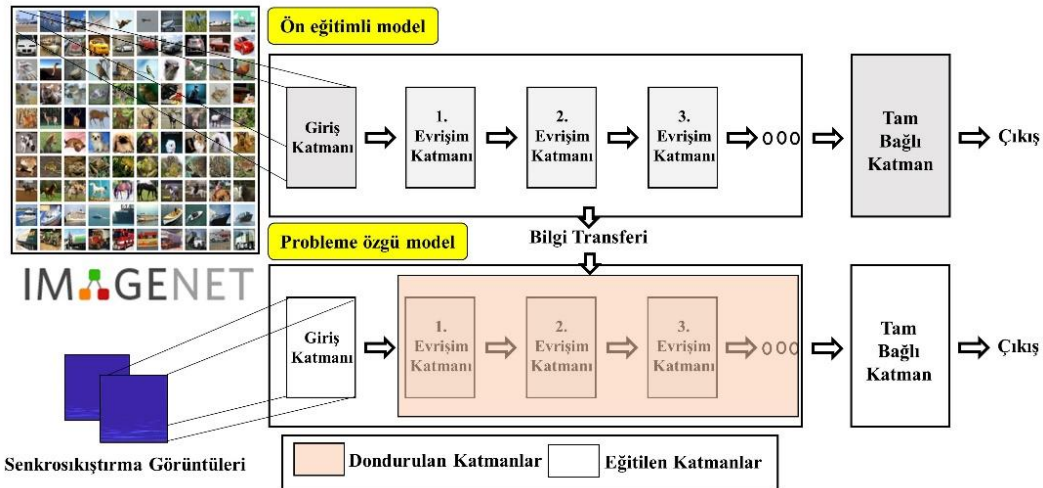
### Ön eğitilmiş modeller ve transfer öğrenimi yaklaşımı

Derin öğrenme modelleri birçok alanda etkili çözümler sunarak, önemli bir potansiyel barındırmaktadır [20]. Karmaşık problemlerde geleneksel makine öğrenme mimarilerinin gereksinim duyduğu manuel özellik çıkarımına ilişkin mevcut handikapların üstesinden gelecek büyük bir atılım sergilemişlerdir. Ancak, derin öğrenme mimarilerinin probleme özgü olarak sil baştan eğitilmeleri aşırı bir

hesaplama gücüne, zamana ve ağırlık genelleştirme yapabileceği büyük veri setlerine olan gereksinimi beraberinde getirmektedir [20], [21]. Transfer öğrenimi yaklaşımı, büyük veri seti üzerinde geliştirilmiş mimarilerin eğitilmiş ağırlıklarının yeniden kullanılması ve probleme özgü uyarlanması ile söz konusu gereksinimlere olan bağımlılığı aşarak etkili çözümlerin elde edilmesine olanak tanımaktadır [21]. Bu çalışmada, kanal bazlı sınırlı sayıda EEG görüntü kümelerinden etkin bir şekilde Alzheimer hastalığının tespiti için transfer öğrenimi yaklaşımı uygulanmıştır. Bu kapsamda, önceden çoklu sınıflandırma problemleri üzerinde eğitilmiş InceptionV3, SqueezeNet, ResNet-18 ve MobileNet mimarileri ayrı ayrı kullanılarak elde edilen sınıflandırma performansları karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te bu çalışmada uygulanan transfer öğrenimi çerçevesi sistematik olarak tasvir edilmektedir.

### SqueezeNet

SqueezeNet, Iandola ve ark. [22] tarafından görüntü tanıma problemlerinde güçlü bir performans sağlaması amacıyla önerilen hafif bir derin öğrenme mimarisidir. Önerilen derin öğrenme mimarilerinin çoğunda genel amacın çeşitli bilgisayarlı görü uygulamalarında tanı, tespit veya segmentasyon doğruluğun artırılması yönünde olduğu görülmektedir. SqueezeNet modelinde ise diğer popüler ESA mimarilerinin sunmuş olduğu doğruluk performansından ödün vermeden çok daha az sayıda eğitebilir parametre içeren bir derin öğrenme mimarisinin tasarlanması amaçlanmıştır [23]. Bu kapsamda, sıkıştırılmış ve genişletilmiş katmanlardan oluşan ateşleme modülleri önerilmiştir. Ateşleme modülleri, 1x1 boyutunda evrişim kernellerinin kullanıldığı sıkıştırılmış katman ve 1x1 ve 3x3 boyutunda evrişim kernellerinin birlikte kullanıldığı genişletilmiş katmanların aktif bir şekilde kullanılması prensibine dayanır [24]. Ateşleme modülünde 3x3 filtreler yerine 1x1 boyutunda darboğaz filtreler kullanılarak, hesaplama maliyeti azaltılmıştır. Önerilen SqueezeNet modeli ile IMAGENET çok ölçekli görüntü tanıma yarışmasında AlexNet modelinin sunmuş olduğu doğruluk performansı, 50 kat daha az parametre kullanılarak elde edilmiştir [22].



Şekil 3. Transfer öğrenimi yaklaşımı

## MobileNet

MobileNet ve varyantları mobil ve donanımsal bilgisayarlı görü uygulamaları için önerilen verimli derin öğrenme modelleridir [25], [26]. Ağların diğer derin mimarilere kıyasla öne çıkan yönleri, çok az sayıda eğitilebilir parametrelere sahip olmalarıdır. MobileNet mimarisinde e az sayıda eğitilebilir parametre sayısı derinlemesine ayrılabilir evrişim filtrelerinin kullanılması ile sağlanmaktadır. Derinlemesine ayrılabilir filtreler, evrişim filtrelerinin çarpanlarına ayrılması mantığına dayanmaktadır. Ağdaki standart evrişim filtreleri, derinlemesine ve 1x1 boyutlu noktasal evrişim filtrelerine ayrıştırılır. Derinlemesine evrişim işlemi ile her giriş kanalına tek bir filtre uygulanır. Akabinde, 1x1 boyutunda noktasal evrişim uygulayarak çıktıları derinlemesine evrişimle birleştirir. Derinlemesine ayrılabilir evrişimin aynı süreci filtreleme ve birleştirme olmak üzere iki katmanda gerçekleştirmesi, hesaplama maliyeti ve model boyutunun büyük ölçüde düşürülmesine neden olur [25]. Böylelikle, donanımsal olarak uygulanabilir ve seri çalışan bir derin mimarinin tasarımı mümkün olmaktadır.

## InceptionV3

Bir GoogleNet versiyonu olan InceptionV3 mimarisi, selefleri olan mimarilerin (InceptionV1 ve InceptionV2) başlangıç yapılarının yeniden dizayn edilmesi ile türetilmiştir [27]. InceptionV3 görüntü tanıma problemlerinde ilgilenilen bölgelere ilişkin aşırı konum değişkenlik sorunlarını ele almaktadır. Bu kapsamda, aynı düzeyde filtreler birleştirilerek ağı etkin bir şekilde genişletilmesi sağlanır [20]. InceptionV3, seleflerine kıyasladığında küçük evrişim operatörlerinin elde edilmesi için bir evrişimsel bölme yöntemi kullanır [28]. Bu yöntem ile ( $n \times n$ ) boyutunda evrişim filtreleri ( $n \times 1$ ) ve ( $1 \times n$ ) boyutlu filtrelere bölünerek, ağ içerisinde eğitilebilir parametre sayısı azaltılır. Böylelikle, ağ girişine sunulan görüntülerden daha etkin bir şekilde uzamsal özelliklerin çıkartılması ve ağı daha kısa sürede eğitilmesi mümkün kılınır [28].

## ResNet-18

Görüntü işleme üzerindeki mevcut performansın artırılması için derin mimarilere yeni katmanlar eklenerek ESA modelleri daha da derinleştirilmiştir. Ancak, artan derinlik ile birlikte performansın artmadığı gözlemlenmiştir. Derinlik artıkça ortaya çıkan kaybolan veya patlayan gradyan sorunu

eğitim performansını olumsuz etkilemiştir [29]. Daha derin mimarilerin söz konusu handikaplardan bağımsız bir şekilde dizayn edilmesi için He ve ark. [30] tarafından artık ağ çerçevesi önerilmiştir. Önerilen çerçeve, ağ yapısında artan derinlikle birlikte doğru orantılı olarak sınıflandırma doğruluğunun artırıldığını kanıtlamıştır [30]. Artık bloklara dayanan mimari, IMAGENET veri seti üzerinde diğer mimarilere kıyasla daha derin olmasına rağmen daha az kompleks olan yapısı ile üstün bir başarı sergilemiştir. Bu çalışmada, katman sayısına göre farklı varyantları bulunan artık ağlar içerisinde ResNet-18 mimarisi kullanılmıştır. Ağ içerisinde parametre sayısının diğer varyantlarına göre daha az olması, EEG senkrosıkıştırma temsillerinden Alzheimer tespitinde kullanılmasının başlıca motivasyon kaynağı olmuştur.

## Model eğitim parametreleri ve performans metrikleri

Bu çalışmada, her bir EEG kanalından alınan sınırlı sayıda görüntü olarak derin transfer öğrenimi tabanlı bir otomatik Alzheimer tanı modeli önerilmiştir. Veri setinin kısıtlılığından kaynaklı dezavantajın gelmek için çok ölçekli görüntü veri setleri üzerinde önceden eğitilmiş olan SqueezeNet, MobileNet, ResNet-18 ve InceptionV3 mimarileri kullanılmıştır. Bu kapsamda, evrişim bloklarını dondurulup ve eğitilmiş ağırlıkların transfer edilmesi ile aşırı uyumlama riskinin üstesinden gelinmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan sınıflandırma modellerine ilişkin her bir yinelemede alınan örnek sayısı (mini-batch size), maksimum yapılan tam tur (epoch) sayısı, giriş katman boyutları, ve aktivasyon fonksiyonu gibi parametrelere ilişkin bilgiler Tablo 1’de detaylandırılmıştır.

## Bulgular

EEG işaretlerinden Alzheimer hastalığının otomatik olarak tespiti kapsamında bütün analizler Matlab programlama ortamında çalıştırılmıştır. Önerilen modelin güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için beş katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Her bir EEG kanalı için 96 sağlıklı ve 96 hasta olmak üzere toplamda 192 görüntü dikkate alınmıştır. Serebral lob etkinliğinin kapsamlı olarak irdelenmesinde ise senrosıkıştırma yöntemi ile elde edilen  $192 \times 19 = 3648$  görüntü dikkate alınmıştır. Görüntü verilerinin %60’ı ağı eğitimi, %20’si doğrulama ve geriye kalan %20’si ise ağı testi için alt gruplara ayrıştırılmıştır.

Tablo 1. Ön eğitilmiş modellere ilişkin parametreler

Model Parametreleri	SqueezeNet	MobileNetV2	ResNet-18	InceptionV3
Giriş görüntü boyutu	227x227x3	224x224x3	224x224x3	299x299x3
Model Boyutu	0.723522M	2.209378 M	21.774450M	11.172738M
Mini-batch boyutu	32	32	32	32
Epoch sayısı	30	30	30	30
Başlangıç Öğrenme Oranı	0.001	0.001	0.001	0.001
İyileştirici	Adam	Adam	Adam	Adam
Aktivasyon Fonksiyonu	ReLU	Kırılmış ReLU	ReLU	ReLU
Çıkış Katmanı	Softmax	Softmax	Softmax	Softmax

EEG işaretlerinden Alzheimer tespitinde önerilen modeller tarafından sunulan performanslar sırasıyla doğruluk, özgüllük, duyarlılık, kesinlik, F-skor ve AUC başarımları

metrikleri türünden değerlendirilmiştir. Tablo 2 ve 3'te EEG kanalları için elde edilen sınıflandırma performansları gösterilmektedir

Tablo 2. Her bir EEG kanalı için uygulanan sınıflandırma modelinin doğruluk, özgüllük ve duyarlılık model başarımları türünden performans sonuçları

%	Doğruluk				Özgüllük				Duyarlılık			
	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.
<b>Fp1</b>	61.84	71.81	67.57	70.23	68.84	69.63	67.47	69.57	54.84	74.00	67.68	70.89
<b>Fp2</b>	56.13	66.57	62.97	60.78	59.00	63.47	66.63	60.36	53.26	69.68	59.31	61.21
<b>F7</b>	60.97	66.15	61.84	71.78	53.47	65.73	68.68	72.84	68.47	66.57	55.00	70.73
<b>F3</b>	65.52	70.23	70.21	76.97	82.21	62.47	72.84	75.89	48.84	78.00	67.57	78.05
<b>Fz</b>	64.63	70.86	71.28	74.39	69.68	70.73	71.84	73.84	59.57	71.00	70.73	74.94
<b>F4</b>	66.65	71.26	70.18	71.31	84.26	72.78	70.63	73.89	49.05	69.73	69.73	68.73
<b>F8</b>	68.05	62.34	66.52	67.00	69.73	60.26	63.31	62.26	66.36	64.42	69.73	71.73
<b>T3</b>	73.00	77.68	77.68	76.65	71.94	76.05	77.00	70.78	74.05	79.31	78.36	82.52
<b>C3</b>	69.89	76.02	74.94	79.65	70.68	70.78	72.89	70.84	69.10	81.26	77.00	88.47
<b>Cz</b>	69.21	70.81	71.36	70.78	74.78	68.68	76.94	70.73	63.63	72.94	65.78	70.84
<b>C4</b>	74.39	78.07	69.65	73.34	84.21	83.26	68.63	71.78	64.57	72.89	70.68	74.89
<b>T4</b>	69.76	68.02	75.44	80.10	60.31	54.84	76.89	68.57	79.21	81.21	74.00	91.63
<b>T5</b>	74.60	87.94	85.92	90.57	68.15	85.36	87.52	87.36	81.05	90.52	84.31	93.78
<b>P3</b>	77.68	87.92	88.50	89.50	67.63	87.42	87.42	90.52	87.73	88.42	89.57	88.47
<b>Pz</b>	81.28	77.57	76.60	80.13	90.52	77.94	84.42	75.89	72.05	77.21	68.78	84.36
<b>P4</b>	70.73	81.65	79.60	82.13	86.31	82.15	79.10	81.10	55.15	81.15	80.10	83.15
<b>T6</b>	77.07	80.15	79.10	81.31	80.00	85.36	82.26	80.31	74.15	74.94	75.94	82.31
<b>O1</b>	74.05	81.78	79.84	81.26	81.42	80.15	81.47	82.31	66.68	83.42	78.21	80.21
<b>O2</b>	69.94	82.86	85.50	86.02	66.78	86.47	89.57	86.57	73.10	79.26	81.42	85.47

Not: Squ: SqueezeNet, Res: ResNet-18, Mob: MobileNet ve Inc: InceptionV3 modellerini ifade etmektedir.

Tablo 3. Her bir EEG kanalı için uygulanan sınıflandırma modelinin kesinlik, F-skor ve AUC model başarımları türünden performans sonuçları

%	Kesinlik				F1-skor				AUC			
	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.
<b>Fp1</b>	65.64	71.13	68.62	71.05	50.85	70.34	67.06	69.37	70.19	80.33	77.46	74.52
<b>Fp2</b>	59.02	63.98	61.84	60.64	54.07	64.97	58.72	58.25	57.00	72.24	68.39	68.51
<b>F7</b>	62.31	66.41	62.83	73.80	61.90	65.52	56.16	71.42	71.09	72.09	68.63	80.51
<b>F3</b>	75.56	67.86	71.18	77.37	55.44	72.40	69.29	77.29	82.64	79.82	74.48	84.00
<b>Fz</b>	66.00	71.12	72.03	74.43	61.59	70.63	71.22	74.21	70.23	80.00	75.65	82.31
<b>F4</b>	83.77	72.82	73.70	72.87	56.94	70.96	70.94	70.64	80.82	79.73	80.07	78.37
<b>F8</b>	68.19	62.79	67.19	66.64	66.80	62.89	68.07	68.33	74.56	66.36	69.98	71.68
<b>T3</b>	74.08	76.90	78.06	73.98	72.79	77.94	77.49	77.60	79.37	83.08	84.12	83.60
<b>C3</b>	72.43	73.96	73.38	75.09	68.61	77.26	74.47	81.13	73.79	87.92	85.26	86.77
<b>Cz</b>	76.51	70.25	74.75	72.21	67.79	71.45	69.19	71.03	76.31	75.29	76.74	76.75
<b>C4</b>	84.01	82.90	70.46	72.81	71.00	76.63	70.04	73.79	79.75	83.77	78.82	78.16
<b>T4</b>	68.12	67.05	77.89	75.12	72.80	72.66	75.27	82.40	73.75	78.75	85.43	86.35
<b>T5</b>	75.33	86.20	87.66	88.87	76.71	88.27	85.73	91.00	86.32	92.75	90.44	95.68
<b>P3</b>	76.83	87.78	88.10	90.73	80.35	87.90	88.50	89.25	88.90	94.12	95.55	97.46
<b>Pz</b>	89.66	78.97	81.36	78.25	78.73	77.39	74.03	81.02	87.63	86.28	86.03	88.68
<b>P4</b>	81.89	81.97	79.25	82.01	64.68	81.53	79.62	82.37	77.53	89.46	87.66	87.96
<b>T6</b>	82.28	85.70	81.33	81.46	76.44	79.18	78.37	81.55	86.07	88.81	87.65	91.75
<b>O1</b>	81.33	81.43	81.70	82.90	70.58	81.91	79.63	80.81	85.09	88.75	83.40	88.29
<b>O2</b>	69.44	85.23	89.25	86.58	70.65	82.02	84.65	85.99	78.81	89.73	90.36	92.68

Not: Squ: SqueezeNet, Res: ResNet-18, Mob: MobileNetV2 ve Inc: InceptionV3 modellerini ifade etmektedir.

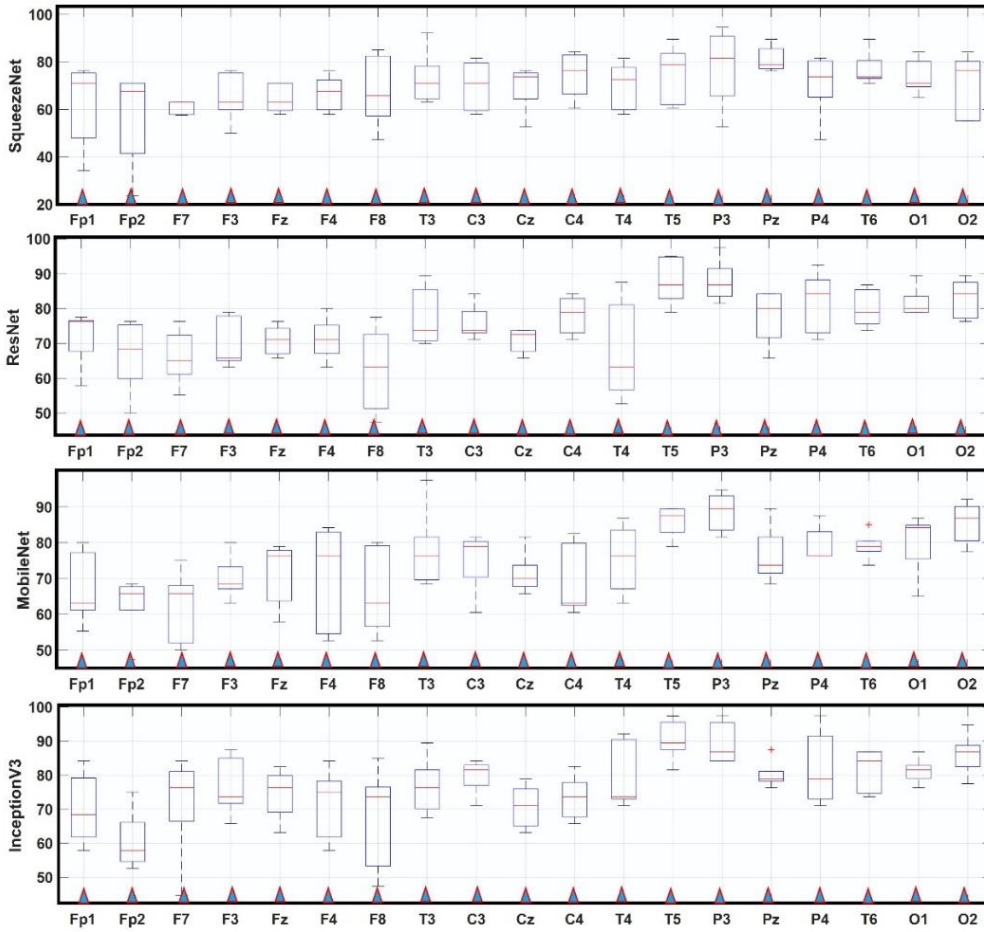
Tablo 2 ve 3'te görüldüğü üzere her bir EEG kanalı için elde edilen sınıflandırma başarımları farklılık göstermektedir. Önerilen ön eğitilmiş dört farklı model için EEG işaretlerinden Alzheimer tespitinin en verimli olarak P3 ve T5 kanallarından alınan kayıtlar ile gerçekleştiği belirlenmiştir. T5 kanalı için SqueezeNet, ResNet-18, MobileNet ve InceptionV3 mimarileri ile sınıflandırma doğrulukları sırasıyla %74.60, %87.94, %85.92 ve %90.50 olarak elde edilmiştir. P3

elektrotundan alınan kayıtlar için ise sınıflandırma doğrulukları sırasıyla %77.68, %87.92, %88.50 ve %89.50 olarak elde edilmiştir. Her iki kanala ilişkin serebral konumlarının birbirine yakın olması, ilgili bölgenin Alzheimer hastalığı için önemli dinamikleri barındırdığını göstermektedir. Her iki kanal için de InceptionV3 modelimin en etkin performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Farklı beyin lobları kıyaslandığında ise genel olarak tempoaral ve parietal

loblara ait EEG kanalları için elde edilen performansların iyi bir seviyede oldukları rapor edilmiştir. Temporal lob için InceptionV3 tabanlı tanı sisteminin %76.65 ile %90.57 oranında değişen bir aralıkta doğruluk performansı sunduğu gözlemlenmiştir. Parietal lob üzerinde bulunana kanallar için InceptionV3 modeli tarafından %80.13 ile %82.13 aralığında değişen bir doğrulukla daha kararlı bir sınıflandırma performansı sunulmuştur. Eğitilebilir parametre sayısı açısından InceptionV3 ile kıyaslandığında neredeyse beş kat daha küçük bir mimariye sahip olan MobileNet mimarisi ise P3 ve T5 kanalları için sırasıyla %88.50 ve %85.92 oranında bir sınıflandırma doğruluğu ile rekabetçi bir performans sergilemiştir. Prefrontal lob üzerine yerleştirilen elektrotlardan alınan kayıtlar için ise genel olarak sınıflandırma performansının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Fp1 ve Fp2 kanalları için dört derin mimari ile sırasıyla

%61.84-%71.81 ve %56.13-%66.57 aralıklarında değişen zayıf bir tanı performansı rapor edilmiştir.

Farklı ön eğitilmiş mimarilerinin kullanıldığı otomatik tanı çerçevelerinin EEG işaretlerinden Alzheimer tespitinde sunmuş oldukları performansların güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için eğitim aşamasında beş katlı çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Böylelikle, veri setinde yer alan her bir örüntünün eğitim, doğrulama ve test grubunda olma ihtimallerine ilişkin bütün senaryolar denenmiştir. Önerilen modeller tarafından sergilenen performansların sınıflandırma katlarına göre dağılımları irdelenmeye çalışılmıştır. Şekil 4'te önerilen otomatik Alzheimer tespit modellerinin eğitim ve test aşamasında farklı veri senaryolarına göre sergilemiş oldukları performans dağılımları doğruluk başarı metriği türünden kutu grafikleri olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4. Dört farklı ön eğitilmiş mimarinin her bir EEG kanalı için beş katlı çapraz doğrulama performans dağılımının doğruluk metriği türünden kutu grafikleri

Şekil 4'te temporal ve parietal lob kanallarına ilişkin dört mimari tarafından genel olarak yüksek doğruluk performansı sunulduğu ve performans dağılımlarının farklı sınıflandırma katlarında düşük varyansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, T5 ve P3 kanallarından alınan EEG kayıtlarından Alzheimer tespitinin tüm veri seti için başarılı bir şekilde gerçekleştiğini ortaya çıkarmaktadır. Derin ağlara eğitim aşamasında gösterilmeyen test verilerinin farklı olduğu her sınıflandırma katı için önerilen modellerin söz konusu EEG kanallarında kararlı sonuçlar sunduğu gözlemlenmiştir. Diğer

serebral loblara kıyasla sınıflandırma performansının genel olarak en düşük seviyede gözlemlendiği prefrontal lob kanalları için beş katlı çapraz doğrulama sürecinde de benzer çıktılar sergilendiği belirlenmiştir. Fp1 ve Fp2 elektrotlarından alınan EEG kayıtları için beş katlı çapraz doğrulama sürecinde en yüksek varyansın sergilendiği rapor edilmiştir. Kutu grafikleri referans alınarak beş katlı çapraz doğrulama sonuçlarının genel olarak irdelenmesi ile parietal ve temporal loblardan alınan EEG kayıtlarına ilişkin performansların daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. Beyin loblarına ilişkin dört model tarafından sunulan doğruluk, özgüllük, duyarlılık model başarımlarının sonuçları

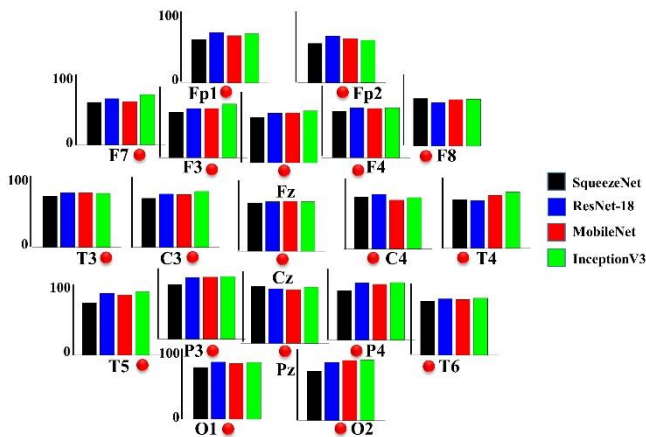
%	Doğruluk				Özgüllük				Duyarlılık			
	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.	Squ.	Res.	Mob.	Inc.
<b>Frontal</b>	63.40	68.46	67.22	70.35	69.60	66.44	68.77	69.81	57.20	70.48	65.68	70.90
<b>Temporal</b>	73.61	78.45	79.53	82.16	70.10	75.40	80.92	76.76	77.11	81.50	78.15	87.56
<b>Parietal</b>	76.57	82.38	81.57	83.92	81.49	82.50	83.64	82.50	71.64	82.26	79.49	85.33
<b>Santral</b>	71.16	74.97	71.99	74.59	76.56	74.24	72.82	71.12	65.77	75.70	71.15	78.07
<b>Oksipital</b>	72.00	82.32	82.67	83.64	74.10	83.31	85.52	84.44	69.89	81.34	79.81	82.84

Not: Squ: SqueezeNet, Res: ResNet-18, Mob: MobileNet ve Inc: InceptionV3 modellerini ifade etmektedir.

### Alzheimer hastalığı tespitinde beyin loblarının etkinliği

Bu bölümde, önerilen modellerin serebral loblara göre genel olarak sergiledikleri performans dağılımları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, her bir EEG kanalı, ait olduğu serebral lob sınıfına atanarak sınıf üyeleri tarafından sağlanan performansların ortalaması alınmıştır. Tablo 4'te dört ön eğitilmiş mimariye dayanan transfer öğrenimi yaklaşımı ile sırasıyla frontal, temporal, parietal, santral ve oksipital loblar için elde edilen ortalama sınıflandırma başarımları gösterilmektedir.

Tablo 4'te parietal ve oksipital loblar için genel olarak en yüksek ortalama başarımların elde edildiği tespit edilmiştir. Parietal lob için dört model tarafından sunulan genel sınıflandırma performansı doğruluk türünden sırasıyla %76.57, %82.38, %81.57 ve %83.92 olarak elde edilmiştir. Oksipital lob için ise genel sınıflandırma performansı doğruluk türünden sırasıyla %72.00, %82.32, %82.67 ve %83.64 olarak elde edilmiştir. Frontal lobun diğer beyin bölgelerine kıyasla Alzheimer tespitinde en düşük performansı sunduğu tespit edilmiştir. Frontal lob EEG kanallarından alınan kayıtlar için elde edilen ortalama sınıflandırma başarımları doğruluk metriği türünden sırasıyla %63.40, %68.46, %67.22 ve %70.35 olarak elde edilmiştir. Farklı mimari tabanlı önerilen otomatik tanı modellerinin elektrot konumlarına göre sergilemiş oldukları doğruluk performansları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Farklı mimarilerin elektrot konumlarına göre sergilemiş oldukları doğruluk performansları

Şekil 5'te beynin sol arka yarımküresinden (hemisfer) alınan EEG kayıtlarının Alzheimer hastalığına ilişkin ayırt edici özellikleri etkin bir şekilde yansıttığı görülebilmektedir. Genel olarak sol hemisfer bölgesinin Alzheimer tespitinde daha etkin bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Sol hemisfer parietal ve temporal lobları için sınıflandırma performansının

maksimum olduğu görsel bulgularla kanıtlanmıştır. Serebral loblar için genel değerlendirme neticesinde, parietal ve temporal bölgelerinden hastalığa ilişkin önemli dinamiklerin en verimli şekilde yakalanabileceği kanısına varılmıştır. Ayrıca, InceptionV3 tabanlı tanı çerçevesinin diğer modellere kıyasla daha etkin olduğu görsel bulgularla pekiştirilmiştir.

### Tartışma

EEG işaretlerinin zaman-frekans alanında görüntü formunda temsil edilerek, çeşitli nörolojik hastalıkların derin öğrenme yaklaşımları ile analiz edildiği çalışmalar git gide artmaktadır [7], [12], [31]–[33]. Bu kapsamda, sıklıkla KZFD ve SDD yöntemlerine başvurulmaktadır [34], [35]. KZFD tekniğinin sabit pencereler ve sinüzoidal sinyal tabanlı olması nedeniyle boyut artırımı sırasında durağan olmayan özelliklerin verimli şekilde yansıtılması sektöre uymamaktadır. Diğer bir yöntem olan dalgacık dönüşümü, analizi yapılan sinyallerin yüksek frekans bölgesinde dar, alçak frekans bölgesinde ise geniş pencereler kullanabilme kabiliyeti ile durağan olmayan bilgilerin ayıklanmasında nispeten daha avantajlıdır. Ancak, sinyallerin analizinde uygun ana dalgacık seçimi sorunu ve zaman-frekans çözünürlük handikapları alternatif yöntemlerin gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmada, EEG işaretlerinin zaman-frekans alanında daha net gösterimleri için senkrosıkıştırma yöntemi uygulanmış ve elde edilen başarılı sınıflandırma sonuçları yöntemin etkinliğini kanıtlamıştır. Senkrosıkıştırma görüntü temsillerinden InceptionV3 mimarisinin T5 ve P3 kanalları için sırasıyla %90.57 ve %89.50 oranında bir doğruluk sunması, isabetli bir seçimin göstergesidir.

EEG tabanlı Alzheimer tespitinde karakteristik dinamikleri yansıtan beyin bölgeleri önem taşımaktadır. Hastalıkla ilişkili beyin bölgesinin tespiti ile ilgili serebral korteksin sorumlu olduğu fonksiyonlar ve Alzheimer arasındaki ilişki tespit edilebilir. Alzheimer hastalığı ile ilişkili dinamiklerin sol parietal ve temporal lobda etkin olarak gözlemlendiği geçmiş çalışmalarda rapor edilmiştir [2], [36]. Önerilen modellerin genel olarak en yüksek başarımları P3 ve T5 EEG kanalları için sunmuş olmaları, bu çalışmanın literatürü destekler niteliğinde ön plana çıkarmaktadır.

EEG işaretlerindeki ayırt edici özelliklerin ayıklanması, ilgilenilen problemlere özgü yöntemlerin uygulanmasını gerektirir. Anlamlı bilgilerin manuel olarak çıkarılması çoğunlukla deneme-yanılma yoluyla veya geçmiş çalışmalar referans alınarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla, EEG işaretlerinin konvansiyonel yaklaşımlar ile işlenmesi araştırmacılar için aşırı iş yükünü beraberinde getirir. Bu çalışmada EEG işaretlerinden Alzheimer hastalığının tespitinde herhangi bir manuel özellik çıkarım tekniğine başvurulmadan başarılı bir düzeyde tespit sonuçları elde

edilmiştir. Sonuçlar derin öğrenmenin EEG analizindeki etkinliğini ve fizibilitesini ortaya koymaktadır. Tablo 5'te Alzheimer hastalığının EEG işaretlerinden otomatik olarak

tanısında araştırmacılar tarafından önerilen son teknoloji modeller ile bu çalışmada elde edilen sınıflandırma başarımları karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. Önerilen model tarafından sunulan sınıflandırma performansının diğer çalışmalar ile karşılaştırılması

Yazar	Katılıcı Sayısı	Özellik Çıkarımı	Sınıflandırıcı	Doğruluk (%)
Tzimourta ve ark. [10]	10 SK, 14 AH	Spektral enerji, Shannon entropi, Permütasyon entropi.	Rastgele orman	91.80
Chen ve ark. [8]	15 SK, 15 AH	Çapraz korelasyon katsayıları, Dalgalanma analizi	LDA	90.00
Kulkarni ve ark. [37]	15 SK, 15 AH	Spektral analiz yöntemleri	DVM	96.00
Rodrigues ve ark. [7]	24 SK, 24 AH	Granger nedenselliği, Pearson ve Spearman korelasyon katsayıları	ESA	92.00
Ruiz-Gómez ve ark. [9]	37 SK, 37 OBB, 37 AH	Spektral ve lineer olmayan özellikler	Çok katmanlı sinir ağı (MLPNN)	78.43
Polat [13]	24 SK, 24 AH	Zaman-frekans karmaşıklık haritası: Complexogram	MobileNetV2	100
Ismail ve ark. [12]	20 SK, 16 AH	Frekans alt bantlarının azimut projeksiyonu tabanlı görüntü temsilleri	ESA ve Uzun kısa süreli bellek ağı (LSTM)	90.15
Bariagi [38]	20 SK, 16 AH	Spektral ve dalgacık tabanlı özelliklerin kombinasyonu	DVM KNN	94.00 92.00
Bu çalışma	24 SK, 24 AH	EEG senkrosıkıştırma temsilleri	InceptionV3	90.57

SK: Sağlıklı kontrol, AH: Alzheimer hastası, OBB: Orta dereceli bilişsel bozukluğu bulunan hasta

## Sonuç

Bu çalışmada, EEG işaretlerinden Alzheimer hastalığının otomatik olarak tespitinde senkrosıkıştırma tekniği ve transfer öğrenimine dayanan bir model önerilmiştir. EEG kanallarının ayrı ayrı değerlendirmeye alınması ile serebral korteksin hastalıkla ilişkili bölgelerinin tespiti de gerçekleştirilmiştir. Önerilen genel çerçevenin EEG tabanlı Alzheimer analizinde kapsamlı ve dikkate değer bulgular sunduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın bu yönüyle literatüre katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

Çalışmanın en büyük handikabı olarak, dikkate alınan veri setinin büyüklüğü gösterilebilir. Derin mimarilerinin özellikle büyük eğitim verileri üzerinde muazzam bir performans sergilediği bilinmektedir. Ancak, söz konusu sınırlamaya rağmen transfer öğrenimi yaklaşımı ile elde edilen bulguların tatmin edici ve literatürle destekler nitelikte olması, önerilen modelin potansiyelini ortaya koymaktadır. İleriki çalışmalarda, çeşitli veri artırımı yöntemleri

uygulanarak yapay görüntülerin kullanılması ile mevcut başarımın artırılması planlanmaktadır.

## Etik beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

## Çıkar çatışması beyanı

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

## Kaynaklar

- [1] P. A. M. Kanda, E. F. Oliveira, and F. J. Fraga, “EEG epochs with less alpha rhythm improve discrimination of mild Alzheimer’s,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 138, pp. 13–22, 2017, doi: 10.1016/j.cmpb.2016.09.023.

- [2] A. M. Pineda, F. M. Ramos, L. E. Betting, and A. S. L. O. Campanharo, "Quantile graphs for EEG-based diagnosis of Alzheimer's disease," *PLoS One*, vol. 15, no. 6, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0231169.
- [3] L. Tylová, J. Kukal, V. Hubata-Vacek, and O. Vyšata, "Unbiased estimation of permutation entropy in EEG analysis for Alzheimer's disease classification," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 39, pp. 424–430, 2018, doi: 10.1016/j.bspc.2017.08.012.
- [4] E. Fide, H. Polat, G. Yener, and M. S. Özerdem, "Effects of Pharmacological Treatments in Alzheimer's Disease: Permutation Entropy-Based EEG Complexity Study," *Brain Topogr.*, no. 0123456789, 2022, doi: 10.1007/s10548-022-00927-8.
- [5] P. Zhao, P. Van-Eetvelt, C. Goh, N. Hudson, S. Wimalaratna, and E. Ifechor, "Characterization of EEGs in alzheimer's disease using information theoretic methods," *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. - Proc.*, pp. 5127–5131, 2007, doi: 10.1109/IEMBS.2007.4353494.
- [6] L. R. Trambaiolli, N. Spolaôr, A. C. Lorena, R. Anghinah, and J. R. Sato, "Feature selection before EEG classification supports the diagnosis of Alzheimer's disease," *Clin. Neurophysiol.*, vol. 128, no. 10, pp. 2058–2067, 2017, doi: 10.1016/j.clinph.2017.06.251.
- [7] F. A. Rodrigues, C. Alves, A. Pineda, K. Roster, and C. Thielemann, "EEG functional connectivity and deep learning for automatic diagnosis of brain disorders: Alzheimer's disease and schizophrenia," *J. Phys. Complex.*, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1088/2632-072x/ac5f8d.
- [8] Y. Chen *et al.*, "DCCA cross-correlation coefficients reveals the change of both synchronization and oscillation in EEG of Alzheimer disease patients," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 490, pp. 171–184, 2018, doi: 10.1016/j.physa.2017.08.009.
- [9] S. J. Ruiz-Gómez *et al.*, "Automated multiclass classification of spontaneous EEG activity in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment," *Entropy*, vol. 20, no. 1, pp. 1–15, 2018, doi: 10.3390/e20010035.
- [10] K. D. Tzimourta *et al.*, "EEG window length evaluation for the detection of Alzheimer's disease over different brain regions," *Brain Sci.*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/brainsci9040081.
- [11] Y. Zhang and S. Wang, "Detection of Alzheimer's disease by displacement field and machine learning," *PeerJ*, vol. 2015, no. 9, pp. 1–29, 2015, doi: 10.7717/peerj.1251.
- [12] M. Ismail, K. Hofmann, and M. A. A. El Ghany, "Early Diagnoses of Alzheimer using EEG data and Deep Neural Networks classification," *2019 IEEE Glob. Conf. Internet Things, GCIoT 2019*, 2019, doi: 10.1109/GCIoT47977.2019.9058417.
- [13] H. Polat, "Time-Frequency Complexity Maps for EEG-Based Diagnosis of Alzheimer ' s Disease Using a Lightweight Deep Neural Network" *Traitement du Signal*, vol. 39, no. 6, pp. 2102-2113, 2022, doi: 10.18280/ts.390623.
- [14] M. Raza, M. Awais, W. Ellahi, N. Aslam, H. X. Nguyen, and H. Le-Minh, "Diagnosis and monitoring of Alzheimer's patients using classical and deep learning techniques," *Expert Syst. Appl.*, vol. 136, pp. 353–364, 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.06.038.
- [15] O. Russakovsky *et al.*, "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 115, no. 3, pp. 211–252, 2015, doi: 10.1007/s11263-015-0816-y.
- [16] A. S. L. O. Campanharo, F. M. Ramos, A. M. Pineda, and L. E. Betting, "Data from: Quantile Graphs for EEG-Based Diagnosis of Alzheimer's Disease," 2020, doi: 10.17605/OSF.IO/S74QF.
- [17] R. Cassani, M. Estarellas, R. San-Martin, F. J. Fraga, and T. H. Falk, "Systematic review on resting-state EEG for Alzheimer's disease diagnosis and progression assessment," *Dis. Markers*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5174815.
- [18] F. Auger *et al.*, "Time-frequency reassignment and synchrosqueezing: An overview," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 6, pp. 32–41, 2013, doi: 10.1109/MSP.2013.2265316.
- [19] G. Thakur, E. Brevdo, N. S. Fučkar, and H. T. Wu, "The Synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: Robustness properties and new paleoclimate applications," *Signal Processing*, vol. 93, no. 5, pp. 1079–1094, 2013, doi: 10.1016/j.sigpro.2012.11.029.
- [20] N. D. Kathamuthu *et al.*, "A deep transfer learning-based convolution neural network model for COVID-19 detection using Computed tomography scan images for medical applications," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 175, no. August 2022, p. 103317, 2022, doi: 10.1016/j.advengsoft.2022.103317.
- [21] R. Naga Swetha, V. K. Shrivastava, and K. Parvathi, "Multiclass skin lesion classification using image augmentation technique and transfer learning models," *Int. J. Intell. Unmanned Syst.*, 2021, doi: 10.1108/IJIUS-02-2021-0010.
- [22] F. N. Iandola, S. Han, M. W. Moskewicz, K. Ashraf, W. J. Dally, and K. Keutzer, "SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size," pp. 1–13, 2016, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1602.07360>.
- [23] H. Polat and M. S. Özerdem, "Derin Transfer Öğrenimi Yaklaşımı ile Kamusal Alanda Medikal Maske Kullanımının Otomatik Kontrolü," *Türk Doğa ve Fen Derg.*, vol. 10, no. 2, pp. 191–198, 2021, doi: 10.46810/tdfd.948098.
- [24] A. S. Gaikwad and M. El-Sharkawy, "Pruning convolution neural network (squeezenet) using taylor



- expansion-based criterion,” *2018 IEEE Int. Symp. Signal Process. Inf. Technol. ISSPIT 2018*, vol. 2019-Janua, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ISSPIT.2018.8705095.
- [25] A. G. Howard *et al.*, “MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications,” 2017, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1704.04861>.
- [26] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, and A. Zhmoginov, “Sandler\_MobileNetV2\_Inverted\_Residuals\_CVPR\_2018\_paper.pdf,” pp. 4510–4520, 2018.
- [27] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens, and Z. Wojna, “Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 2818–2826, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.308.
- [28] N. Dong, L. Zhao, C. H. Wu, and J. F. Chang, “Inception v3 based cervical cell classification combined with artificially extracted features,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 93, p. 106311, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106311.
- [29] B. Baheti, S. Gajre, and S. Talbar, “Semantic Scene Understanding in Unstructured Environment with Deep Convolutional Neural Network,” *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, vol. 2019-Octob, pp. 790–795, 2019, doi: 10.1109/TENCON.2019.8929376.
- [30] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 770–778, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [31] N. Mammone, C. Ieracitano, and F. C. Morabito, “A deep CNN approach to decode motor preparation of upper limbs from time–frequency maps of EEG signals at source level,” *Neural Networks*, vol. 124, pp. 357–372, 2020, doi: 10.1016/j.neunet.2020.01.027.
- [32] V. Padhmashree and A. Bhattacharyya, “Human emotion recognition based on time–frequency analysis of multivariate EEG signal,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 238, p. 107867, 2022, doi: 10.1016/j.knosys.2021.107867.
- [33] S. Bhattacharya *et al.*, “Deep learning and medical image processing for coronavirus (COVID-19) pandemic: A survey,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 65, no. November 2020, p. 102589, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102589.
- [34] H. Polat, M. U. Aluclu, and M. S. Özerdem, “Evaluation of potential auras in generalized epilepsy from EEG signals using deep convolutional neural networks and time-frequency representation,” *Biomed. Tech. (Berl.)*, vol. 65, no. 4, pp. 379–391, Aug. 2020, doi: 10.1515/BMT-2019-0098.
- [35] Ö. Türk and M. S. Özerdem, “Epilepsy detection by using scalogram based convolutional neural network from eeg signals,” *Brain Sci.*, vol. 9, no. 5, 2019, doi: 10.3390/brainsci9050115.
- [36] M. Şeker, Y. Özbek, G. Yener, and M. S. Özerdem, “Complexity of EEG Dynamics for Early Diagnosis of Alzheimer’s Disease Using Permutation Entropy Neuromarker,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 206, 2021, doi: 10.1016/j.cmpb.2021.106116.
- [37] N. N. Kulkarni and V. K. Bairagi, “Extracting Salient Features for EEG-based Diagnosis of Alzheimer’s Disease Using Support Vector Machine Classifier,” *IETE J. Res.*, vol. 63, no. 1, pp. 11–22, 2017, doi: 10.1080/03772063.2016.1241164.
- [38] V. Bairagi, “EEG signal analysis for early diagnosis of Alzheimer disease using spectral and wavelet based features,” *Int. J. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 403–412, 2018, doi: 10.1007/s41870-018-0165-5.



# Thermal and mechanical analysis of thermal power plant ashes, cement and resin composites

Ayşe BiÇER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Bio Engineering, Malatya Turgut Ozal University, Malatya-Türkiye, ayse.bicer@ozal.edu.tr, Orcid No:0000-0003-4514-5644

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received December 2, 2022  
Received in revised form 30  
December 2022  
Accepted 10 January 2023  
Available online 23 March, 2023

### Keywords:

Fly ash, bottom ash, pine tree resin,  
insulating concrete, building  
materials

Doi: 10.24012/dumf.1213882

\* Corresponding author

## ABSTRACT

This study used thermal power plant fly ash (FA) and bottom ash (BA) as fill materials and investigated the thermal properties of composites made of cement and pine tree resin binders. For each ash group, 36 samples were prepared by adding 50% cement and 1% to 2% resin as binders. i) FA samples had 23.18%, 22.99%, and 77.01% lower density, thermal conductivity, and compressive strength than BA samples, respectively. FA samples had 9.42% higher porosity than BA samples. ii) FA (0.177 W/mK) and BA (0.221 W/mK) samples with resin and cement had the lowest heat transfer coefficients. iii) FA (14.46 MPa) and BA (36.96 MPa) samples (resin + cement binder) had the highest compressive strength values.

## Introduction

Fly ash (FA) results from burning low-calorie lignite coals in thermal power plants (TPPs). Fly ash is entrained by flue gases and kept in electrostatic filters. Bottom ash (BA) is coarser-grained ash falling on the bottom of a boiler. These ashes are not utilized adequately because they are dumped on vacant lands around power plants. Disposing of FA and BA in this way wastes resources and causes environmental pollution. These wastes are a significant problem for TPPs. If we make use of FA and BA, we will have significant environmental, technical, and economic benefits and solve the waste problem of TPPs.

Land and energy costs rise, resulting in vertical growth and increased demand for low-density and insulated building materials. Porous and lightweight aggregates should be used as fillers to produce low-density building materials concrete, brick, briquette, plaster, etc).

Lightweight aggregate, volcanic slag, etc.) and artificial aggregates (perlite, tes are divided into two: natural aggregates (pumice FA, BA, expanded clay, expanded polystyrene, etc.). This study focused on two artificial aggregates: FA and BA.

There is a large body of research on FA. We can group those studies into two: The first group consists of studies that add FA to cement in different proportions. The goal of these studies is to produce affordable and high-quality binders [1-4].

The second group consists of studies on lightweight concrete production. Those researchers replace conventional aggregate with FA. These studies aim to produce building materials with insulating properties by using binder materials (porous ash particles, cement, gypsum, polymers, etc.). Babu et al [5], Karasin and Dogruyol [6], Yu et al [7] investigated the change of mechanical properties in fly ash-cement mixtures with fly ash ratio. Rafieizonooz et al [8] examined the physical

properties of concrete that is prepared by using bottom ash instead of sand 0, 20, 50 and 100% and fly ash instead of cement 20%. Siddique [9], Dan [10] researched the effect of using fly ash instead of partially sand on fresh concrete characteristics. Thirumal and Harish [11] got a high performance concrete that will flow under its own weight without a mechanical vibration. Bicer investigated the influence of grain diameter and resin usage on thermal and mechanical properties of fly ash as aggregate in concrete [12]. Biçer [13] investigated the effect of production temperature on thermal and mechanical properties of polystyrene - fly ash composites. Rivera et al [14] have obtained pressure strengths more than 30 MPa by using fly ash. Aydın and Arel [15] analyzed the application of high volume fly ash-cement composites for the locations with low mechanical properties in the buildings. Li et al [16] analyzed the content of unburned carbon in hardened cement-fly ash paste. In addition, some researchers have used resin to produce building materials with insulating properties.

These studies aim to create artificial pores with porous aggregate and resin and to produce low-density building materials by increasing total porosity. Bicer and Celik [17] used pumice aggregate and pine resin to manufacture concretes with thermal conductivity of 0.231 W/mK. Devecioglu and Bicer [18], Kaya and Kar [19, 20] identified thermal and mechanical features of expanded polystyrene-resin-cement composites and the utility of them as construction materials.

Unlike earlier studies, this study used two TPP ashes (FA and BA) for two objectives. The first objective was to reduce the amount of cement in concrete. The second was to create artificial pores by using the ashes as aggregates and thus produce a pine tree resin (PTR) added to an insulating concrete with adhesive properties.

## Materials and Methods

### Materials

#### Ashes:

The TPP ashes (FA and BA) were supplied from the Afsin-Elbistan TPP in the east of Turkiye.

Fly ash is formed during the combustion of low-calorie coals in TPPs between 1100 °C and 1600 °C. It is collected in the cyclone and electro filters of TPPs. It is darker than cement and consists of tiny grains (particle diameter  $(20-80) \times 10^{-6}$  m). The fly ash used in the present study had a density of 1.69 g/cm<sup>3</sup>.

Bottom ash is collected at the bottom of the combustion chamber. It has a particle diameter of  $(500-7000) \times 10^{-6}$  m and a density of 2.20 g/cm<sup>3</sup>. It is dark gray and soft. Its color depends on charcoal and its flammability [8]. It consists of silica, aluminum, and iron oxides.

Table 1 shows the chemical composition of the components.

Table 1 Chemical composition of the components (%)

Chemical characteristics	Fly ash	Bottom ash	Cement
SiO <sub>2</sub>	33.9	32.1	18.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5	15.3	6.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.9	15.2	3.25
CaO	35.5	11.6	57.71
MgO	1.9	2.8	2.34
SO <sub>3</sub>	7.2	19.9	2.91
K <sub>2</sub> O	0.7	0.5	0.7
TiO <sub>2</sub>	0.7	1.2	--
LiO <sub>2</sub>	-	1.1	--
Na <sub>2</sub> O	0.3	0.4	--
Loss on ignition	1.4	1.1	2.84
Not available	-	-	6.08
Total	100	100	100.03

#### Pine tree resin:

Pine tree resin is a viscous and sticky material that seeps from the bark of pine trees. It becomes solid when it comes into contact with oxygen. It sticks to the place where it flows after a while (Fig. 1-a). The resin was ground and mixed with cement in extract form for two reasons (Fig. 1-b, c and d). First, when immersed in water, resin absorbs some water and expands. It removes the water during drying and results in micro structured artificial pores in the sample structure. This improves the insulating properties of the new material. Second, when resin dries, it hardens and thus increases the binding properties of the cement.

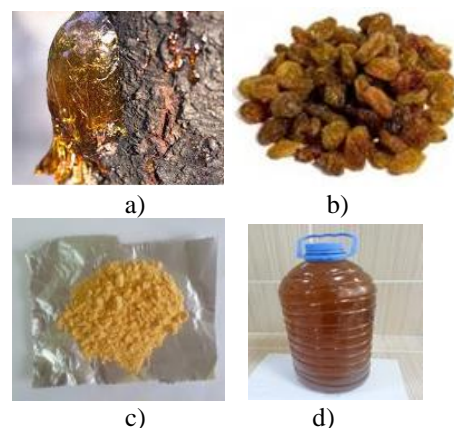


Fig. 1 View of pine resin a) natural resin on tree, b) dried, c) powder resin, d) extract resin

**Cement:**

CEM IV/B(P)32.5 R cement and resin-water mixture were used to bind the ashes. The cement had a density of 3.1 g/cm<sup>3</sup> and a thermal conductivity of 0.751 W/mK.

For experiments, cement mortars were prepared with FA and BA aggregates at 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% by volume (Table 2). Some mortars were poured into 20x60x150 mm molds and left to dry for 28 days for thermal tests, while some others were poured into 100x100x100 mm molds and left to dry for 28 days for mechanical tests.

**Testing methods**

The following tests and calculations were applied to each sample:

The thermal conductivity coefficient was measured using a device (Shoterm QTM) that performs measurements under the transient regime and works with the hot wire method (Fig. 2). The device performs measurements according to DIN 51046 norm. Thermal conductivity coefficients were measured from three points on each sample and then, the arithmetic averages of those measurements.



Fig. 2 Thermal conductivity meter unit

Compressive strength tests were carried out according to TS 699 [21, 22]. The tests were performed using a device (Ele International) that can apply force on one axis.

The density method is used to determine the porosity of the samples. Porosity ( $\phi$ ) is defined by Equation (1), [18].

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_{porous}}{\rho_{solid}} \tag{1}$$

Equation (1) applied to this study can be written as equation (2).

$$\phi = 1 - \frac{\rho_{ash} \cdot Z + \rho_{binder} \cdot (1-Z)}{\rho_{ash\ matrix} \cdot Z + \rho_{binder\ matrix} \cdot (1-Z)} \tag{2}$$

where  $\rho_{ash}$  is the density of the porous material, while the  $\rho_{ash\ matrix}$  is the density of solid material (the density of the sample after milling and so causing no porosity).  $\rho_{binder}$  is the density of the resin mixture of cement, and  $\rho_{binder\ matrix}$  is the density of the resin mixture with a 0% porosity ratio. Z is the ash ratio (%), and (1-Z) is the binder ratio (%). The porosity of the samples was calculated using the density values (FA:1.69 g/cm<sup>3</sup>, FA<sub>matrix</sub>:3.403 g/cm<sup>3</sup>, BA:2.20 g/cm<sup>3</sup>, BA<sub>matrix</sub>: 3.44 g/cm<sup>3</sup> and R:1.8 g/cm<sup>3</sup>). The results are shown collectively in Table 3.

**Results and Discussions**

*Density and Porosity:*

Fly ash had a 23.18% lower density and 9.42% higher porosity than BA. Similarly, the samples with FA had a 23.18 % - 14.46 % lower density and 9.4 % -6.38 % higher porosity than the samples with BA. The submicroscopic views of the 50% cement+ash mixed FA and BA aggregates in Fig 3 as well as in Fig 4-a and Fig 4-b seem to confirm this.

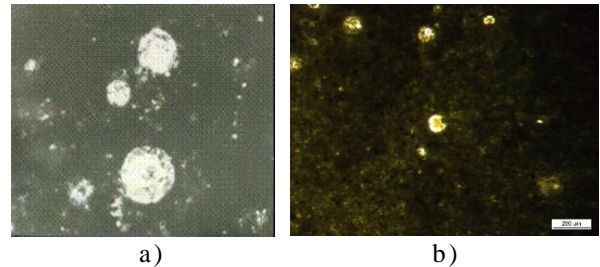


Fig. 3 View of ashes + cement block under a microscope a) FA, b) BA

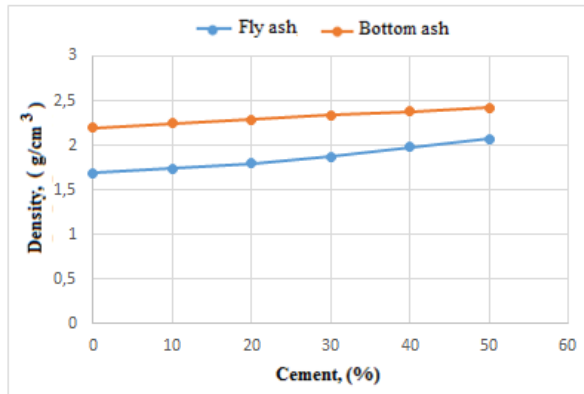
Table 2 Details of the cement—ash—resin

Volumetric ratio (%)		Weight (gram)		Total weight (gram)	Resin (gram)	Resin (liter)	(W+R)/(C+A)
Fly-bottom ash	Cement	Fly or bottom ash	Cement				
Resin (0 %)							
0	100	0	500	500	-	-	
10	90	50	500	550	-	-	
20	80	100	500	600	-	-	0.6
30	70	150	500	650	-	-	
40	60	200	500	700	-	-	
50	50	250	500	750	-	-	
Resin (1 %)							
0	100	0	500	500	5.00	0.30	
10	90	50	500	550	5.50	0.35	
20	80	100	500	600	6.00	0.40	0.6
30	70	150	500	650	6.50	0.45	
40	60	200	500	700	7.00	0.50	
50	50	250	500	750	7.50	0.55	
Resin (2 %)							
0	100	0	500	500	10	0.60	
10	90	50	500	550	11	0.70	
20	80	100	500	600	12	0.80	0.6
30	70	150	500	650	13	0.90	
40	60	200	500	700	14	1.00	
50	50	250	500	750	15	1.10	

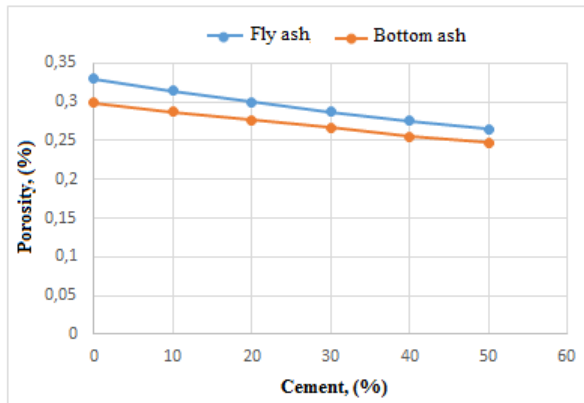
W:Water, R:Resin, C:Cement, Resin= Total weight (g) x Resin ratio (%)

Table 3 Measurement results

Cement (%)	Fly ash				Bottom ash			
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Thermal conduc. (W/mK)	Comppres. strength (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Thermal conduc. (W/mK)	Compres. strength (MPa)
Resin 0 %								
0	1.69	0.3300	0.278	3.43	2.20	0.2989	0.361	14.92
10	1.74	0.3145	0.293	5.11	2.25	0.2876	0.375	17.55
20	1.80	0.3004	0.305	6.6	2.29	0.2764	0.386	20.24
30	1.87	0.2875	0.315	8.22	2.34	0.2665	0.406	23.27
40	1.98	0.2757	0.324	9.76	2.38	0.2555	0.425	26.59
50	2.07	0.2648	0.331	11.45	2.42	0.2479	0.452	30.23
Resin 1 %								
0	1.44	0.3470	0.158	4.81	2,05	0.3266	0.204	19.28
10	1.5	0.3255	0.170	6.7	2,11	0.3096	0.215	21.95
20	1.58	0.3184	0.179	8.83	2,15	0.2943	0.223	25.12
30	1.66	0.2965	0.187	10.95	2.21	0.2805	0.230	28.96
40	1.77	0.2847	0.193	13.12	2.25	0.2679	0.234	33.21
50	1.86	0.2758	0.197	15.74	2.30	0.2564	0.237	37.55
Resin 2 %								
0	1.23	0.3600	0.142	4.57	1.92	0.3465	0.189	18.52
10	1.31	0.3445	0.153	6.43	1.98	0.3296	0.199	21.24
20	1.42	0.3304	0.162	8.22	2.05	0.3086	0.208	24.56
30	1.53	0.3175	0.169	10.33	2.12	0.2944	0.214	28.17
40	1.62	0.3017	0.174	12.34	2.18	0.2799	0.218	32.34
50	1.74	0.2938	0.177	14.46	2.25	0.2644	0.221	36.96



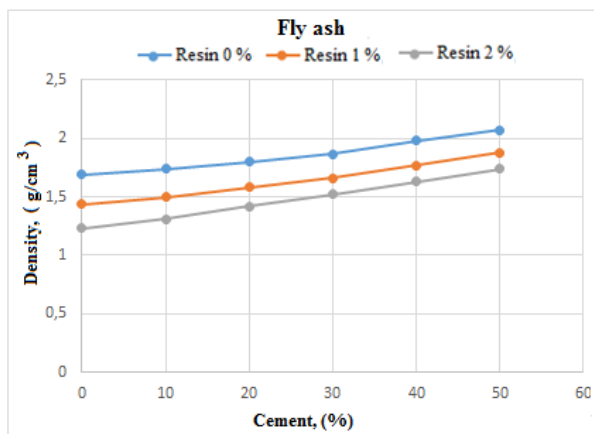
a)



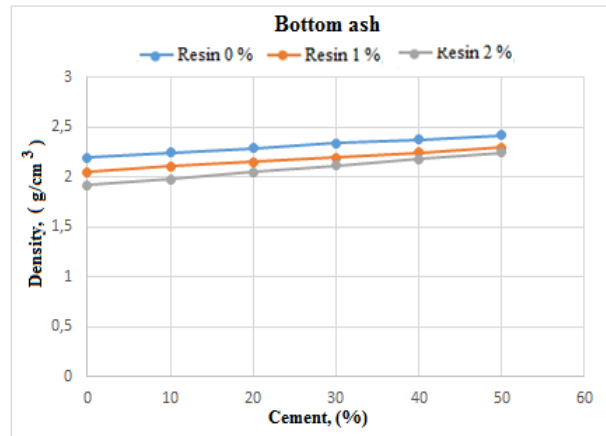
b)

Fig. 4 Variation of a) density, b) porosity of TPP ash samples according to cement ratio

The addition of resin resulted in a reduction in density in cementless FA and BA by 2.72% (with 2% of the resin) and 1.27% respectively (Fig 5). It also increased porosity in the samples with FA and BA by 8.33% and 13.73%, respectively (Fig 6). This is because resin absorbs water and swells. During drying, it loses water, which results in artificial pores, increasing total porosity. The higher the cement ratios, the higher the density (cement has a higher density than ashes.) and lower the porosity of the samples with FA and BA.

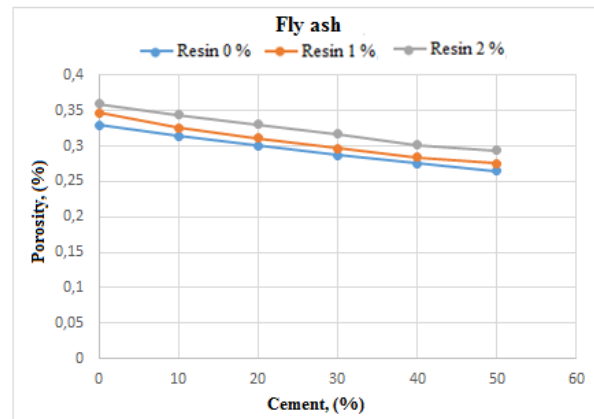


a)

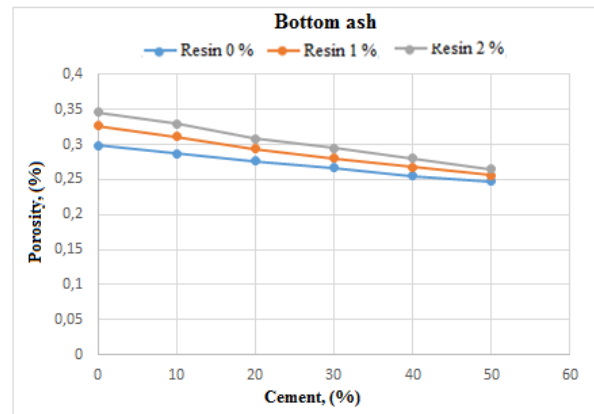


b)

Fig. 5 Effect of resin on density a) FA, b) BA aggregate samples.



a)



b)

Fig. 6 The effect of resin on parity a) FA, b) BA aggregate samples

*Thermal Conductivity Coefficient:*

Fly ash had a 22.99% smaller thermal conductivity than BA (Table 3 and Fig. 7). Similarly, cemented samples with FA had 22.99%-21.56% lower thermal conductivity

(cement increases by 0%-50%) than samples with BA. This is mainly due to the porous structure of FA. The cementless sample with FA (0.278 W/mK) and BA (0.361 W/mK) had the lowest thermal conductivity coefficient. The addition of 2% resin resulted in a reduction in the thermal conductivity of cementless samples with FA (48.92 %) and BA (47.64%) (The dry resin had a thermal conductivity coefficient of 0.150 W/mK). The cementless FA (0.142W/mK) and BA (0.189 W/mK) samples with 2% resin by weight had the lowest thermal conductivity coefficient. The resin-free FA (0.331 W/mK) and BA (0.412 W/mK) aggregate sample with 50% cement by weight had the highest thermal conductivity coefficient. Thermal conductivity decreases due to a reduction in the amount of ash with an increase in the amount of cement. Fig. 8 shows the change in thermal conductivity coefficient depending on the amount of resin and cement in FA and BA aggregate samples. The higher the amount of resin, the smaller the heat transfer coefficient of the FA and BA samples. Fig. 9 shows the variation of thermal conductivity coefficients according to density values.

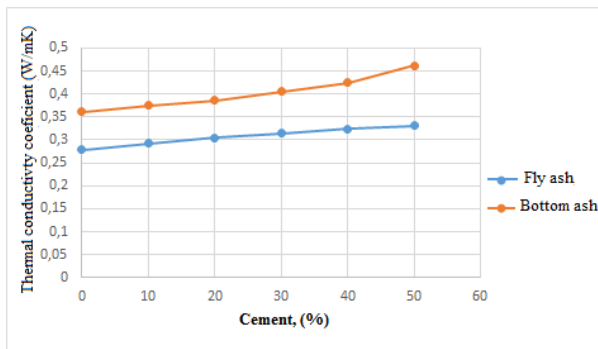
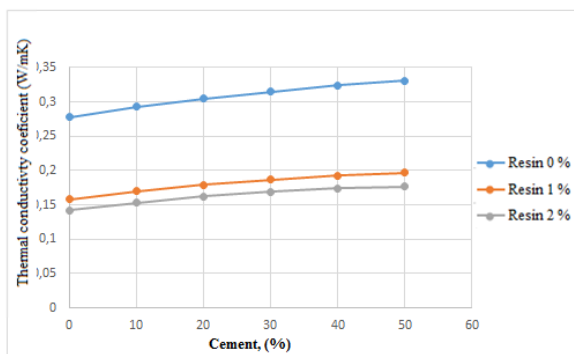
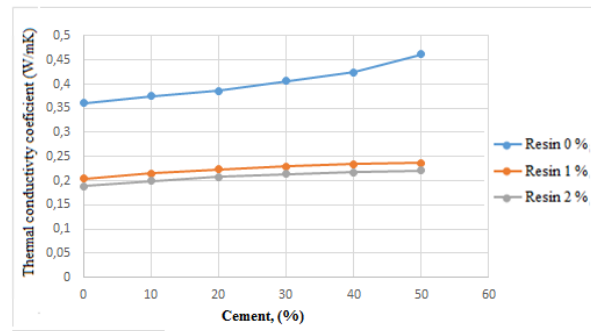


Fig. 7 Variation of thermal conductivity coefficients by cement ratio

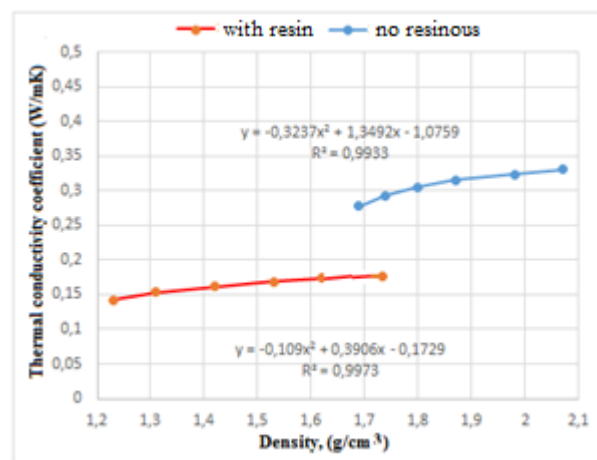


a)

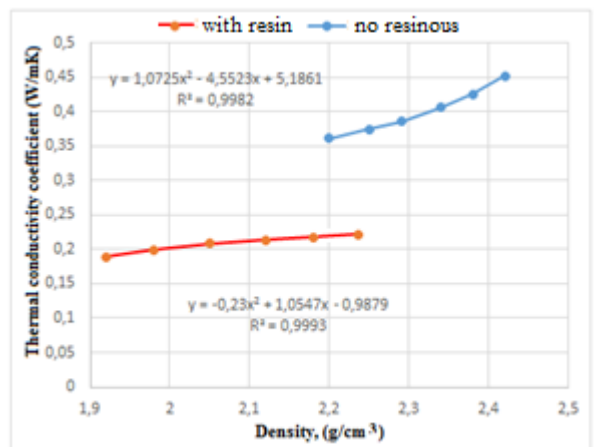


b)

Fig. 8 Variation in thermal conductivity coefficient of ash cement mixtures according to cement mixture ratio a) FA, b) BA aggregate samples



a)



b)

Fig. 9 Change in density thermal conductivity coefficient of density a) FA, b) BA

Table 4 shows the thermal conductivity values of some materials. Ash-cement mixed samples had lower thermal conductivity than many building materials due to the porous structure caused by ash and resin.

Table 4. Thermal conductivities of some materials [17]

Materials	Measured Values		Literature	
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thermal conducti. (W/mK)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Thermal conducti. (W/mK)
Concrete	2.500	1.420	2.272	1.512
Ytong wall	0.617	0.180	0.800	0.383
Brick wall	2.093	1.148	1.8-2.0	0.972
Outer plaster	1.856	1.173	1.600	0.930
Inner plaster	1.763	1.163	1.800	1.163
Cement block (Perlite)	0.427	0.292	0.1046	0.300

**Compressive Strength:**

Resin-free samples with FA aggregates had compressive strength values of 3.43 to 11.45 MPa, while those with BA aggregates had compressive strength values of 14.92 to 30.23 MPa. The compressive strength values increased by 62.12 %-77% depending on the amount of cement in the FA and BA samples (Fig 10). Samples with BA aggregates had higher compressive strength values than those with FA aggregates. This was because samples with BA had lower porosity.

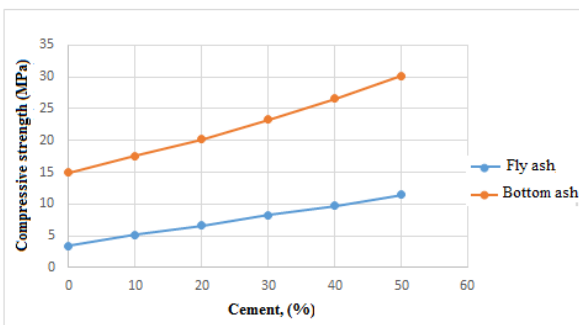
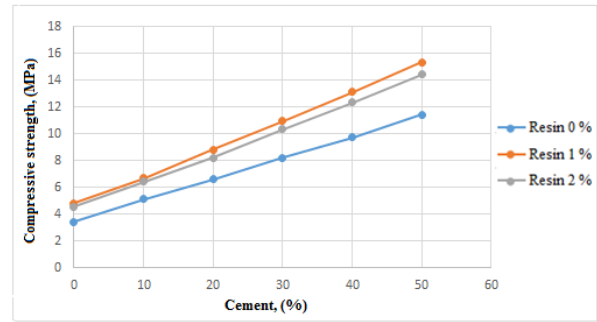
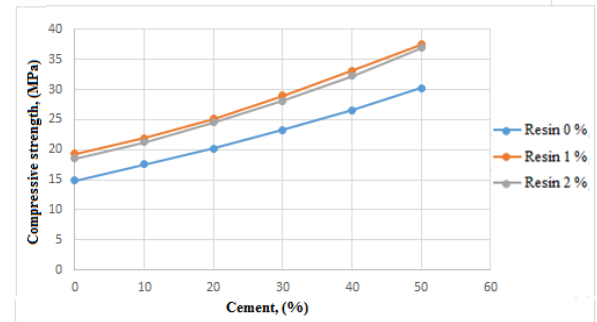


Fig. 10 Change in cement compressive strength in ash aggregate concrete

Fig. 11 compares the compressive strength values of samples with and without resin depending on the amount of cement. The samples with 1% resin had slightly higher compressive strength values than the resin-free samples. This is because the adhesive property of the resin increases the binding property of the cement (TPP ashes are pozzolanic materials, which, when mixed with water, gain binding properties with the released CaO). However, when the amount of resin was increased to 2%, compressive strength showed a partial decrease. Therefore, the resin ratio should be determined according to what the ash-cement-resin composites will be used for (where a composite material is used, it should be considered that thermal conductivity or compressive strength is important).



a)



b)

Fig. 11 Change in cement compressive strength in ash aggregate concrete a) FA, b) BA

**Usability Tests:**

Various tests were performed on samples with FA and BA. The results showed that the samples could be sawed, screwed, ducted for plumbing, drilled, and painted (Fig 12).

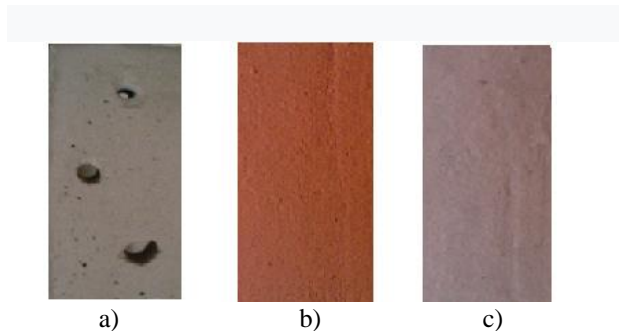


Fig. 12 Tests on samples: a) drilling, b) oil paint, c) plastic paint

**Conclusions**

This study was conducted to assess Afşin-Elbistan TPP fly ash and bottom ash as a new construction material in resin and cement binder combinations. The following are the results:

1. Waste ash material in TPPs causes economic and environmental problems. These ashes have low thermal conductivity. Therefore, if we can reuse them, we both save energy and prevent environmental pollution.



2. Fly ash has 22.99% lower thermal conductivity than bottom ash. If 50% cement is added, FA has 21.56% lower thermal conductivity than BA.

3. The addition of 2% resin results in a 48.92% and 47.64% reduction in the thermal conductivity of uncemented and 50% cemented FA samples, respectively. The addition of 2% resin results in a 46.52% and 51.1% reduction in the thermal conductivity of uncemented and 50% cemented BA samples, respectively. The lowest heat transfer coefficient in cemented FA and BA samples with resin is 0.177 W/mK and 0.221 W/mK, respectively.

4. In resin-cement binder samples, If the amount of resin is up to 1%, the compressive strength increases, but when the amount of resin is increased up to 2%, it shows a partial reduction. The highest compressive strength (with 2% resin and 50% cement) is 14.46 MPa in the sample with FA and 36.96 MPa in the sample with BA.

5. The samples with FA and BA can be sawed, screwed, ducted for installation, drilled, and painted.

6. Due to their pozzolanic property, FA and BA can be used as intermediate filling material or roof insulation plaster in sandwich walls without binders. When the resin is added to them as a binder, the thermal conductivity value decreases, and the strength increases.

In conclusion, TPP ashes + cement + resin composites can be used as building materials to produce low-density and insulating concrete, briquettes, bricks, and plaster.

## References

- [1] R. S. Silva, J. J. O Andrade, "Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash", *Construction and Building Materials*, 153, 704-715, 2017
- [2] H. Xiao, W. Wang, S. H. Goh, "Effectiveness study for fly ash cement improved marine clay", *Construction and Building Materials*, 157, 1053-1064, 2017.
- [3] A. C. Duran, "Carbonation-porosity-strength model for fly ash concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 91-94, 2004.
- [4] Q. Jueshi, S. Caijun, W. Zhi, "Activation of blended cements containing fly ash", *Cement and Concrete Research*, 31(8), 1121- 1127, 2001.
- [5] D. S. Babu, K. G. Babu, T. H. Wee, "Properties of lightweight expanded clay aggregate concretes containing fly ash", *Cement and Concrete Research*, 35, 1218-1223, 2005.
- [6] A. Karasin, M. Dogruyol, "An experimental study on strength and durability for utilization of fly ash in concrete mix", *Advances in Materials Science & Engineering*, 25, 1-6, 2014.
- [7] J. Yu, C. Lu, C. K. Y. Leung, G. Li, "Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash", *Construction and Building Materials*, 147, 510-518, 2017.
- [8] M. Rafieizonooz, J. Mirza, M. R. Salim, M. Hussin, "Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement", *Construction and Building Materials*, 116, 15-24, 2016.
- [9] R. Siddique, "Effect of fine aggregate replacement with class F fly ash on the mechanical properties of concrete", *Cement and Concrete Research*, 33, 539-547, 2003.
- [10] R. Dan, "Properties of fresh concrete incorporating a high volume of fly ash as partial fine sand replacement", *Materials and Structures*, 30, 473-479, 2004.
- [11] J. R. Thirumal, R. Harish, "Performance study of self-compacting concrete by fly ash and silica fume for sustainability in building construction", *Engineering Materials*, 692, 74-81, 2016.
- [12] A. Bicer, "Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites", *Thermal Science and Engineering Progress*, 8, 78-82, 2018.
- [13] A. Bicer, "Effect of production temperature on thermal & mechanical properties of polystyrene - fly ash composites", *Advanced Composites Letters*, 29, 1-8, 2020.
- [14] F. Rivera, P. Martínez, J. Castro, M. López, "Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 63, 104-112, 2016.
- [15] E. Aydın, H. S. Arel, "Characterization of high-volume fly-ash cement pastes for sustainable construction applications", *Construction and Building Materials*, 157, 96-105, 2017.
- [16] Y. Li, H. Lin, Z. Wang, "Quantitative analysis of fly ash in hardened cement paste", *Construction and Building Materials*, 153, 139-145, 2017.
- [17] A. Bicer, N. Celik, "Influence of pine tree resin on thermo-mechanical properties of pumice-cement composites", *Cement and Concrete Composites*, 112, September, 103668, 2020.
- [18] A. G. Devecioglu, Y. Bicer, "The effects of tragacanth addition on the thermal and mechanical properties of light weight concretes mixed with expanded clay", *Period. Polytech. Civil Eng.*, 60(1), 45-50, 2016.
- [19] A. Bicer, "Influence of tragacanth resin on the thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(10), 1019-1032, 2019.
- [20] A. Kaya, F. Kar, "Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. *Construction and Building Materials*", 105, 572-578, 2016.
- [21] TS 699. The test and experiment methods of natural building stones. *TSE*. Ankara, 2009.
- [22] ASTM C 109-80. Standards ASTM Designation, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, 1983.



## Araştırma Makalesi / Research Article

## 304-430 Paslanmaz Çeliklerin Bakır Aratabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi ve Kaynak Mukavemetinin Optimizasyonu

*Diffusion Welding of 304-430 Stainless Steels Using Copper Interlayer and Optimization of Weld Strength*Haluk Kejanlı<sup>1\*</sup>, M.Selçuk Keskin<sup>2</sup>, Gamze Tosun<sup>3</sup><sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, [kejanlih@dicle.edu.tr](mailto:kejanlih@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4987-6316><sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, [mselecul.keskin@dicle.edu.tr](mailto:mselecul.keskin@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6233-1807><sup>3</sup>Artem Alüminyum A.Ş. [gamzetosunn@hotmail.com](mailto:gamzetosunn@hotmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5140-015X>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 6 Aralık 2022  
Revizyon 12 Ocak 2023  
Kabul 16 Ocak 2023  
Online 23 Mart 2023

## AnahtarKelimeler:

Difüzyon Kaynağı 1, AISI 304 2,  
AISI 430 3, Mikrosertlik 4, Taguchi  
5, Anova 6.

## ÖZ

Paslanmaz çelikler mimari yapılarda, inşaat, otomotiv, ulaşım, gıda ve medikal gibi birçok sektörde geniş bir kullanım ağına sahip bir malzemedir. Bu malzemelerin korozyon direncinin yüksek olması, bakım maliyetlerinin düşük olması, mükemmel süneklikleri, kırılmadan önemli darbeleri emebilmeleri ve estetik görüntü sunması bu malzemeleri cazip kılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin metalürjisi karmaşıktır ve üretim sürecinin nihai özellikleri üzerinde daha yüksek bir etkisi vardır. Üretim süreçlerinde kazandırılan bu özellikler, östenitik 304 kalite malzemeler kaynak yapılabirliği yüksek, 430 kalite ferritik paslanmaz çelikler ise kaynaklanma kabiliyetlerini azaltan etkiye neden olur. Bu çalışmada farklı kaynaklanma kabiliyetine sahip 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin katı faz difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği ve birleşmeye ara tabakanın etkisi araştırılmıştır. Numuneler 960, 980 ve 1000°C sıcaklıkta ve 45, 60 ve 75 dakika sürelerde, 1, 2 ve 3 MPa basınç altında atmosfer kontrollü fırında bakır ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı tekniğiyle birleştirilmiştir. Numunelerin kaynak bölgesi mikroskopla, incelenmiş ve difüzyon alanındaki bakır ara tabakanın ana malzemelere dağılımı gözlenmiştir. Malzemelerin mekanik mukavemetlerini belirlemek için mikro sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır, deneylerde Taguchi optimizasyon yöntemi ile Varyans (Anova) analizleri yapıp en etkili parametreler bulunmuş ve deneyin güvenilirlik seviyesi tespit edilme çalışılmıştır.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 6 December 2022  
Received in revised form 12  
January 2023  
Accepted 16 January 2023  
Available online 23 March 2023

## Keywords:

Diffusion Welding, AISI 304, AISI  
430, Microhardness, Taguchi,  
Anova.

Doi: 10.24012/dumf.1213890

\* Sorumlu Yazar

## ABSTRACT

Stainless steels are a material with a wide range of uses in architectural structures, construction, automotive, transportation, food and medical sectors. The high corrosion resistance of these materials, low maintenance costs, excellent ductility, ability to absorb significant impacts without breaking and presenting an aesthetic appearance make these materials attractive. The metallurgy of stainless steels is complex and the manufacturing process has a higher impact on the final properties. These properties, which are gained in the production processes, cause the effect of reducing the weldability of austenitic 304 quality materials and 430 quality ferritic stainless steels. In this study, the jointability of 304 and 430 grade stainless steels with different weldability by solid phase diffusion welding and the effect of the interlayer on the bonding were investigated. The samples were joined by diffusion welding technique using a copper intermediate layer in an atmosphere-controlled oven at 960, 980 and 1000 °C and for 45, 60 and 75 minutes under 1, 2 and 3 MPa pressure. The source region of the samples was examined with a microscope and the distribution of the copper interlayer in the diffusion area to the base materials was observed. In order to determine the mechanical strength of the materials, microhardness and tensile tests were applied, Variance (Anova) analyzes were performed with the Taguchi optimization method and the most effective parameters were found and the reliability level of the experiment was tried to be determined.

## Giriş

Paslanmaz çelikler, mimari yapılarda, inşaat, otomotiv, ulaşım, kimya, gıda ve medikal gibi birçok sektörde geniş bir kullanım ağına sahip bir malzemedir [1]. Sık kullanılan bu malzemelerin korozyon direncinin yüksek olması, bakım maliyetlerinin düşük olması ve estetik görüntü sunması bu malzemeleri cazip kılmaktadır [2], [3]. Paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, alaşım elementi olarak içerisinde en az %10,5 oranında krom bulundurmasıdır. Krom elementi malzemenin dış yüzeyinde oksijen ile birleşerek malzemenin dış yüzeyinde sürekli yenilenen bir oksit tabaka oluşturur ve malzemenin dış etkilere karşı deforme olmasını önlemektedir [4]-[6].

Paslanmaz çelikler içerisinde bulunan alaşım element oranları ve mikro yapısındaki kararlı fazlara göre kendi içlerinde gruplara ayrılmaktadır. Paslanmaz çelik grupları arasında en çok kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerdir. Östenitik paslanmaz çelikler arasında korozyon direnci, yüksek mukavemetli ve iyi kaynaklanabilme özelliklerinden dolayı AISI 304 östenitik paslanmaz çelik yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer bir paslanmaz çelik grubundan olan ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere oranla maliyeti daha uygundur. Kolay şekil alabilme kabiliyetine sahip korozyona karşı iyi direnç göstermektedir [7]-[10]. Paslanmaz çeliklerin üstün özelliklerinin var olması kaynak edilebilme kabiliyetlerinin belirlenmesi konusunda birçok çalışmaya konu olmuştur. Paslanmaz çelikler difüzyon, lazer, TIG, MIG, sürtünme ve ark kaynağı gibi çeşitli yöntemlerle kaynak edilebilirliği mümkündür [7].

Gelişen teknoloji ve sanayinin bu taleplere cevap verebilmesi farklı tip malzemelerin birleştirilebilmesine olan ihtiyacı artmıştır [12] ve bu birçok çalışmaya konu olmuştur.

Guo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada 304 ve 430 paslanmaz çelik malzemelerini bakır ara tabakalı ve ara tabakasız olmak üzere hazırladıkları numuneleri sürtünme karıştırma kaynağını kullanarak başarıyla birleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda bakır ara tabakalı numunelerin kesme yüklerinin %62 oranında ara tabakasız bağlantıdan yüksek olduğunu bildirmişlerdir [13]. Hajiannia ve ark. AISI 347 östenitik paslanmaz çelik ile A335 düşük alaşım malzemeler kullanılarak iki farklı dolgu metali seçilerek gaz tungsten ark kaynağı uygulanıp mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir [14]. Bilgin yapmış olduğu çalışmada Ti-6Al-4V ile 304L malzemeleri, Taşkın ve Ozan ise AISI430 ve AISI 1010 çeliklerini bakır ara tabaka kullanarak başarı ile difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir [15], [16]. Balasubramanian Ti-6Al-4V ve 304 paslanmaz çelik levhalarını gümüş ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir. İyi bir birleşim için sıcaklık değerini 700 ila 800 °C arasında tutulması gerektiğini belirtmiş. Malzemelerin bekleme sürelerinin 30 ila 90 dakika arasında tutulduğunda ise birleşimin rahatlıkla gerçekleşebildiğini ve dayanımlarının arttığını bildirmiştir [17]. Difüzyon kaynağı çok eskiden beri bilinmesine rağmen, özellikle son yıllarda uzay teknolojisinde, nükleer santrallerde ve elektronik sanayindeki hızlı gelişmeler, bu yöntemin kullanımını adeta zorlamıştır. Uçak sanayinde, askeri ve yolcu uçaklarının

uzun ve dayanıklı olan kanat parçalarında difüzyon kaynağına vardır. Soğuk hava depolarında, gaz dolmuş tesislerinde ve silah teknolojisinde de aynı yöntem kullanılmaktadır [18], [21], [22].

Bu çalışmada, AISI 304 ile AISI 430 paslanmaz çelikler 200µm kalınlığında bakır ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Malzemelere uygulanan difüzyon kaynağı, 960, 980 ve 1000 °C sıcaklıkta ve 45, 60 ve 75 dakika bekleme sürelerinde 1, 2 ve 3 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanan numunelere mikro sertlik ve çekme testleri uygulanmış sonuçlar optik mikroskopta analiz edilerek değerlendirilmiştir. Deneylerde Taguchi optimizasyon yöntemi ile Varyans (Anova) analizleri yapıp en etkili parametreler bulunmuş ve deneyin güvenilirlik seviyesi tespit edilmeye çalışılmıştır.

## Materyal ve Metot

Bu çalışmada östenitik (304) ve ferritik (430) paslanmaz çelik levhalar farklı sıcaklık ve bekleme süreleri için difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Ferritik AISI 430 ve östenitik AISI 304 paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %) [21].

	Fe	C	Si	Mn	Cr	S	P
AISI430	Kalan	≤0.12	0.4	0.4	17.0	≤0.03	≤0.04
AISI304	Kalan	≤0.06	0.32	1.38	18.4	≤0.03	≤0.04

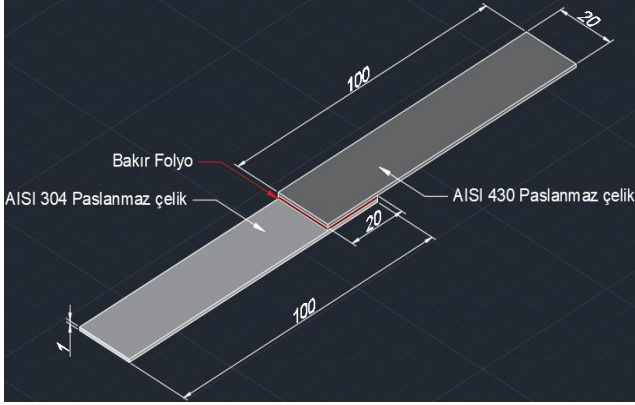
Difüzyon kaynağı için 1 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik levhalar; 20x100 mm boyutlarında lazer ile kesilmiştir. Malzemelerin yüzeyini kaynağa hazırlamak için 600, 800 ve 1000 grit'lik zımparalarla parlatılmış ve ardından aseton ile ultrasonik titreşim makinesiyle temizlenmiş daha sonra kuru hava ile kurutulmuştur. Şekil 1'de görüldüğü gibi numunelerin arasına 20x20 mm ölçülerinde 200 µm kalınlığında %99.8 saflığında bakır ara tabaka bırakılarak difüzyon kaynağına hazır hale getirilmiştir. Difüzyon kaynak işlemleri, silisyum karbür çubuklu, homojen ısı dağılımlı ve argon gaz kontrollü fırına 3 lt/dak debide %99,9 saflıkta argon gazı gönderilerek gerçekleştirilmiştir.

Deney numunelerine 3 farklı basınç uygulanarak 45, 60 ve 75 dakikalık sürede 960-980 ve 1000 °C sıcaklıklarda kaynak işlemi uygulanmıştır. Numuneler fırın 350 °C'ye ininceye kadar fırın içerisinde gaz altında tutulmuş, daha sonra oda sıcaklığında soğuyuncaya kadar fırın dışında bekletilmiştir.

## Mikroyapı incelemeleri

Difüzyon kaynak işleminden sonra birleştirilen malzemeler mikroyapı incelemeleri için ara tabaka yüzeyine dik doğrultuda kesilerek, ölçüm yapılacak yüzey 180, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 grit'lik SiC zımpara ile su altında zımparalanmıştır. Sırasıyla 6 ve 3 mikron elmas pasta ile parlatılan numunelerin yüzeyleri alkol ile yıkanıp

sonra hava ile kurutulmuştur. Mikroskopik incelemeye hazır hale getirilen numuneler, hazırlanan  $\text{FeCl}_3$  8.5 gr,  $\text{CuCl}_2$  2.4 gr, alkol 122 ml,  $\text{HCl}$  122 ml ve  $\text{HNO}_3$  6 ml çözeltisinde 20 saniye bekletilerek dağlanmıştır.



Şekil 1. Difüzyon kaynağı yapılacak numunenin şematik görüntüsü.

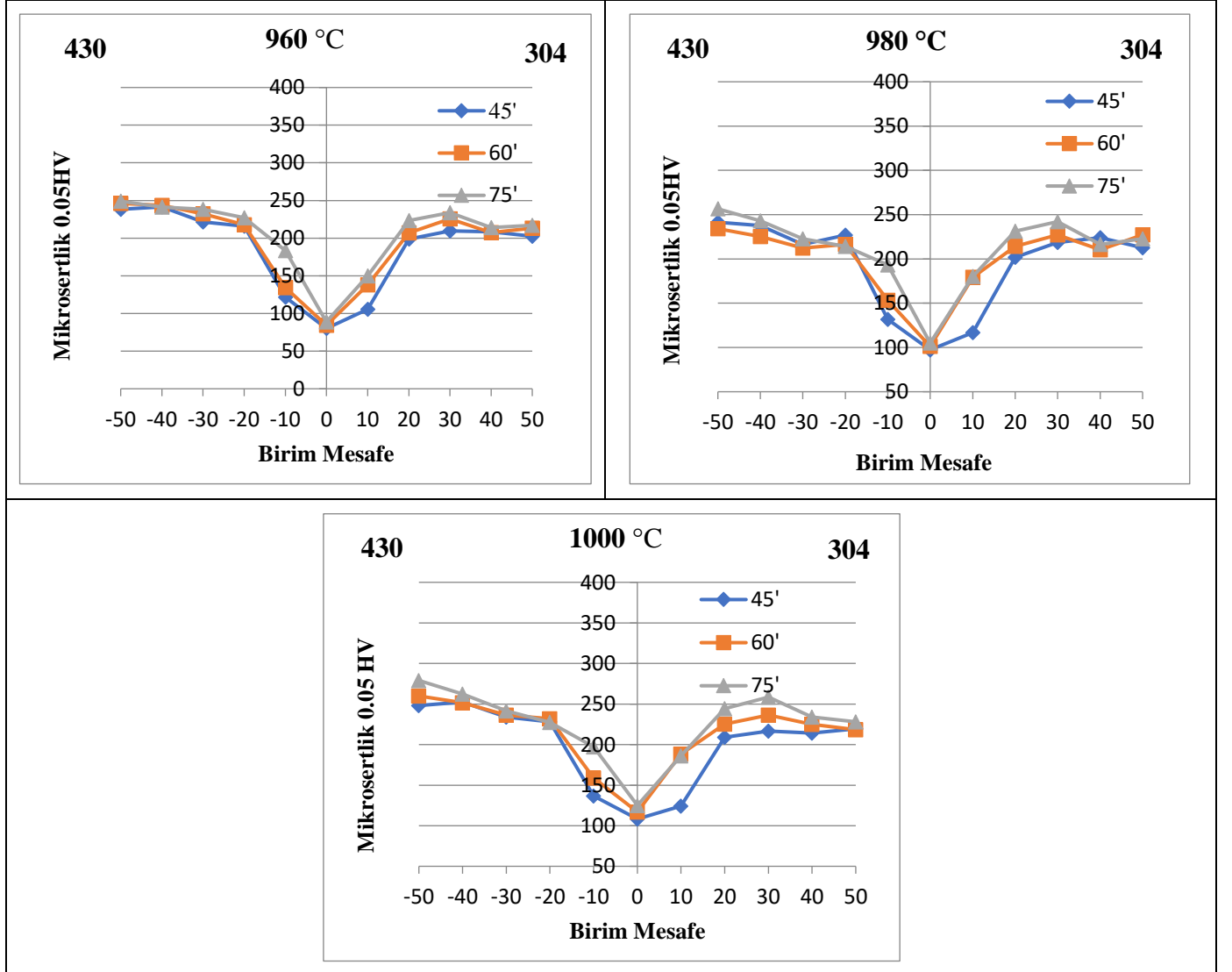
## Deneysel Sonuçlar

### Mikro Sertlik Deney Sonuçları

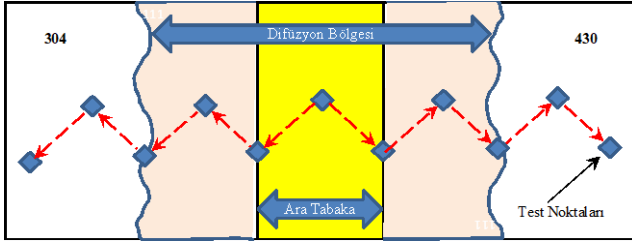
Difüzyon kaynağı ile birleştirilen bakır ara tabakalı numunelerin, 960, 980 ve 1000 °C'de sıcaklık ve 45, 60 ve 75 dakika bekleme sürelerine ait sertlik değişim grafikleri Şekil 2'de verilmiştir.

Vickers Sertliği (HV), girinti tarafından bırakılan izlenimin diyagonal uzunluklarının optik olarak ölçülmesiyle hesaplanmıştır. Bu yöntemle ölçüm, 50 gr yükün 10 saniye uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 11 ayrı noktadan difüzyon yayınımları farklı olduğu için birim uzaklıklar değeri dikkate alınarak sertlik ölçümleri alınmıştır (Şekil 3).

Kaynaklı numunelerin mikro sertlik ölçüm grafikleri incelendiğinde tüm sıcaklık ve bekleme sürelerinde ara tabakadan ana metal malzemelerine gidildikçe sertlik değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bakır ara tabakasında en yüksek sertlik değeri 1000 °C sıcaklıkta 75 dakikada birleştirilen numunede 125 HV olarak bulunmuştur.



Şekil 2. Mikrosertlik grafikleri.



Şekil 3. Mikrosertlik ölçüm bölgelerinin şematik görünüşü.

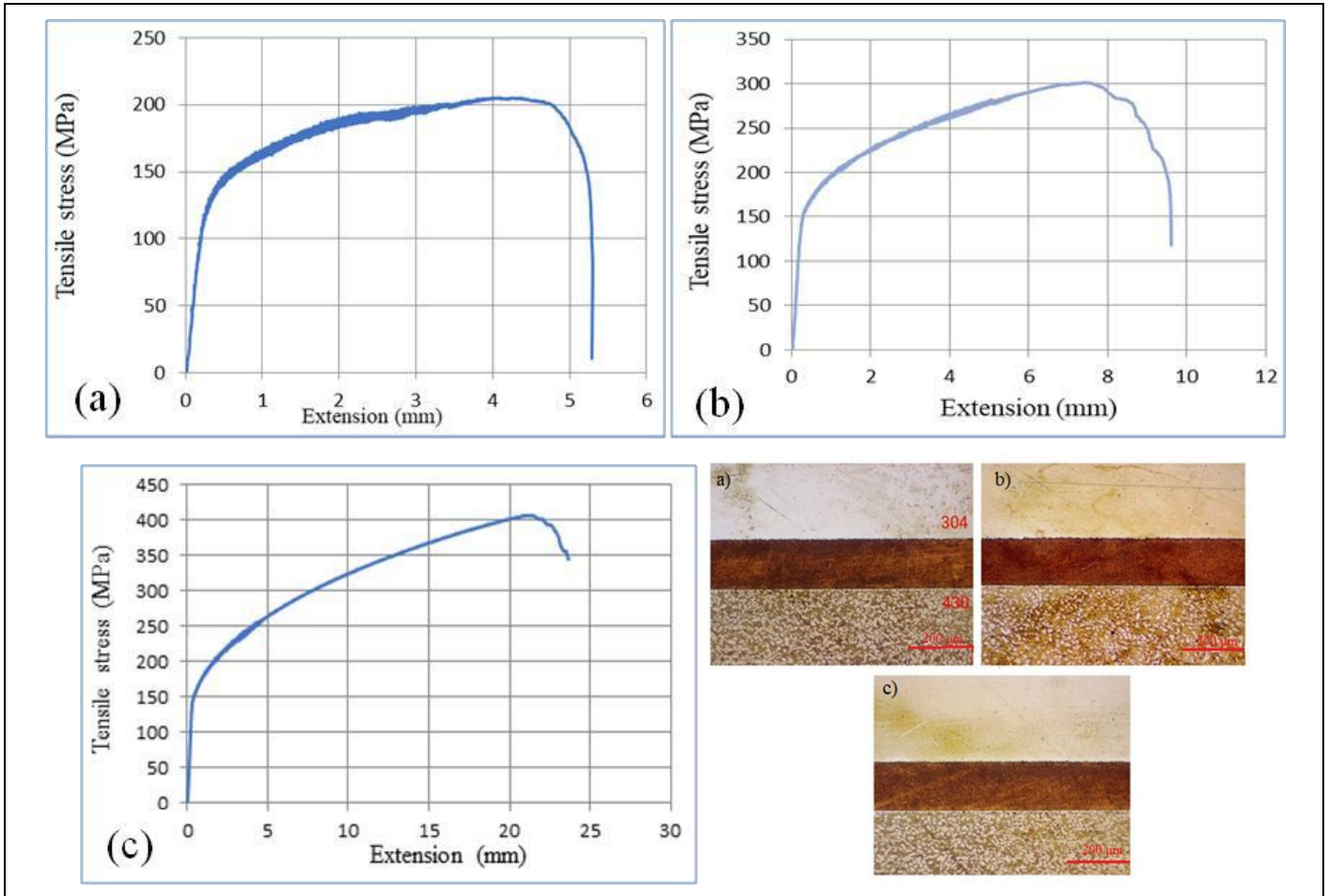
En yüksek sertlik değeri 304 malzemede 1000 °C sıcaklıkta 75 dakikada birleştirilen numunede 258.5 HV, 430 paslanmaz çelik tarafında ise en yüksek sertlik değeri 1000 °C sıcaklıkta 75 dakika bekleme süresindeki numunede 279 HV olarak ölçülmüştür.

### Çekme Testi Sonuçları

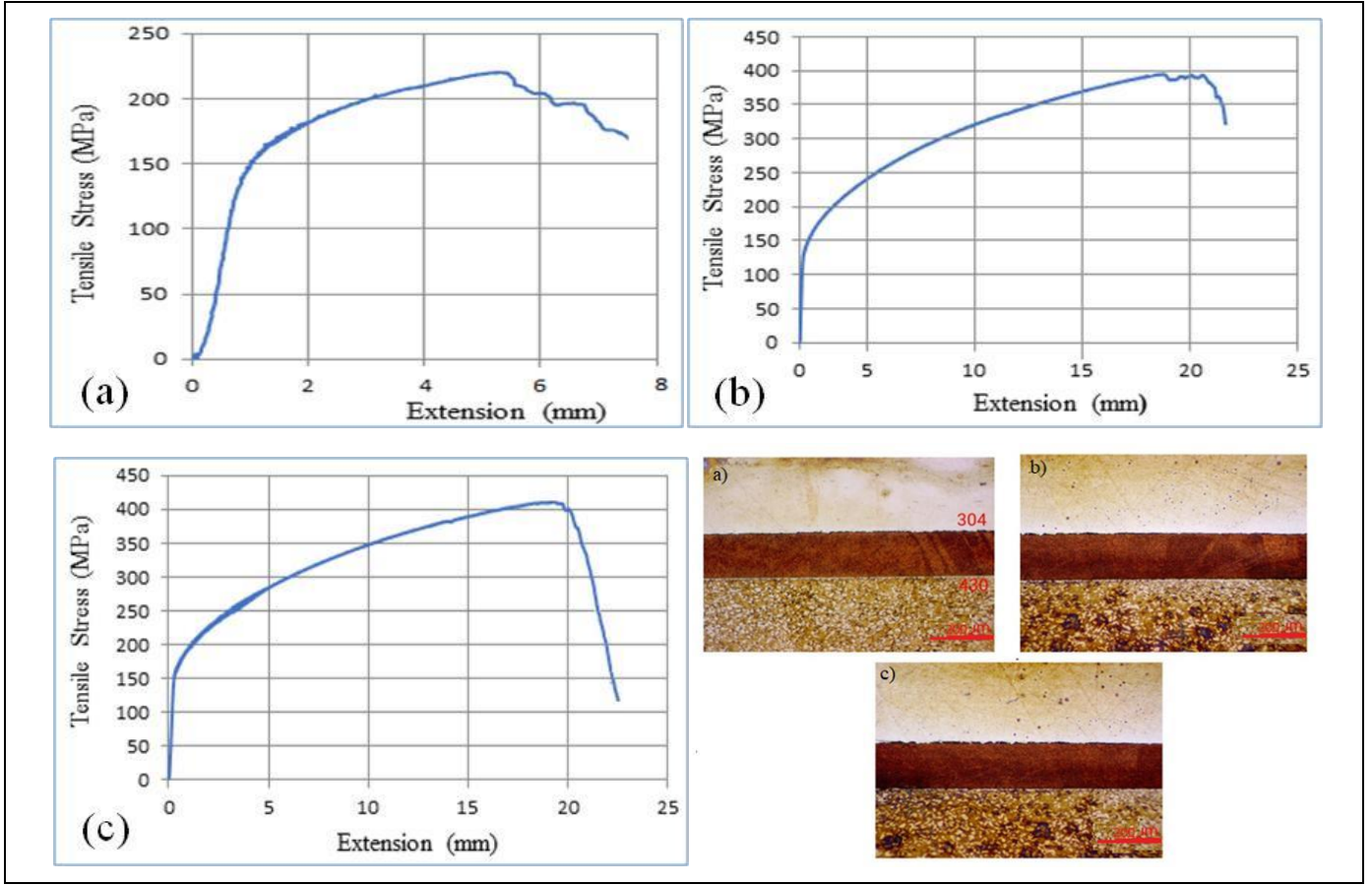
Kaynaklı numunelerin çekme deneyleri Dicle Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Instron BS 8800 marka 100kN kapasiteli çekme test cihazında, oda sıcaklığında 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme test sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Difüzyon kaynak parametreleri ve çekme deney sonuçları.

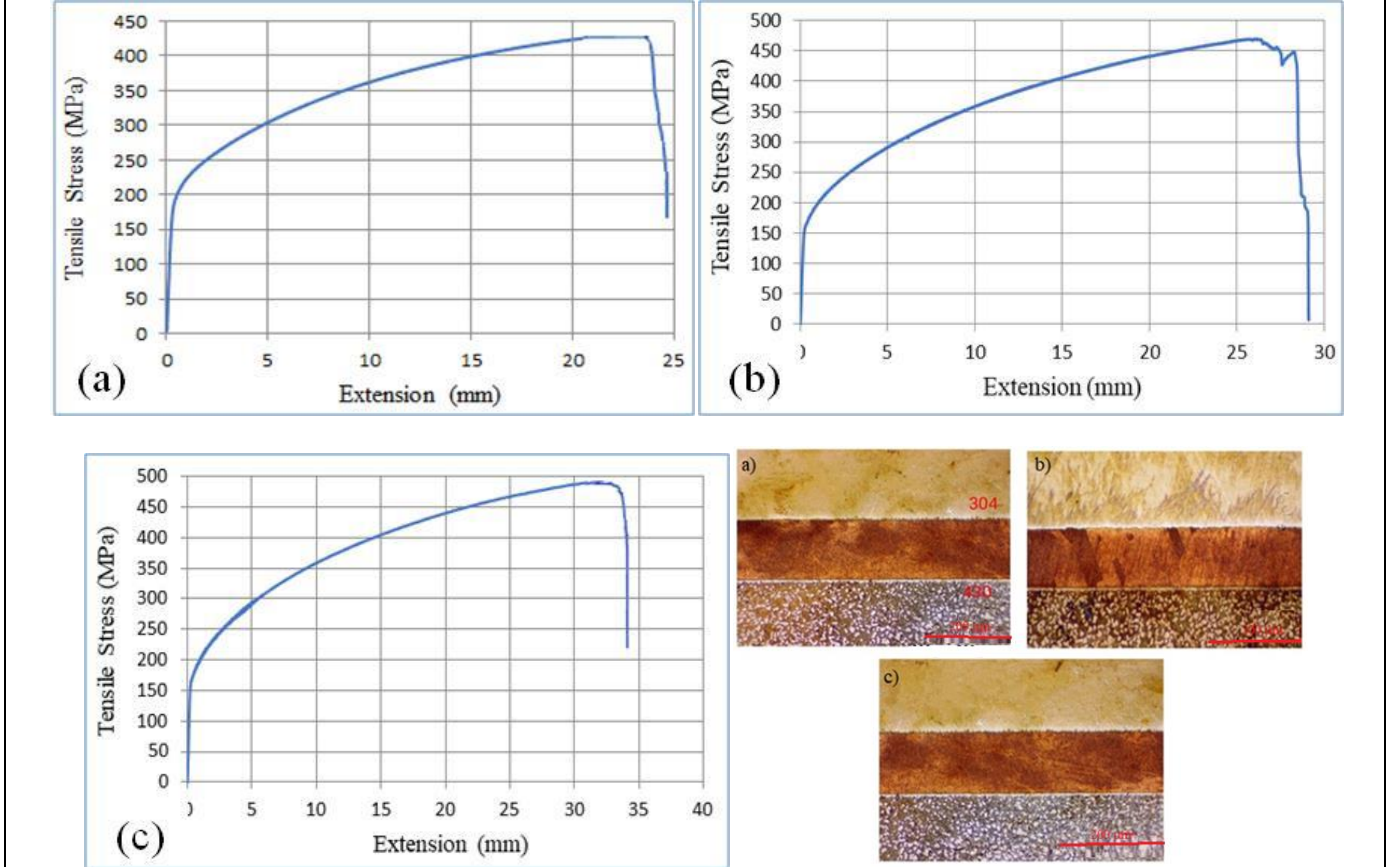
Numune No	Difüzyon Sıcaklığı (°C)	Süre (Dakika)	Basınç (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)
1	960	45	1	205.347
2	960	60	2	301.407
3	960	75	3	406.596
4	980	45	2	220.578
5	980	60	3	395.332
6	980	75	1	412.221
7	1000	45	3	427.046
8	1000	60	1	469.946
9	1000	75	2	491.582



Şekil 3. 960 °C de birleştirilen numunelerin çekme grafikleri ve mikroyapı görüntüleri; a) 45 dk 1 MPa, b) 60 dk 2 MPa, c) 75 dk 3 MPa.



Şekil 4. 980 °C de birleştirilen numunelerin çekme grafikleri ve mikroyapı görüntüleri;  
 a) 45 dk 2 MPa, b) 60 dk 3 MPa, c) 75 dk 1 MPa.



Şekil 5. 1000 °C'de birleştirilen numunelerin çekme grafikleri ve mikroyapı görüntüleri;  
 a) 45 dk 3 Mpa, b) 60 dk 1 MPa, c) 75 dk 2 MPa.

960°C sıcaklıkta, 45 dakikada bekleme süresinde birleştirilen numune (Şekil 3.a) 150.47 MPa yükte akmaya başlayıp 205.347 MPa yükten sonra maksimum çekme değeri vermiş ve malzeme 5.5 mm uzama göstererek kopmuştur. 60 dakikada birleştirilen kaynaklı numune (Şekil 3.b) 179.73 MPa yükte akmaya başlayıp 301.407 MPa yükten sonra maksimum çekme göstererek kopmuştur. Ayrıca kaynaklı malzeme 9,8 mm uzama göstermiştir. 75 dakikada birleştirilen numune (Şekil 3.c) 23 mm uzama göstererek, 166 MPa yükte akmaya başlayıp 406.596 MPa yükten sonra maksimum çekme göstererek kopmuştur.

980°C sıcaklığında ve 45 dakika bekleme süresinde birleştirilen kaynaklı numune (Şekil 4.a) 173 MPa yükte akmaya başlayıp 220.578 MPa yükten sonra maksimum çekme göstererek kopmuştur. Ayrıca kaynaklı malzeme 6.7 mm uzama göstermiştir. 60 dakikada hazırlanan kaynaklı numune ise (Şekil 4.b) 153.44 MPa yükte akmaya başlayıp 395.332 MPa yükten sonra maksimum çekme göstererek kopmuştur. Ayrıca kaynaklı malzeme 21.8 mm uzama göstermiştir. 75 dakikada kaynaklanan numune (Şekil 4.c) 179 MPa yükte akmaya başlayıp 412.221 MPa yükten sonra malzeme 23.8 mm maksimum uzama göstererek kopmuştur.

1000 °C sıcaklığında ve 45 dakikada birleştirilen numune (Şekil 5.a) 207.77 MPa yükte akmaya başlayıp 427.047 MPa yükten sonra maksimum çekme ve 24.96 mm uzama göstererek kopmuştur. 75 dakikada hazırlanan numune (Şekil 5.c) 182.10 MPa yükte akmaya başlayıp 491.582 MPa maksimum çekme göstermiştir. Ayrıca bu numune 34 mm uzama göstermiştir. Yapılan tüm deney numuneler incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı ve uzama oranı bu deney parametresinde elde edilmiştir. 1000 °C sıcaklığında ve 60 dakikada hazırlanan numune (Şekil 5.b) 180.40 MPa yükte akmaya başlayıp 469.946 MPa yükten sonra maksimum çekme ve 29 mm uzama göstererek kopmuştur.

## Deneylerin Taguchi Optimizasyon Yöntemi ile İrdelenmesi

Bu çalışmada Taguchi optimizasyon yönteminin kullanılma nedeni 304-Cu-430 malzemeleri difüzyon kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmesinde, kaynağı etkileyecek faktörlerin bağlı etkisini belirlemektir. Bu çalışmada difüzyon kaynak sıcaklığı, bekleme süresi ve basınç deney parametreleri olarak seçilmiştir. Her deney parametresine bağlı 3 seviye bulunmakta ve deneyin gerçekleştirilmesi için  $3^3 = 27$  tane deneyin yapılması gerekmektedir. Ama Taguchi yönteminde L9 ortogonal dizisi (Tablo 3) seçildiğinde bu deney sayısı 9'a düşmüş bu da daha az maliyet ve sürelerde deneylerin gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır. Yapılan deneysel tasarım çalışmaları ile gerçekleştirilen çekme test sonuçları (Tablo 2) kullanılarak Minitab 18 programında S/N ve Anova analiz çalışmaları yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Taguchi L9 deneysel tasarım çalışma tablosu.

Deney No	Kaynak Sıcaklığı	Bekleme Süresi	Basınç
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

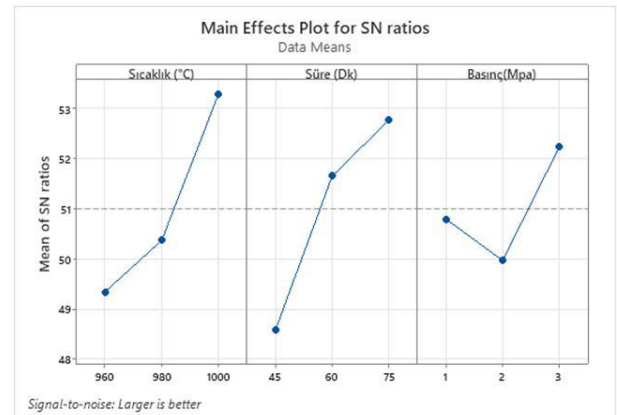
## Sinyal/Görüntü (S/N) Oranlarının Elde Edilmesi

Taguchi optimizasyonu, difüzyon kaynak parametrelerden en etkili olanı belirlemek için kullanılır. Bu nedenle Sinyal/Görüntü (S/N) oranı kullanımı, en iyi sonucu veren kaynak parametrelerini belirlenebilmesinde etkili olacaktır [19]. Bu çalışmada her bir deney numunesine ait çekme mukavemet değerleri elde edildikten sonra Minitab 18 programında Tablo 4'de gösterildiği üzere S/N oranlarının değerleri elde edilmiş ve Varyans analiz çalışmaları yapılmıştır. S/N oranı 3 farklı şekilde oluşturulabilmektedir. Biz bu çalışmada optimum proses parametrelerini bulabilmek için S/N oranlarından, "en yüksek en iyi" durum (larger is beter) tercih edilmiştir.

Tablo 4. Sinyal/Görüntü (S/N) performans değerlerinin her bir parametre için gösterilmesi.

Seviye	Sıcaklık (°C)	Süre (Dakika)	Basınç (MPa)
1	49.34	48.58	50.79
2	50.37	51.65	49.97
3	53.29	52.77	52.24

Tüm parametreler değerlendirildiğinde S/N oranının en yüksek en iyi durum değerlerine göre yapılan çalışmayla Tablo 3'deki verilerden Şekil 6'da gösterilen grafik elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında en iyi kaynak parametresinin 1000 °C sıcaklıkta, 75 dk bekleme süresi ve 3 MPa basınç olduğu ve bu parametreler dikkate alınıp kaynak işlemi gerçekleştirildiği takdirde en iyi sonucun elde edileceği belirlenmiştir.



Şekil 6. Çekme Mukavemeti için Taguchi deney dizaynında S/N performans grafiği.

## Varyans Analizi (Anova)

Deneysel çalışmada Anova kullanılmasının asıl nedeni, kaynak kalitesine etki eden parametrelerini incelemektir. Varyans analizi matematiksel bir metoda sahiptir ve bu analiz ile kaynak işleme parametrelerinden hangilerinin kaynak kalitesine en çok etki ettiğini ya da hangi parametrelerin anlamlı (doğru) sonuç verdiğini tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi ile gerçekleştirilen Varyans analiz çalışmasının sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Difüzyon kaynağında en etkili parametre %47.70 oranına sahip olan sıcaklıktır. Ardından %42.45 oranıyla süre ve %8.39 oranıyla basınç faktörü gelmektedir.

Tablo 5. Varyans Analiz Sonuçları.

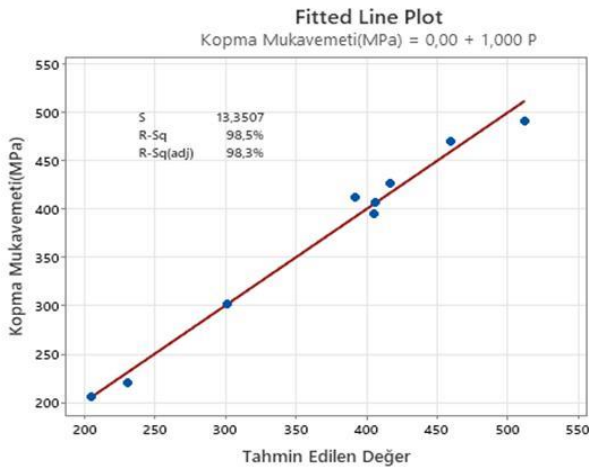
Parametreler	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	% Etki Oranı	P Değeri
Sıcaklık (°C)	2	40993	20496.3	47.70	0.030
Süre (Dk)	2	36479	17163.1	42.45	0.035
Basınç (MPa)	2	7213	3606.4	8.39	0.147
Hata	2	1248	623.8	1.45	
Toplam	8	85932		1.00	
R-Sq= %98.55		R-Sq(adj)= %94.19			

Çekme mukavemeti için Regresyon analizi: Belirtilen seviyedeki parametreler için çekme mukavemetlerinin yaklaşık değerlerinin bulunması için Tablo 6’da polinom denklemi oluşturulmuştur.

Tablo 6. Regresyon polinom denklemi.

Çekme Mukavemeti	=	370.01-65,6 Sıcaklık (°C)_960
		-27.3 Sıcaklık (°C)_980
		+92.9 Sıcaklık (°C)_1000
		-87.5 Süre (Dk)_45
		+23.2 Süre (Dk)_60
		+62.5 Süre (Dk)_75
		-13.4 Basınç (MPa)_1
		-26.2 Basınç (MPa)_2
		+39.7 Basınç (MPa)_3

Difüzyon kaynak sıcaklığı, bekleme süresi ve basınç parametreleri için Şekil 7’de olasılık grafiği oluşturulup, düz çizgi boyunca dağılmış ve %95 güven seviyesinin üstünde çalışılmış olup % 98.55 oranı elde edilmiştir.



Şekil 7. Çekme mukavemeti için olasılık grafiği.

## Deneysel Sonuçları ve Tartışma

Bu çalışmada östenitik AISI 304 ve ferritik AISI 430 paslanmaz çelik çifti 200 µm kalınlığında bakır aratabaka kullanılarak argon gazı atmosferinde sabit basınç altında 960, 980 ve 1000 °C sıcaklık, 45, 60 ve 75 dakika sürelerde difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin içyapıları optik mikroskop ile incelenmiş mekanik özelliklerini belirlemek için de çekme ve mikro sertlik testleri uygulanmıştır. Ayrıca Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak deney sayı vedizin sıralamaları belirlenmiş, S/N ve Varyans (Anova) analiz çalışmaları yapılmış, deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Sertlik test sonuçları incelendiğinde; aratabakadan uzaklaştıkça sertlik değerlerinde artışın olduğu gözlemlenmiştir. 304-430 paslanmaz çelik çiftinde en yüksek sertlik değeri 430 tarafında 1000 °C 2 MPa basınç ve sıcaklıkta 75 dakika kaynaklanmış numunede 279 HV olarak ölçülmüştür.
- Tüm deney numunelerinde artan sıcaklık ve bekleme sürelerinde malzemelerin çekme dayanımlarında artışın gerçekleştiği belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı 1000 °C sıcaklığında 2 MPa basınç ve 75 dakika bekleme süresinde 491.582 MPa olarak ölçülmüştür. En düşük çekme dayanımı ise 960 °C’de 2MPa basınç ve 45 dakika bekleme süresinde birleştirilen numunede 205.347 MPa olarak ölçülmüştür.
- En yüksek % uzama 1000 °C sıcaklıkta 2 MPa basınç ve 75 dakika bekleme süresinde kaynaklanan numunede 34 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca tüm deney numunelerinin kaynak bölgesinden ayrılmıştır.
- Taguchi deney tasarımı ile optimizasyon yapılarak, uygulanmış olan çözümlerinde 27 deney sayısı yerine, 9 deney yapılarak zamandan ve maliyetten büyük oranda tasarruf edilmiştir.
- S/N performans grafiği incelendiğinde en iyi kaynak parametresinin 1000 °C sıcaklıkta, 75 dk bekleme süresi ve 3 MPa basınç altında kaynağın en iyi sonucu vereceği belirlenmiştir.
- Çekme mukavemeti için gerçekleştirilen Varyans (Anova) analizinde en etkili parametreler sırasıyla; difüzyon kaynak sıcaklığı %47.70. %42.45 bekleme süresi ve %8.39 oranlarında basınç faktörü etkili olmuştur ve hata payı %1.45 olduğu belirlenmiştir.
- Difüzyon kaynak sıcaklığı, bekleme süresi ve basınç parametreleri için olasılık grafiği oluşturulup, düz çizgi boyunca dağılmış ve %95 güven seviyesinin üstünde %98.55 oranı elde edilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] S. Detriche, et al., “XPS fast depth profile of the native oxide layers on AISI 304, 316 and 430 commercial stainless steels and their evolution with time,” *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 243, pp.146970, 2020.



- [2] Y. Chen, et al., "Experimental study on seismic behavior of welded H-section stainless steel beam-columns", *Engineering Structures*, 259, pp.114105, 2022.
- [3] N.R. Baddoo, "Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities", *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (11) pp. 1199-1206, 2008.
- [4] A. Aran, M. A. Temel, *Paslanmaz Çeliklerin Üretimi, Kullanımı, Standartları*, Sarıtaş Teknik Yayın No:1, (2004). İstanbul: Acar Matbaacılık A.Ş.
- [5] H. Uzun, "Paslanmaz Çeliğin Fiber Lazerle Kesilmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu," Karabük Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 2019.
- [6] G. Güç, "Lazer Kaynak İle İşlenmiş Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2021.
- [7] Y. Kaya, "AISI 304 ve AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin TIG, MIG ve Örtülü Elektrod Ark Kaynağıyla Birleştirilebilirliğinin Araştırılması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25. 549-557, 3, 2010.
- [8] M., Taskin, U., Caligülü, M., Türkmen, "X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO<sub>2</sub> Laser Beam Welding", *Materials Testing*, 53 (11-12), 741-747, 2011. DOI: 10.3139/120.110283
- [9] U., Caligülü, M., Taskin, H., Kejanlı and Orhan, A., "Interface characterization of CO<sub>2</sub> laser welded austenitic stainless steel and low carbon steel couple", *Industrial Lubrication and Tribology*, 64(4), 196-207, 2012. DOI: 10.1108/00368791211232744
- [10] U. Çaligülü, "AISI 304-430 paslanmaz-AISI 1010 çelik çiftlerinin lazer yöntemi ile kaynağında birleşme özelliklerinin incelenmesi," Fırat Üniversitesi, Doktora Tezi, Elazığ, 2009.
- [11] B. Szwed, M. Konieczny, "Evaluation of corrosion resistance of titanium/stainless steel diffusion joints bonded by interlayer's made of pure metals," *Materials Science and Engineering*, Vol. 461. No:1., IOP, Publishing, 2018.
- [12] H. Kejanlı, "Diffusion welding of stainless steel 304L/Monel K-500 composite materials produced with different methods," *Advanced Composites Letters*. January, 2020.
- [13] G. Guolin, et al., "Interfacial properties of friction stir lap welded 430/304 stainless steels using Cu interlayer," *Materials Letters*, 284, 129027, 2021.
- [14] I. Hajiannia, M. Shamanian, M. Kasiri, "Microstructure and mechanical properties of AISI 347 stainless steel/A335 low alloy steel dissimilar joint produced by gas tungsten arc welding", *Mater Des*, 50 pp, 566-573, 2013.
- [15] W. P. Risk, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 115-117, Feb. 1986.
- [16] M. Taşkın, S. Ozan, "AISI 430-AISI 1010 çelik çiftinin Cu aratabaka kullanılarak yapılan TLP difüzyon kaynağında sıcaklığın birleştirmeye etkisinin araştırılması," *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 2. 3: 180-184, 2004.
- [17] M. Balasubramanian, "Characterization of diffusion-bonded titanium alloy and 304 stainless steel with Ag as an interlayer," *Int J Adv Manuf Technol*, 82:153-162. 2016.
- [18] S. Çelik, İ. Ay, "Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulaması," *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 23, 63 - 70, 1999.
- [19] H. Kejanlı, M. Avcı, "T/M yöntemiyle üretilmiş Mg-Ti alaşımının difüzyon kaynağı ile birleştirilmesine aratabakanın etkisi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9 (1), 279-289, 2018.
- [20] T. Osmanoğlu, "AISI 304 VE 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [21] M. Konar, "DP600 - 8XXX serisi alüminyum alaşımının CMT tekniği ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [22] I., Kirik, N., Ozdemir, E. H. Fırat, and U., Caligülü, "Optimization of Tensile Strength of Friction Welded AISI 1040 and AISI 304L Steels According to Statistics Analysis (ANOVA)", *Materials Testing*, Vol. 55, 06/2013, pp. 435-441, 2013. DOI: 10.3139/120.110455



# Güneş Enerjisi Destekli Vakum Distilasyon Yöntemi ile Deniz Suyundan Tatlı Su Eldesinin Enerji Analizi

## Energetic Analysis of Freshwater Production from Sea Water by Vacuum Distillation with Solar Energy Support

Mükerrem Sinem Mungan<sup>1</sup>, Orhan Arpa<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Mardin Artuklu Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü [sinemungan@artuklu.edu.tr](mailto:sinemungan@artuklu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3286-4332>

<sup>2</sup> Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü [orhana@dicle.edu.tr](mailto:orhana@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8129-1548>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### MakaleGeçmişi:

Geliş 17 Ocak 2023  
Revizyon 15 Şubat 2023  
Kabul 20 Şubat 2023  
Online 23 Mart 2023

#### AnahtarKelimeler:

Güneş Enerjisi  
Deniz Suyu  
Tatlı su  
Vakum Distilasyon  
Optimum Çalışma Basıncı.

### ÖZ

Günümüzde tüm dünyanın sorunu haline gelen temiz su ihtiyacını karşılamak için yeni çözümler bulunması gerekmektedir. Bu çözümlerden bir tanesi de deniz suyundan tatlı su elde edilmesidir. Üç tarafı denizlerle kaplı olan ülkemiz hem bu açıdan hem de bu sistemler için gerekli olan enerji göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisini kullanmak açısından da oldukça şanslı bir konumda bulunmaktadır.

Bu çalışmada güneş enerji destekli vakum destilasyon yöntemi kullanılarak deniz suyundan tatlı su elde edilmesinin teorik analizi yapılmıştır. Sistem için gerekli olan enerji ihtiyacı da yine güneş enerjisi kullanılarak PV paneller tarafından sağlandığı düşünülmüştür. Sistemden vakum altında ve atmosferik basınçta üretilecek olan su miktarları hesaplanarak kıyaslama yapılmış ve vakum altında üretim yapılmasının avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Sistemin maliyet analizi de yapılmış olup yaklaşık olarak üretilecek suyun metreküp fiyatı belirlenmiştir.

Bu çalışmada İzmir ili iklim koşulları ve Ege denizi değerleri kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 100,30,20,10 ve 5 kPa basınç altında elde edilen su miktarları, sistemin enerji ihtiyacı hesaplanmış ve maliyet analizi yapılarak m<sup>3</sup> su maliyeti hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda en yüksek su üretimi 5 kPa basınç altında elde edilmiş olup maliyeti yıllık üretime göre 19.50₺ olarak hesaplanmıştır.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 17 January 2023  
Received in revised form 15 February 2023  
Accepted 20 February 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

Solar Energy  
Sea Water  
Fresh Water  
Vacuum Distillation  
Optimum Operating Pressure

### ABSTRACT

New solutions must be found to meet the clean water need, which has become the problem of the whole world today. One of these solutions is obtaining fresh water from seawater. Our country, which is covered by sea on three sides, is in a very lucky position in terms of using solar energy, which is one of the renewable energy sources, both in this respect and considering the energy required for these systems. theoretical analysis was made.

The energy requirement for the system is also thought to be provided by PV panels using solar energy. The amount of water to be produced from the system under vacuum and at atmospheric pressure has been calculated and compared, and the advantages and disadvantages of producing under vacuum have been evaluated. The cost analysis of the system was also made and the cubic meter price of the water to be produced was determined. In this study, the climatic conditions of the province of İzmir and the values of the Aegean Sea were used.

As a result of the study, the amount of water obtained under 100, 30, 20, 10 and 5 kPa pressure, the energy need of the system was calculated and the cost analysis was made and the m<sup>3</sup> water cost was calculated. As a result of the calculations, the highest water production was obtained under 5 kPa pressure, and its cost was calculated as 19.50 ₺ according to the annual production.

Doi: 10.24012/dumf.1237643

\* SorumluYazar

## Giriş

Dünyadaki suyun % 97'si okyanus suyudur. Kalan % 3'ünün de % 80'i ya tuzludur ya da kullanıma uygun değildir. Ancak % 5'i içilebilecek sudur. Bu yüzden pek çok kişi içecek su bulamamaktadır. Bu durum, düşük yaşam standartlarına ve sağlık sorunlarına sebep olmaktadır. Temiz ve ucuz su elde etmek için pek çok teknolojiler geliştirilmiştir [1].

Desalinasyon yöntemi ile temiz su üretimi basit, verimli ve güvenlidir. Desalinasyon işlemi için gerekli olan enerji güneşi ısı enerjisi olarak kullanılabilir. Desalinasyon işleminde önce su buharlaşır içindeki istemediğimiz bileşenlerden ayrışarak temiz su olarak yoğunlaştırılır. Güneş enerjili desalinasyon ile elde edilen su piyasadaki işelenmiş suların çoğundan daha kalitelidir [2].

Güvenilir içme suyunun dağıtımı ve kullanılabilirliği ile ilgili durum, gelişmekte olan ve hatta gelişmiş ülkelerde bile ortadadır. Bu durum; gelecekte artan nüfusun baskısı, tarımsal koşullar, iklim değişiklikleri, karaların ve su kaynaklarının aşırı kullanımı yüzünden daha da kötüleşecektir [3].

Yenilenebilir enerji kaynaklı tuzdan arındırma sistemleri, suyu ekonomik ve çevre dostu bir şekilde tuzdan arındırmak için yenilikçi bir yaklaşım olarak kapsamlı bir şekilde tartışılmaktadır [4].

## Suyun dünyadaki yeri

Önemi giderek artan su dünyadaki canlıların temel ihtiyaçlarındandır. Son dönemlerde yaşanan su rezervlerindeki düşüş ve temiz su kaynaklarındaki azalmanın sebepleri arasında nüfus artışı ve küresel ısınma sayılmaktadır [5]. Yeryüzündeki insanların yaklaşık dörtte biri önemli anlamda temiz su problemi yaşamaktadır. Bahsetmiş olduğumuz bu tuzlu su kaynakları içme suyu olarak kullanılabilir hale getirilirse su sorunun çözümü için çok ciddi bir rezerv elde edilmiş olacaktır [6]. Son dönemlerde enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerjilerin kullanılmasının yaygınlaştırılması için çalışmalar yapılmıştır. Genellikle deniz bulunan bölgeler güneş enerjisi bakımından da şanslı bölgelerdir [5]. Temiz su için yapılan çalışmaların önem kazanmasının nedenleri su kaynaklarının sonuna geliniyor olması ve mevcut rezervlerin kullanılabilir durumda olmamasıdır. Su tüketim miktarı nüfusun artışı ve sanayinin gelişmesi ile sürekli artmaktadır. Su sorunu yaşayan ülkelerin çoğunun denize kıyısı bulunmaktadır. Deniz suyunun tuzlu olması nedeniyle bu rezervler doğrudan içme ve kullanım için uygun değildir [7].

## Ülkemizdeki su verileri

Ülkemizin iklim özelliği yarı kurak olarak nitelendirilmektedir. Yağışlar, iklim özellikleri ve mevsimlere göre değişiklik göstermektedir. Ülkemizin ortalama yıllık yağış miktarı 574 mm, toplam yıllık yağış miktarı 450 milyar m<sup>3</sup>'tür.

Ülkemiz bulunduğu bölge itibari ile su potansiyeli

açısından sorunları olmayan bir ülke olarak görülmektedir. Ancak kişi başına temiz su miktarına bakıldığında durumun böyle olmadığı görülmektedir. Uluslararası kriterlerde kişi başına 10 000 m<sup>3</sup> su düşen durumlarda o ülke "su zengini" sayılmakta; su miktarı, 3 000 ile 10 000 m<sup>3</sup> arasında olan ülkelerde "yeterli suyu olan ülke", 1 000 ile 3 000 m<sup>3</sup> arasında olan ülkelerde "su sıkıntısı olan ülke" olarak nitelendirilmektedir. Su miktarı 1 000 m<sup>3</sup>'ün altında olan ülkeler su fakiri sayılmaktadır. Türkiye'nin kişi başına düşen kullanılabilir miktarı dünya ortalaması ile karşılaştırıldığında su zengini olmayan ülke olduğu görülmektedir [8].

## Türkiye güneş enerji potansiyeli

Ülkemiz şanslı coğrafi yerleşimi ile ciddi bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Toplam yıllık güneşlenme süresi 2737 saattir. Toplam güneş enerjisi miktarı ortalama 1527 kWh/m<sup>2</sup> yıl'dır. Türkiye'nin neredeyse tüm bölgelerinde güneş enerjisi kullanılabilir. Ülkemizde potansiyelinin yüksek oluşu, kullanımının kolaylığı, yenilenebilir olması ve çevreci olması nedenleri ile yenilenebilir enerji kaynakları içinde hızla kullanımı artış göstermektedir [9].

## Deniz suyu özellikleri ve kalitesi

Dünyadaki denizlerin tuzluluk oranları Tablo 1'de verilmiş olup tuz seviyeleri % 0.7 - % 4.3 aralığındadır. Bağlı olan tatlı su kaynaklarına göre deniz tuz oranları değişiklik göstermektedir [6].

**Tablo 0** Dünyadaki denizlerin tuzluluk oranları (%)

Denizler	Tuz Konsantrasyonu %
Standart Deniz Suyu	3.5
Baltık Denizi	0.7
Hazar Denizi	1.3
Pasifik Okyanusu	3.4
Atlantik Okyanusu	3.6
Kızıldeniz	4.3
Basra körfezi	4.3
Karadeniz	1.8
Marmara Denizi	2.2
Ege denizi	3.8
Akdeniz	4.3

## Deniz suyundan temiz su üretme yöntemleri

Desalinasyon, deniz suyundan tuz ve diğer bileşenlerin ayrıştırılarak temiz su elde edilmesi yöntemidir [10].

Desalinasyon tesisleri genellikle başka su kaynağı olmayan Orta Doğu'nun kurak bölgelerinde kurulmaktadır. Desalinasyon tesislerinin en önemli sıkıntısı kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksek olmasıdır [11].

Membran teknolojileri ve ısı yöntemleri olmak üzere tuzdan arındırma yöntemleri iki bölümde incelenebilir.

En eski tuzsuzlaştırma yöntemleri ısı yöntemleridir. Ayrılması ve daha sonra buharın yoğunlaştırılması ile temiz su elde edilmesi yöntemidir [12].

Deniz suyu arıtımında uygulanan prosesler şöyledir.

#### Isıl Yöntemler

- Çok işlemlili damıtma
- Çok kademeli şok damıtma
- Mekanik buhar sıkıştırma
- Güneşle damıtma [13].

#### Membran Yöntemler

Membran yöntemler, destilasyon işleminde membran sistemlerinin kullanıldığı yöntemlerdir. Ters ozmos ve elektrodializ deniz suyu destilasyonunda en yaygın kullanılan yöntemlerdir [14]. Bunlar;

- Ters ozmos
- Elektrodializ
- Membran Distilasyon

### Yenilenebilir enerji kaynakları

Doğal çevrim sürecinde değişmeden kalan, harcanmasına karşın eksilmeyen, kaynaklara yenilenebilir enerji kaynakları denir [15].

Yenilenebilir enerjinin çeşitleri: Güneş Enerjisi, Rüzgar Enerjisi, Jeotermal enerji, Hidrolik Enerji [15].

### Güneş enerjisi

Güneşin çekirdeğindeki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sonucu açığa çıkan büyük enerjiye güneş enerjisi denir. Dünyaya güneş ışınları ile ulaşan bu enerjiden faydalanmak için çeşitli teknolojik sistemler geliştirilmiştir. Bunlar ile doğrudan ısı enerjisi olarak veya elektrik enerjisine dönüşmüş olarak güneş enerjisini kullanabiliriz [15].

Güneşten fazla yararlanamayan ülkeler dahi çevreye çok düşük zarar vermesi nedeni ile güneş enerjisini elverişli bir kaynak olarak değerlendirmektedirler. Ayrıca güneş tarafında üretilen enerjinin halihazırda çok düşük bir miktarı kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin yaygın olarak öncelikle fotovoltaik ve termal olmak üzere değişik tekniklerle elektrik üretiminde kullanılmasının temel nedenidir [16].

G. Xie ve ark; [17] bu çalışmada, büyük ölçüde geliştirilmiş üretkenliğe sahip yeni bir üç tüplü güneş enerjisi (TSS) etkisi sunmaktadır. Çin'in Chengdu kentinde dört gün boyunca yapılan bir deneyde bir prototip üretilmiş ve test edilmiştir. Hareketsiz suyun tatlı su verimi dört çalışma basıncında ölçülmüştür. Bunlar 95 (yerel atmosferik), 60, 40 ve 20 kPa'dır. Çalışma basıncı düşürüldüğünde hem çalışma sıcaklığı hem de üç oda arasındaki sıcaklık farkı azalmıştır. Tatlı su verimleri sırasıyla 0.77, 1.28, 1.39 ve 0.8; enerji kullanım verimleriyle sırasıyla 3.27, 6.323, 7.056 ve 4.287 kg / gün olmuştur. En iyi toplam performans 40 kPa'lık bir çalışma basıncında görülmüştür. Yıllık% 5 faiz, 20 yıl, ortalama 270 günlük çalışma süresi ve ortalama günlük 5 kg / m<sup>2</sup> / gün verimlilik göz önüne alındığında,

önerilen güneş tuzdan arındırma sistemi için tatlı su birim maliyeti yaklaşık olarak \$ 0.0082 / kg. hesaplanmıştır.

T. Ayhan ve H. Al Madani; [18] Çalışmaları yenilenebilir enerji kaynakları ve doğal vakum tekniği kullanan enerji verimli deniz suyu tuzdan arındırma sistemi ile ilgilidir. Natural Vacuum Desalination adlı yeni bir tuzdan arındırma teknolojisi önerilmiştir. Yeni tuzdan arındırma tekniği, deniz suyunun vakum altında buharlaştırılması yoluyla kayda değer bir enerji verimliliği sağlar ve benzer kapasiteye sahip herhangi bir geleneksel tuzdan arındırma tesisine kıyasla çok daha az elektrik enerjisi gerektirdiğini göstermişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla avantajlı bağlantı sağlayan umut verici tekno-ekonomik potansiyele sahip görünen önerilen doğal vakumlu deniz suyu tuzdan arındırma teknolojisinin ana işletim ve bakım özellikleri anlatılmıştır.

S. N. Kane ve ark; [19] Değişken düşük dereceli ısı kaynağı sıcaklığına sahip doğal bir vakumlu tuzdan arındırma ünitesi sayısal olarak incelenmiştir. Amaç, düşük dereceli ısı kaynağının değişken sıcaklığının tuzdan arındırma ünitesinin performansları ve özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Simülasyon 9 saat boyunca gerçekleştirilir, yerel saatle 8.00'de başlar ve 17.00'de biter. Sonuçlar, 9 saat çalışma süresine sahip tuzdan arındırma ünitesinin 5.705 L tatlı su ürettiğini ve ısı veriminin % 81.8 olduğunu göstermektedir. Bu, doğal vakumlu tuzdan arındırma ünitesinin ısı kaynağının değişen sıcaklığının, ısı kaynağının sabit sıcaklığına göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

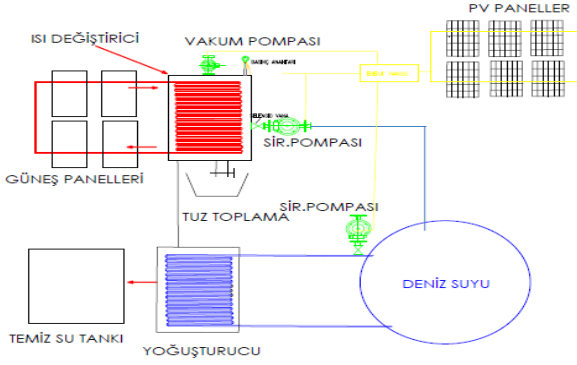
M. J. Abbaspour ve ark; [20] güneş doğal vakum tuzdan arındırma sistemini deneysel olarak araştırmışlardır. Barometrik bir su sütunu kullanılarak ve atmosferik basınç ve yerçekimi ile bir denge oluşturularak, buharlaşma odasının içinde gün boyunca vakum koşulları korunmuş ve bu da daha düşük sıcaklıklarda buharlaşmanın başlamasına ve bunun sonucunda geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimine yol açmıştır. Dört farklı çalışma basıncına sahip bir vakum oluşturmanın tatlı su üretimini üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, sistemin azaltılmış sistem basıncında daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. En yüksek saatlik ve günlük üretimler 1.134 kg/m<sup>2</sup> hr ve 8.065 kg/m<sup>2</sup> gün olmuştur. Üretilen tatlı su maliyeti 0.094 \$ / L olarak elde edilmiştir.

T. Yan ve ark; [21] vakum koşullarında çalışan iki etkili borulu güneş enerjisi damıtma sisteminin performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Vakum, bir vakum pompası kullanılarak oluşturulmuş ve çalışma basıncı 20 ila 101 kPa arasında seçilmiştir. Sonuçlar, sistemin vakum koşulu altında çalıştırılmasının tatlı su verimini önemli ölçüde arttırdığını ve kabul edilebilir elektrik pahasına verimliliğini iyileştirdiğini göstermektedir. Atmosfer basıncına kıyasla 20 kPa basınçta verim oranında iki kat artış sağlandı. Performans oranları ısıtmada sırasıyla 101, 60 ve 20 kPa'da 0.57, 0.70 ve 1.27 olarak hesaplanmıştır. Vakum işleminin, çok etkili güneş damıtıcıları için tek etkili damıtıcılardan daha ekonomik olduğu bulunmuştur.

I. J. Esfahani ve ark; [22] bu derlemede yenilenebilir enerjiyle çalışan termal tuzdan arındırma sistemleri

kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Açıklanan tüm işlemler arasında, güneş enerjisi damıtıcıları ekonomik olarak en uygun olanıdır, ancak geniş alanları işgal eder. Bir güneş enerjisi tarafından üretilen su hala yüksek kalitededir ancak üretkenlik çok düşüktür, 4 ila 6 L/m<sup>2</sup>/gün arasında; bu nedenle, su üretim maliyetleri 0,5 ila 14 \$/m<sup>3</sup> arasında yüksektir.

## Meteryal ve Metot



Şekil 1 Tasarlanan sistem

Yapacağımız bu çalışmada güneş enerjisi ile ısıtılan su direk olarak vakum altındaki ısı değiştiricide bulunan deniz suyunu buharlaştırmak için kullanılacaktır.

Sistemde kullanılacak olan pompaların enerji ihtiyacı PV paneller ile sağlanacaktır.

Buharlaştırılan suyun denizden alınan soğuk su ile yoğuşması sağlanarak temiz su tankına alınması düşünülmektedir.

Bu çalışmada hangi sıcaklıklarda, hangi basınç değerlerinde ve hangi mevsim şartlarında en verimli kullanılabilir su elde edilebileceği çalışılmıştır.

Bununla ilgili gerekli hesaplamalar yapılarak sonuçları analiz edilmiştir.

Hesaplamalarda İzmir ili ve Ege denizi özellikleri kullanılacaktır. Ege denizi ve İzmir ilinin seçilmesinin nedeni deniz tuz oranı ve güneşlenme süresi göz önüne alındığında en iyi verimi verebilecek olmasıdır. Güneş radyasyon değerleri, deniz suyu sıcaklığı, ortalama güneşlenme süreleri meteoroloji genel müdürlüğü verilerinden alınmıştır [23].

### Kabuller:

- Hesaplamalarda sistem kontrol hacim olduğundan sürekli akışlı açık sistem kabul edilmiştir.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Sistemde meydana gelecek ısı kayıpları ihmal edilmiştir.
- Sistemde iş geçişi yoktur.

### Sistem bileşenleri:

1. Güneş kolektöründen elde edilen enerji;

$$Q_{\text{kolektör}} = R * F * A * \eta_K \quad (1)$$

formülü ile hesaplanacaktır.

Q : Kolektörler tarafından üretilen enerji

R : Güneş radyasyon değeri

F : Geliş açısı düzeltme faktörü

A : Kolektör alanı

$\eta_K$  : Kolektör verimi

2. Buhar Üretici Isı Değiştirici:

Shell & tube ısı eşanjörleri endüstriyel sıvıları ısıtmak veya soğutmak için tasarlanmıştır.

Üretilecek buhar miktarı;

Kütlenin korunumu ilkesi gereği:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_ç$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{su}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{ds}$$

Enerjinin korunumu ilkesi gereği:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = \frac{dE_{sistem}}{dt} \quad (2)$$

Sürekli akış olduğu için  $dt = 0$  olur.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_ç$$

$$\bar{Q} \cong 0, \bar{W} = 0, ke \cong 0, pe \cong 0$$

$$\bar{Q}_{su} = \bar{Q}_{ds}$$

$$\bar{Q}_{su} = \dot{m}_{ds} * (u_g - u_{ds}) + \dot{m}_{ds} * h_{fg} \quad (3)$$

3. Yoğuşturucu:

Shell & tube ısı eşanjörleri endüstriyel sıvıları ısıtmak veya soğutmak için tasarlanmıştır.

Soğutma için gerekli deniz suyu miktarı;

Kütlenin korunumu ilkesi gereği:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_ç$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{su}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{ds}$$

Enerjinin korunumu ilkesi gereği:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_ç = dE_{sistem} / dt$$

Sürekli akış olduğu için  $dt = 0$  olur.

$$\dot{E}_g = \dot{E}_c$$

$$\dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, ke \cong 0, pe \cong 0$$

$$\dot{Q}_{\text{buhar}} = \dot{Q}_{\text{deniz suyu}}$$

$$\dot{m}_{su} = (\dot{m}_b * h_{fg}) / (c_p * (T_{çıkış} - T_{ds})) \quad (4)$$

#### 4. Vakum Pompası:

Isı değiştiricinin vakum altında çalışmasını sağlamak için vakum pompası bağlanacaktır.

**Tablo 2** Vakum pompası teknik özellikleri

Model		DRV10	DRV16	BSV24
Pumping Rate	m <sup>3</sup> /h(L/min)	9.9(165)	14.4(240)	20(336)
		12(200)	17.4(290)	24(403)
Ultimate Pressure	Pa		5x10 <sup>-1</sup>	
			5	
Motor Power(4P)	kW	0.4	0.55	0.75
Voltage	V		380, 400 220, 230	
			Three Phase Single Phase	
Oil Needs	L	0.55-1.1	0.65-1.2	0.75-1.5
Inlet	KF		25	
Outlet	-		25	
Ambient Temp.	°C		5-40	
Weight	kg	25	27	32

Tablo 2 değerleri esas alınarak güç sarfiyatı ve gerekli PV panel sayısı belirlenmiştir.

#### 5. Pompa:

Her bir eşanjöre deniz suyu basmak için sisteme bağlanacak olan 2 adet pompa gerekli olduğuna karar verilmiştir.

#### 6. Basınç Anahtarı:

Vakum altında olan ısı değiştiriciyi sürekli aynı basınçta tutmak, basıncı kontrol etmek ve ayarlamak için kullanılmıştır.

#### 7. Selonoid Vana:

Isı değiştiriciye istenilen zamanda ve miktarda deniz suyunu kontrollü olarak aktarmak için kullanılmıştır.

#### 8. Pv Panel:

Sistemdeki pompalar için gerekli olan enerjiyi sağlamak için kullanılacaktır. Sistem enerji ihtiyacı için 2 adet PV panel kullanılacaktır.

#### 9. Temiz Su Tankı:

Yoğuşturulmuş olan temiz kullanım suyunu depolamak için kullanılacak paslanmaz çelik modüler temiz su deposu seçilmiştir. Tankın hacmi en uzun güneşlenme süresi ve en çok yoğuşan su miktarı esas alınarak bir günlük depolamaya yetecek şekilde seçilmiştir.

Günlük yoğuşan su miktarı:

$$\dot{m}_{\text{günlük}} = \dot{m}_s * 3600 * t_{\text{güneşlenme}} \quad (5)$$

Buna göre 1000 lt'lik paslanmaz çelik su deposu maksimum günlük üretim için seçilmiştir.

#### 10. Tuz Toplama Tankı:

Buharlaştırma esnasında ısı değiştiricide biriken tuzun günlük tahliyesi için kullanılacaktır. Hacmi bir günlük tuz miktarı esas alınarak belirlenecektir.

Günlük tuz miktarı :

$$\dot{m}_{\text{tuz}} = \dot{m}_{ds} * z * 3600 * t_{\text{güneşlenme}} \quad (6)$$

Buna göre 20 kg lik tuz deposu maksimum günlük üretim için seçilmiştir.

#### Tuzsuz buhar miktarının belirlenmesi :

**Tablo 3** Denizlerimizin tuzluluk oranları

Denizlerin tuz oranları (z)	(%)
Karadeniz	1.8
Marmara denizi	2.2
Ege denizi	3.8
Akdeniz	4.3

Ege denizi tuz oranı % 3.8 olduğu için

$$\dot{m}_b = \dot{m}_{ds} - (\dot{m}_{ds} * z) \quad (7)$$

#### Maliyet analizi

Sistemde kullanılacak olan tüm ekipmanın maliyeti aşağıda gösterilen tablodaki birleşenler için maliyet hesabı değişen basınç ve dönüş suyu sıcaklıklarına göre yapılmıştır. Sistem toplam çalışma süresi, yıllık üretilen su miktarı ve amortisman değerleri düşünülerek elde edilen temiz su birim maliyeti bulunmuştur.

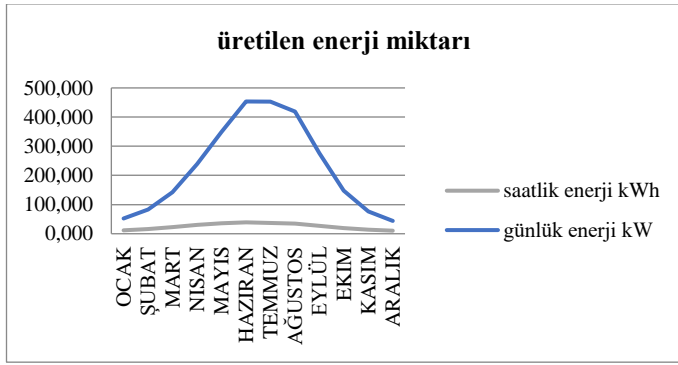
#### Araştırma bulguları

Öngörülen sistem üzerinde hesaplamalar :

- 100, 30, 20, 10 ve 5 kPa basınç değerlerine göre yapılmıştır.
- Yoğuşturma için kullanılacak deniz suyu dönüş sıcaklığı ısı kirlenme düşünülerek 30 ° C ve 40° C ye göre hesaplanmıştır.
- PV panel elektrik üretimi için [24] linki kullanılarak İzmir iline göre 0.5 kW kapasiteli panelin aylara göre ürettiği enerji miktarı hesaplanmıştır.
- Pompalar için harcanacak olan enerji miktarı kataloglardan alınan değerlere göre hesaplanmıştır.
- Sistemde kullanılacak olan tüm ekipmanın maliyeti hesaplanmış buna göre 1 m<sup>3</sup> su fiyatı hesaplanmıştır. 100 kPa için vakum pompası ve bileşenleri hesaba katılmamıştır.
- Hesaplamalar 20 yıl ömür üzerinden %10 yıpranma payı düşünülerek yapılmıştır.

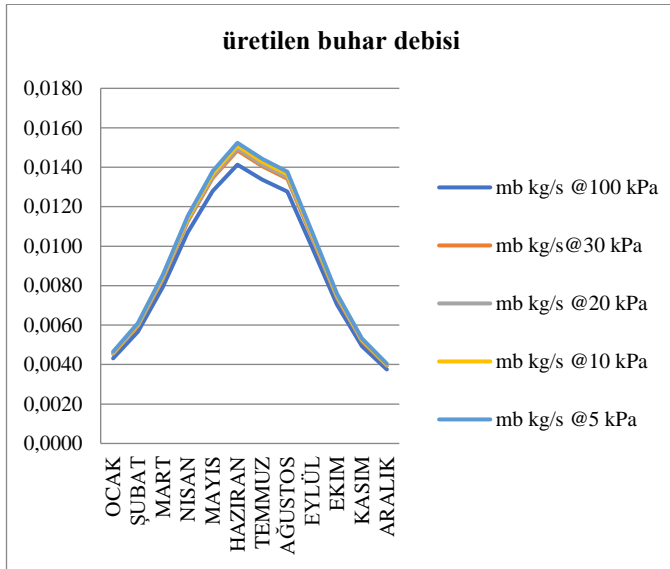
İzmir şartlarında aylara göre 4 adet kolektörden elde edilen saatlik ve günlük enerji değerleri hesaplanmıştır. En yüksek enerji değerine ortalama 453 kW ile Haziran ve Temmuz aylarında; en düşük enerji değerine 44 kW ile Aralık ayında ulaşıldığı hesaplanmıştır. Hesaplamalarda

ortalama günlük ışınım değerleri ve güneşlenme süreleri meteoroloji genel müdürlüğü verileri kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 2 Üretilen Enerji Miktarı

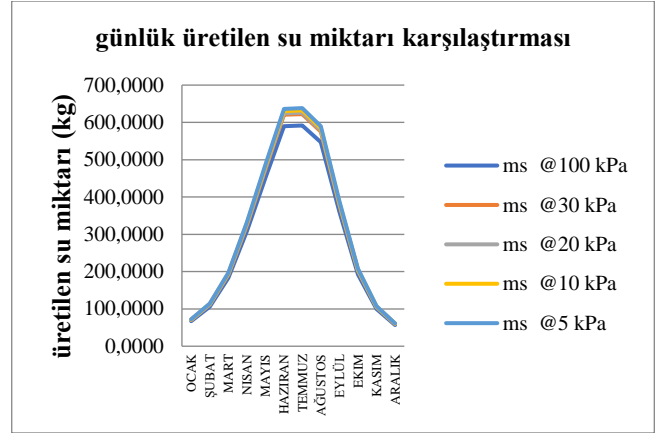
1. Buharlaştırılan su miktarı ve tuzsuz su buharı miktarı hesaplanmıştır. Ege denizi tuzluluk oranı olan %3.8 kullanılmıştır. Öncelikle buharlaştırılan su miktarı formül (4) kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra Ege Denizi tuzluluk oranı olan %3.8 lik kısmı bu değerden çıkarılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan basınç değerlerine göre hesaplanan buhar miktarı aşağıdaki gibidir. En yüksek buhar debisi 5 kPa da Haziran ayında 0.0152 kg/s olarak hesaplanmıştır. En düşük buhar debisi 100 kPa da Aralık ayında 0.0038 kg/s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3 Aylara göre buhar debisi grafiği

Su buharı debisi kullanılarak hesaplamalardaki basınç değerlerine göre günlük güneşlenme sürelerinde çalışıldığı

düşünülerek günlük toplam üretilen su miktarları hesaplanmıştır. En yüksek üretim 5 kPa basınçta Temmuz ayında 638.3 kg olarak hesaplanmıştır. En düşük üretim 100 kPa basınçta Aralık ayında 56.7 kg olarak hesaplanmıştır. Elde edilen toplam günlük su miktarları şekil 4 te verilmiştir.



Şekil 4 Değişen basınç değerlerinde günlük su miktarı karşılaştırması

Sistemin toplam enerji ihtiyacı ortalama 0.5 kW olarak hesaplanmıştır. Hesaplamada vakum pompası ve santrifüj pompa ve sirkülasyon pompasının değişken basınçlarda ve aylarda farklı üretilen su miktarları göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Debi artışlarında pompa daha fazla enerji harcayacağından bunlar hesaplamalara eklenmiştir. Enerji ihtiyacı aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Yoğuşurma kısmında soğutma suyunun 40 °C veya 30 °C olması arasında harcanan enerji açısından büyük bir kayıp olmadığı için ısıl kirlenme de düşünülerek dönüş ısısının 30 °C olması daha uygun olacaktır.

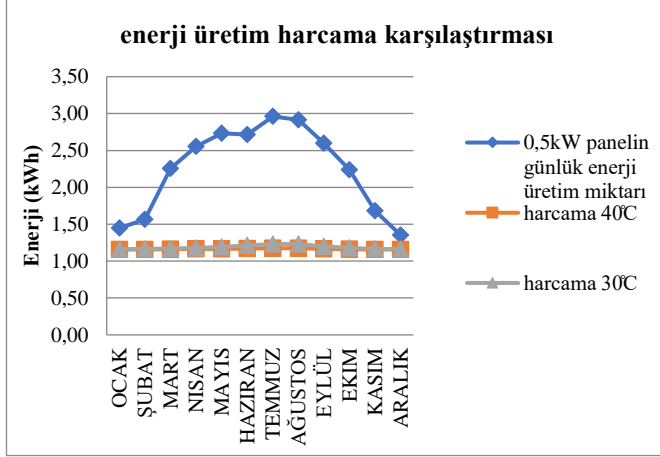
Tablo 4 Sistem enerji ihtiyacı

AYLAR	Vakum pompası	Santrifüj pompa	S.P. T <sub>a</sub> =40°C	S.P. T <sub>a</sub> =30°C	Toplam T <sub>a</sub> =40°C	Toplam T <sub>a</sub> =30°C
Ocak	0.4	0.75	0.01	0.01	1.16	1.16
Şubat	0.4	0.75	0.01	0.02	1.16	1.17
Mart	0.4	0.75	0.01	0.02	1.16	1.17
Nisan	0.4	0.75	0.01	0.03	1.16	1.18
Mayıs	0.4	0.75	0.02	0.04	1.17	1.19
Haziran	0.4	0.75	0.02	0.06	1.17	1.21
Temmuz	0.4	0.75	0.02	0.08	1.17	1.23
Ağustos	0.4	0.75	0.02	0.08	1.17	1.23
Eylül	0.4	0.75	0.02	0.05	1.17	1.20
Ekim	0.4	0.75	0.01	0.03	1.16	1.18
Kasım	0.4	0.75	0.01	0.02	1.16	1.17
Aralık	0.4	0.75	0.01	0.01	1.16	1.16

PV panel elektrik üretimi [24] linki kullanılarak İzmir iline göre 0.5 kW kapasiteli panelin aylara göre ürettiği enerji miktarı hesaplanmıştır. PV panellerin günlük enerji üretimi hesaplanmış ve sistem enerji tüketimi ile karşılaştırılmıştır.

PV panellerin en yüksek enerji üretimi Temmuz ayında 2,96 kWh olarak hesaplanmıştır. Sistemin en yüksek enerji sarfiyatı Temmuz ve Ağustos aylarında 1.23 kWh olarak hesaplanmıştır.

Üretilen enerji miktarı sistemin yıl boyunca ihtiyacını karşılayacak kapasitede olduğu görülmüştür. Enerji üretim ve üretim-harcama karşılaştırması aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

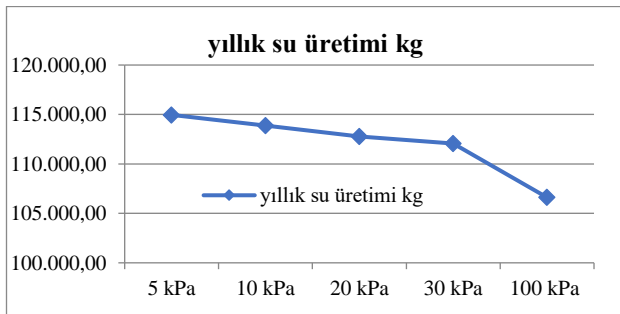


Şekil 5 Sistem enerji üretim-harcama karşılaştırması

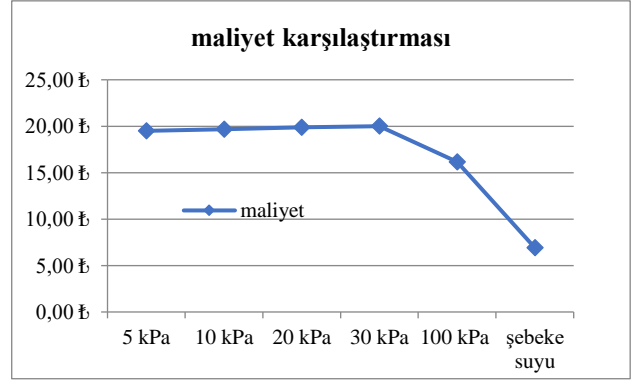
Son olarak sistemin tüm birleşenlerin maliyet hesapları yapılarak toplam **42.697,00 ₺** olarak belirlenmiştir.

Farklı basınç değerlerinde yıllık üretilen su miktarı dikkate alınarak 1 m<sup>3</sup> suyun üretim bedeli belirlenmiştir. Bu hesaplama yapılırken sistem yıpranma payı ve sistem ömrü düşünülerek hesaplanmıştır. Hesaplamalar 20 yıl üzerinden aylık 30 gün, güneşlenme süreleri boyunca ve %10 yıpranma payı eklenerek yapılmıştır. 100 kPa için vakum pompası ve bağlantıları hariç olarak hesaplama yapılmıştır. 100 kPa basınçta 1 m<sup>3</sup> su bedeli bu nedenle daha ucuz çıkmıştır. En yüksek yıllık su üretimi 5 kPa basınç altında toplam 114 958 kg olarak hesaplanmıştır. En düşük yıllık su üretim miktarı 100 kPa basınç altında toplam 106 612 kg olarak hesaplanmıştır.

En düşük metre-küp su maliyeti 100 kPa da 16.16 ₺ olarak hesaplanmıştır. En yüksek metre-küp su fiyatı 30 kPa da 20₺ olarak hesaplanmıştır. İzmir için İZSU dan alınan verilere göre konutlar için suyun m<sup>3</sup> fiyatı 6.92 ₺ dir. Bu fiyata göre kıyaslama yapıldığında üretilen suyun maliyeti oldukça yüksek çıkmaktadır.



Şekil 7 Yıllık su üretimi



Şekil 8 1 m<sup>3</sup> su maliyet karşılaştırması

## Sonuç

Yeryüzünde canlıların en önemli ihtiyaçlarının başında su gelmektedir. Su sıkıntısının tüm dünyayı tehdit etmeye başladığı günümüzde alternatif su kaynakları önem kazanmıştır. Bu konuda şanslı konumda olan ülkemiz hem denizlerle çevrili olması hem de yenilebilir enerji kaynakları açısından uygun konumda olması sebebi ile deniz suyunun artırılarak tatlı su olarak kullanılabilmesi açısından şanslı bir ülkedir.

Bu çalışmada Ege denizine kıyısı olan İzmir ili analiz için seçilmiştir. Seçim yapılırken deniz tuz oranı ile güneşlenme süresi ve ışınım değerleri göz önüne alınarak daha verimli olacağı düşünülmüştür. Güneş enerji destekli vakum destilasyon yöntemi ile tatlı su elde etmek için güneş kolektörü, ısı değiştirici, yoğunlaştırıcı, santürlüj ve sirkülasyon pompaları seçilerek sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemin ihtiyacı olan enerjiyi karşılamak üzere PV paneller kullanıldığı düşünülmüş ve bu paneller ile enerji üretimi hesaplanmıştır.

Seçilen konum olan İzmir ili için güneş radyasyon değerleri, güneşlenme süreleri, deniz suyu sıcaklığının aylara göre ortalama değerleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü sitesinden alınarak hesaplamalara dahil edilmiştir.

Kolektörler yardımıyla elde edilen enerji ile vakum altındaki ısı değiştiricide deniz suyu buharlaştırılarak tuzdan arındırılmıştır. Daha sonra yoğunlaştırıcıya gelen su buharı denizden alınan su kullanılarak yoğunlaştırılmış burada ısı kirlenme düşünülerek olabilecek minimum çıkış suyu sıcaklığı dikkate alınmıştır. Yoğuşan su günlük depolama tankına alınarak destilasyon işlemi bitirilmiştir.

Vakum altında üretilen su miktarını belirlemek ve kıyaslama yapabilmek için 100,30,20,10 ve 5 kPa değerleri alınarak hesaplanmış ve kıyaslama yapılmıştır.

Tüm bu hesaplamalar sonucunda şu sonuçlara ulaşılmıştır: 100 kPa basınç altında hesaplanan yıllık toplam tatlı su üretimi 106 612 kg olup 1 m<sup>3</sup> maliyeti 16.16 ₺ olarak hesaplanmıştır. 30 kPa basınç altında hesaplanan yıllık toplam tatlı su üretimi 112 067 kg olup 1 m<sup>3</sup> maliyeti 20.00 ₺ olarak hesaplanmıştır. 20 kPa basınç altında hesaplanan yıllık toplam tatlı su üretimi 112 761 kg olup 1 m<sup>3</sup> maliyeti 19.88 ₺ olarak hesaplanmıştır.



10 kPa basınç altında hesaplanan yıllık toplam tatlı su üretimi 113 890 kg olup 1 m<sup>3</sup> maliyeti 19.68 ₺ olarak hesaplanmıştır.

5 kPa basınç altında hesaplanan yıllık toplam tatlı su üretimi 114 958 kg olup 1 m<sup>3</sup> maliyeti 19.50 ₺ olarak hesaplanmıştır.

100 kPa da su miktarının az olmasına karşılık birim maliyetin düşük olma sebebi vakum pompası kısmının olmayışıdır. Çalışma sonucunda en yüksek su üretimi 5 kPa basınç altında gerçekleşmiş olup en uygun fiyat 100 kPa da karşımıza çıkmaktadır.

Her ne kadar 100 kPa da birim su maliyeti düşük çıkmış olsada büyük ölçekli tesisler düşünüldüğü zaman düşük basınçtan elde edilecek su miktarı göz önüne alındığında su ihtiyacını karşılamak açısından düşük basınç değerlerinde çalışmak daha avantajlı olacaktır.

İzmir ilinde belediyeden alınan şebeke suyu fiyatı İZSU internet sitesinde 6.92 ₺ dir. Görüldüğü üzere destilasyon ile su üretimi oldukça maliyetli bir yöntemdir. Ancak dünyada sürekli artan su sorunu ve teknolojinin de ilerlemesi ve bu sistemlerin yaygınlaşması ile bu maliyetin giderek daha çok düşecektir. Daha önce yapılan çalışmalar ile kıyasladığımız zaman şu andaki hesaplamalara göre birim m<sup>3</sup> maliyetinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Yapılan literatür araştırmalarına kıyasla üretilen su miktarı ve maliyeti diğer bazı çalışmalarla yakın bazılardan daha ekonomik değerlerde çıkmıştır.

Ancak günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları teknolojisinin hızla ilerlemesi sistem kurulum maliyetlerini düşürecektir. İncelenen sistem çevreci ve tamamen kendi enerjisini kendi üreten bir sistem olduğu için uzun vadede temiz su ihtiyacı için kullanımının yaygınlaşacak ve buna bağlı olarak maliyeti düşecektir.

## Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre aşağıda belirtilen önerilerin dikkate alınması daha sonraki çalışmalarda su üretimini arttıracaktır.

- Yoğuşturucu kısmında soğutma için kullanılan deniz suyu ısı kazanmış olduğunda buharlaştırma kısmında su kaynağı olarak kullanılarak bir miktar daha enerji tasarrufu yapılabilecek ve buharlaştırılacak su miktarı artacaktır.
- PV paneller vasıtası ile elde edilen enerjinin bir kısmı güneş pilleri ile depolanarak enerjiye daha fazla ihtiyaç duyulan zaman dilimlerinde kullanılabilir.

## Kaynakça

- [1] J. N. Perlin, J. and Gordes, "An Historical and Prospective Review of Solar Water Purification, Bringing Water to the World, ASES, Riverton, Santa Barbara," 2005.
- [2] "Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü," *Kurs Notları*, pp. 26–27, 2004.
- [3] S. De Koning, J. and Thiesen, "Aqua Solaris- an Optimized Small Scale Desalination System with 40 Litres Output Per Square Meter Based Upon Solar-Thermal Distillation," *Desalination*, vol. 182, pp.

- 503–509, 2005.
- [4] C. Koroneos, A. Dompros, and G. Roubas, "Renewable energy driven desalination systems modelling," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 5, pp. 449–464, 2007.
- [5] U. Kincay, O., Akbulut, "İstanbul Şartlarında Deniz Suyundan Temiz Su Eldesi," *Acad. Emerg. Med.*, vol. 18, pp. S257–S258, 2011.
- [6] A. Can, M., Etemoğlu A.B., Avcı, "Deniz Suyundan Tatlı Su Eldesinin Teknik ve Ekonomik Analizi," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 7, pp. 147–160, 2002.
- [7] İ. Yiğit, A. ve Atmaca, ., *Güneş Enerjisi, Alfa-Aktüel Yayınları, Bursa*. 2010.
- [8] H. Ünsal, "Güneş Enerjisi Destekli Su Damıtma Sistemi Performansının Araştırılması Yüksek Lisans Tezi," SELÇUK ÜNİVERSİTESİ, 2017.
- [9] F. Ç. Kılıç, "Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu Ve Üretim Teknolojileri," *Mühendis ve Makina Derg.*, vol. 56, no. 671, pp. 28–40, 2015.
- [10] Wang Y., "Composite Fouling of Calcium Sulfate and Calcium Carbonate in a Dynamic Seawater Reverse Osmosis Unit, Master of Science, The University of New South Wales, Sydney, Australia," 2005.
- [11] M. D. Vishwanathappa, "Desalination of seawater using a high- efficiency jet ejector," no. May, pp. 1–146, 2005.
- [12] Dölgün ve Alpaslan, *Deniz Kıyısı Yerleşimlerde Su Temini İçin Tuzdan Arındırma (Desalinasyon) Tesislerinin Kullanılması. Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları IX. Ulusal Kongresi, Bildiriler Kitabı*. 2012.
- [13] J. . Khawaji, A.D., Kutubkhanah, I.K., Wie, . "Advances in seawater desalination technologies," *Desalination*, vol. 221, pp. 47–69, 2008.
- [14] Y. Aydın, F., Ardalı, "Seawater Desalination Technologies," *J. Eng. Nat. Sci.*, no. 362, pp. 156–178, 2012.
- [15] K. Kaya and E. Koç, "Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu," *Mühendis ve Makina*, vol. 56, no. 668, pp. 36–47, 2015.
- [16] N. Bekar, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Açısından Türkiye'nin Enerji Jeopolitiği," *Türkiye Siyaset Bilim. Derg.*, vol. 3, no. 1, pp. 37–54, 2020.
- [17] G. Xie, W. Chen, T. Yan, J. Tang, H. Liu, and S. Cao, "Three-effect tubular solar desalination system with vacuum operation under actual weather conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 205, no. November 2019, p. 112371, 2020.
- [18] T. Ayhan and H. Al Madani, "Feasibility study of renewable energy powered seawater desalination technology using natural vacuum technique," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 506–514, Feb. 2010.
- [19] S. N. Kane, A. Mishra, and A. K. Dutta, "Preface: International Conference on Recent Trends in Physics (ICRTP 2016)," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 755, no. 1, 2016.
- [20] M. J. Abbaspour, M. Faegh, and M. B. Shafii, "Experimental examination of a natural vacuum desalination system integrated with evacuated tube collectors," *Desalination*, vol. 467, pp. 79–85, Oct. 2019.

- [21] T. Yan, G. Xie, L. Sun, M. Du, and H. Liu, "Experimental investigation on a two-effect tubular solar still operating under vacuum conditions," *Desalination*, vol. 468, Oct. 2019.
- [22] I.J.Esfahani, J. Rashidi, P. Ifaei, and C. K. Yoo, "Efficient thermal desalination technologies with renewable energy systems: A state-of-the-art review," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 351–387, 2016.
- [23] "Radyasyon Mevsimler - Meteoroloji Genel Müdürlüğü." [Online]. Available: [https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon\\_iller.aspx?il=izmir](https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=izmir). [Accessed: 16-Jun-2021].
- [24] "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission." [Online]. Available: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html). [Accessed: 15-Jun-2021].



## Araştırma Makalesi / Research Article

## İşe alım süreçlerinde aşamalı olarak TOPSIS ve VIKOR yöntemleri uygulanarak iş gören seçimi yapılması

*Selection of employees by gradually applying TOPSIS and VIKOR methods in recruitment processes*Abdulbari Aslan<sup>1</sup>, Mesut Hüseyinoğlu<sup>2\*</sup>, Cafer Budak<sup>3</sup><sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, [Abdulbari.Aslan@dedas.com.tr](mailto:Abdulbari.Aslan@dedas.com.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1528-7959><sup>2</sup>Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [mesuth@dicle.edu.tr](mailto:mesuth@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6130-6658><sup>3</sup>Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, [cafer.budak@dicle.edu.tr](mailto:cafer.budak@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8470-4579>

## MAKALE BİLGİLERİ

## ÖZ

## Makale Geçmişi:

Geliş 21 Şubat 2023  
Revizyon 14 Mart 2023  
Kabul 18 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

## Anahtar Kelimeler:

Çok kriterli karar verme, işe alım,  
TOPSIS, VIKOR

Değişen ve gelişen dünyada kurumların daha rekabetçi ve sürdürülebilir yönetim süreçlerinde karar verme oldukça önemli bir yer edinmiştir. Son 80 yılda tamamen sistemli bir disiplin ve model halini alan karar verme bilimi tüm organizasyon ve yaşam alanlarına yön vermeye devam etmektedir. Tüm şirketler için hayati bir öneme sahip olan ve gittikçe daha da önem kazanan çalışan etmeni ve çalışan seçimi de karar verme modelleri ile yönetilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada öncelikle karar verme modelleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Daha sonra Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) modellerinden TOPSIS yöntemi kullanılarak iş başvurusu yapan 8 adaydan 4 kişilik mülakat listesi oluşturulmuştur. Son olarak seçilen adaylar içinden en uygun adayı tercih etmek için VIKOR yöntemi uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

## ARTICLE INFO

## ABSTRACT

## Article history:

Received 21 February 2023  
Received in revised form 14 March 2023  
Accepted 18 March 2023  
Available online 23 March 2023

## Keywords:

Multi-criteria decision making,  
recruitment, TOPSIS, VIKOR

In the changing and developing world, decision making has gained a very important place in the more competitive and sustainable management processes of institutions. The science of decision making, which has become a completely systematic discipline and model in the last 80 years, continues to shape all areas of organization and life. The employee factor and employee selection, which are of vital importance for all companies and are gaining more and more importance, have also begun to be managed with decision making models. In this study, information about decision making models is firstly presented. Then, a 4-person interview list was created from 8 candidates who applied for a job by using the TOPSIS method, one of the Multi-Criteria Decision Making (MCDM) models. Finally, the VIKOR method was applied to choose the most suitable candidate among the selected candidates and successful results were obtained.

Doi: 10.24012/dumf.1254026

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

20. Yüzyıl başlarında bilimsel yaklaşımların her alana etki etmesi sonucu organizasyonlar, yönetsel olarak daha sistemli ve daha verimli olmaya itilmiştir. Değişimin ve rekabetin gittikçe hızlandığı günümüz dünyasında herhangi bir şirketin hayatta kalabilmesi için o alandaki bilimsel yöntem ve teknikler hayati önem kazanmıştır. Karmaşa ile karşı karşıya geldiğimizde onu yapılandırmak, iç yüzünü görmek veya en azından onunla ilgili genel bir bakış açısı kazanmak için yollar ararız. Modeller, karmaşıklığı azaltıp asıl önemli olan noktalara odaklanmamızda bize yardımcı olurlar [1]. 20. Yüzyılın ilk çeyreği ile beraber gittikçe önem kazanan ve ihtiyaç duyulan bu bilimsel yaklaşımlardan biri de karar verme kuramıdır. Karar verme kuramsal bazda sezgisel karar verme kuramları, rasyonel karar verme kuramı ve çok kriterli karar verme kuramları olmakla birlikte literatüre yön veren ve etki alanı kamu yönetiminin de dışına çıkarak diğer bilimlere de katkılar sunan kuram, rasyonel karar verme yaklaşımı olmuştur [2].

İkili karşılaştırmalar yöntemi ilk olarak 1927 yılında geliştirilmiş, daha sonra izleyen çalışmalarda ikili karşılaştırmalar karar matrisi olarak kullanılarak Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinde kullanılmaya başlanmıştır [3].

Her ne kadar karar verme kuramının çıkış tarihi net değilse de bu kuramın en büyük iki öncüsünün Herbert A. Simon ve Chester Barnard olduğu kabul edilmektedir. Karar, probleminin belirlenmesinden, problemin çözümüne kadar olan süreci kapsamaktadır. Literatüre baktığımızda karar verme sürecinin aşamaları farklı kişiler tarafından farklı noktalarda ayrılarak izlenmiştir [4]. İnsan doğuşundan bu yana hangi yemeği yiyeceğinden, hangi müziği dinleyeceği, hangi yoldan evine gideceği, hangi marketten hangi ürünü alacağı, hangi mesleği seçeceği gibi sayısız rutin ve hayati kararlar verir. Karar verme kaçınılmaz bir olgudur. Karar vermeyerek bile bir karar verme durumudur. Çünkü karar vermeyerek mevcuttaki durumun akışını onaylayarak yine bir karar verilmiş olur. Bu aşamalar genel olarak aynı olup aşama sayısının farklı olması bu aşamaların farklı yorumlanması veya detaylandırılması sebebi ile olmaktadır. Bu aşamalar genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Problemin tanımlanması ve belirlenen amaç ışığında bir çözümün netleştirilmesi
- Kriterlerin belirlenmesi
- Kısıtların da göz önünde bulundurularak alternatiflerin belirlenmesi
- Problemin bir karar modeline uyumlanarak en iyi kararın bulunması
- Kararın uygulanması
- Sonuçların izlenmesi

Bu aşamalardan sonra karar verici tarafından karar verme süreci gerçekleştirilmiş olur. Karar verme oldukça karmaşık ve zihinsel faaliyet gerektiren bir süreçtir. Dolayısıyla bu sürecin sistematik bir düzlemde incelenmesi gerekmektedir. Kendisi içinde farklı aşamalardan oluşan bu süreçte her aşama bir öncesinin bir sonucu niteliğindedir. Bu nedenle

her aşama ayrı bir önem taşımaktadır. Herhangi bir aşamadaki doğru tercih sonuç olarak kararın da iyi olmasını sağlayacaktır [5].

ÇKKV yöntemleri, 1960'lı yıllarda, çok kriter olduğu durumda karar verme işlemini kolaylaştıracak birtakım yöntemlerin gerekli görülmesiyle geliştirilmeye başlanmıştır. Öncelikle karar teorisinde ve yöneylem araştırmasında kullanılmış daha sonra mali ve iktisadi alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. ÇKKV, karar vericinin sayılabilir sonlu ve sayılamaz seçenekler arasından en az iki kriteri dikkate alarak seçim yapmasıdır. Karar birimlerinin bir alt dalı olan çok kriterli karar verme, karar sürecini kriterlere göre modeller ve analiz eder [6].

Karar verme aşamasında seçeneklerin fazla olması karar verme aşamasında karar vericiyi zor durumda bırakabilir. Bu yüzden belirli bir karar yöntemi uygulanmalı ve seçenek sayısı en aza indirilmelidir. Barry Schwartz, 'the paradox of choice' adlı kitabında seçenek sayısının artmasının doğru kararı verme işlemini zorlaştırdığını ve karar vericinin kararı sonunda hala tam tercih tatmini yaşamadığına değinmektedir. Bu yargıyı destekleyen bir diğer deney ise Sheena Iyengar ve Mark Lepper'in yaptığı reçel deneyidir [7]. Bu deneyde bir markette birbirini takip eden iki cumartesi günü iki stant kurulur. Bu stantlardan birinde 6 çeşit reçel, diğer cumartesi günü kurulan stantta ise 24 çeşit reçel sunulur ve reçel standını daha dikkat çekilir hale getirmek için standı uğrama ve test etme durumunda 1 dolarlık indirim kuponu da verilir. Araştırma bittiğinde sonuçlar şaşırtıcıdır. 24 çeşit reçelin sunulduğu standın önünden geçenlerin (242 kişi) yaklaşık %60'ı (145 kişi) stant önünde durmuş ve bu duranların yalnızca %3'ü reçel satın almıştır. 6 çeşit reçelin sunulduğu standın önünden geçen 260 kişinin %40'ı (104 kişi) stant önünde durmuş ve bu müşterilerin %30'u reçel satın almıştır. Amerikalı psikolog Ray Hyman ve İngiliz psikolog William Edmund Hick'den ismini alan Hick-Hyman Yasası karar verme süresinin ilgili seçeneklerin sayısı ve karmaşıklığı ile doğru orantılı olduğunu ifade eder. Kısaca seçenek sayısı artarsa karar verme süresi artar. Burada karar vermede harcanan zaman Denklem (1) ile verilmektedir.

$$T = b \times \log_2(n + 1) \quad (1)$$

Denklemde (1)'de  $T$ , karar verme süresini,  $n$ , seçenek sayısını ve  $b$  ise ölçülen verilere çizgi uydurulması ile ampirik olarak belirlenebilen bir sabiti ifade etmektedir.

Literatürde kendine ait karakteristik özelliği olan pek çok ÇKKV yöntemi bulunmaktadır. Alternatif sayısına göre, çok kriterli karar verme yöntemleri aşağıdaki gibi iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar:

**Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV):** Alternatif sayısının fazla ve belirli olmadığı problemlerde uygulanan karar verme yöntemidir. Bir tasarım modelidir ve sürekliliğin olduğu durumlarda karar verme işlemidir. Burada birden çok amaca ulaşılabilecek en iyi karar aranır.

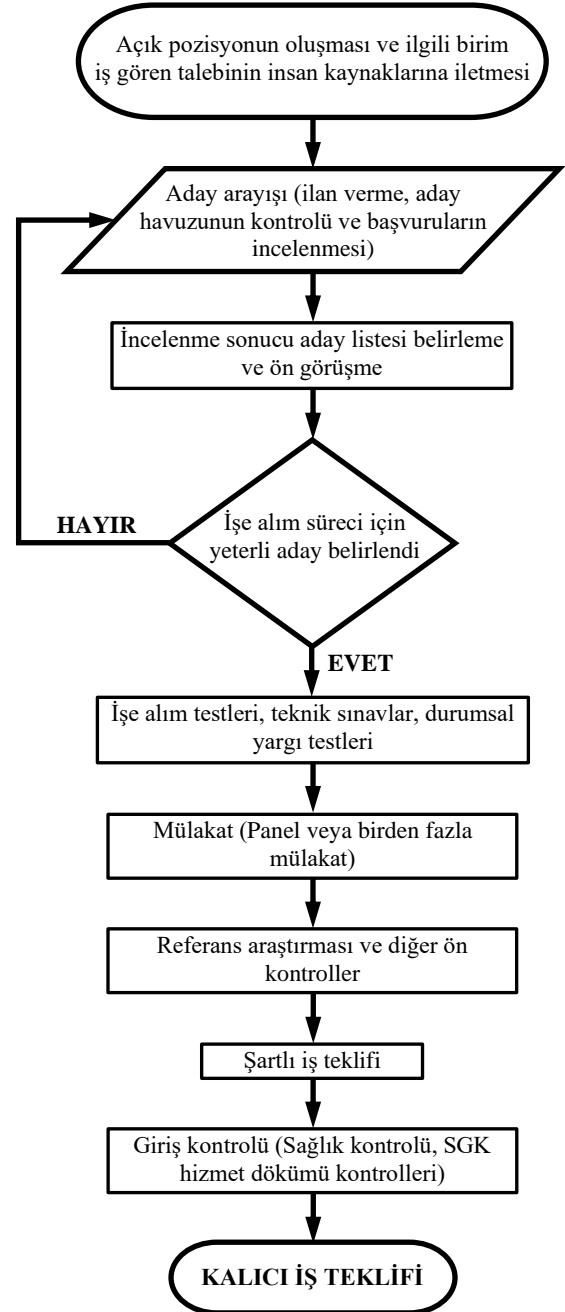
**Çok Nitelikli Karar Verme (ÇNKV):** Alternatif sayısının belirli sayıda olduğu durumlarda uygulanan karar verme yöntemidir. Kesikli durumlarda uygulanan karar verme işlemidir. Genel olarak seçim modelidir. Seçilen kararın en fazla faydalı olanı hedeflenir.

Bu iki sınıfın en temel farkı, önceden belirlenmiş alternatiflerin varlığıdır. ÇNKV, hangi alternatiflerin daha önceden belirlendiği ile ilgilenirken; ÇAKV birden çok fonksiyonun üstesinden gelmede karşılaşılan problemin en uygun çözümüyle ilgilidir. Yani, değerlendirme, öncelik verme, seçim gibi çoklu ve genellikle birbiriyle çelişen özellikleri bulunan alternatifler arasında tercih yapmaktır [8]. Karar verici ÇKKV yöntemlerinden herhangi birini kullanmadan önce sıralamada kullanılan karar verme yöntemlerinin mi yoksa ağırlıklılandırma kullanılan karar verme yöntemlerinin mi daha çok fayda sağlayacağını belirlemelidir. Öncelikle bu yöntemin netleştirilmesi karar verici için daha fayda sağlayacaktır [9].

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı alanlardan biri de insan kaynakları için hayati bir öneme sahip iş gören seçimidir. ÇKKV her ne kadar insan kaynakları uygulamalarında diğer organizasyon alanlarına göre geç yer almış olsa da bu alanda daha yaygınlaşmakta ve önem kazanmaktadır. İnsan kaynakları kavramının, ilk olarak 1817 yılında dünya çapında tanınmış olan ekonomist Springer tarafından kullanıldığı kabul görmektedir. Kavramın içerik bakımından bir bütünlüğe kavuşması ise; Taylor ve Fayol'un yönetim alanındaki fikirleri ile gelişmiştir [10]. Personel seçimi probleminde ilk uygulama Taylor vd. tarafından bir fakülteye dekan atanmasında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan karar kriterleri; akreditasyon süreçleri ile bilgi ve deneyimi, idari görev deneyimi, yayınları ve fon bulma becerisidir. 33 farklı aday bu kriterler doğrultusunda değerlendirmeye tabi tutulmuştur [11]. İş gören seçimi insan kaynakları temin ve seçimi (kadrolama), personel/insan kaynakları yönetimi literatüründe kadrolama, personel temin/sağlama ve seçimi, seçme-yerleştirme, personel sağlanması ve işe yerleştirilmesi, insan kaynaklarının tedariki (sağlanması) şeklinde de adlandırılan önemli bir insan kaynakları yönetimi işlevidir. Bu işlev kısaca, işletmenin ihtiyaç duyduğu uygun niteliklere sahip (işe uygun) kişilerin araştırılması, seçilmesi ve işe alınmasına yönelik faaliyetleri içerir [12]. İş gören seçiminde kullanılan karar verme yöntemleri amaçlara ve kısıtlara göre seçilmekte ve bu kararlarda her kararda olduğu gibi en fazla fayda ve en az zarar sonucu hedeflenmektedir. Çünkü karar en az iki alternatiften bir seçimin olduğu süreçtir. En iyi fayda için bir alternatifi tercih ederken diğer alternatif veya alternatiflerden vazgeçmek ise bu alternatiflerin faydasından vazgeçmek anlamına gelir. İnsanların tüm potansiyellerinin belirlenmesinin mümkün olmaması ve işe alınacak kişilerin sergileyecekleri performansları mutlak bir doğrulukla önceden bilmenin neredeyse imkânsız olması, seçim sürecinin elde var olan bilgilerle en iyi sonuçları tahmin etme (öngörme) halini almasına sebebiyet vermektedir [12].

İş gören seçimi, kurumsal şirketler tarafından tamamen sistemsel yürütülmektedir. İşe alım tüm kurumsal ve belirli ölçekteki şirketlerde norm kadroya göre yönetilen bir süreçtir. Norm kadro bir işletmenin belirlediği hedeflerine ulaşması için gerekli tüm şartlar göz önünde bulundurularak (ekipman, taşıt, lokasyon, teknoloji vb.) yapılması gereken işin iş yüküne göre unvan ve niteliklere göre istihdam edilmesi gereken sayının belirlenmesidir. Norm kadro, iş ölçümü ve iş örneklemesi yardımıyla belirlenir. İş gören alımı bir diğer deyişle işe alım süreci şirket bünyesinde bulunan ilgili

birimin kadro artışı veya mevcut norm kadroyu koruma amaçlı (işten ayrılan, terfi, transfer veya rotasyonu yapılan iş gören yerine işe alım) yapılmaktadır. İşe alım süreci ilgili birimin norm kadrosunu referans alarak iş gören ihtiyacı talebini insan kaynaklarının ilgili birimine iletmesiyle başlar. İlgili araştırmalar sonucu bu talebin paydaşlarca onayı ile işe alım için aksiyon alınır. Karar verme, işe alım sürecinin her aşamasında yer almakta ve çok büyük önem arz etmektedir. İşe alım sürecindeki aşamalar işletmelerin insan kaynakları modeline, talep edilen pozisyona, işin türüne, işin süresine, seviyesine ve ivediliğine göre değişmekle birlikte genelde Şekil 1'de verilen akış şemasındaki aşamalar ile gerçekleşir.



Şekil 1. İşe alım süreci akış şeması.

Şekil 1'de görülen akış diyagramındaki aşamalar, şirketlerin işe alım politikasına göre yer değiştirebilir. Genel anlamda işe alım aşamaları bu şekilde olmakta ve görüldüğü üzere bu aşamalarda karar verme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Seçeneklerde bazı kaynaklarda değinilmese de oyun bozucu kural dediğimiz bazı yerlerde adı baraj kriter olarak kabul edilen eleyici kriterler vardır. Bu kriterin olmaması durumunda diğer kriterlere bakmaya gerek kalmadan karar verme süreci durdurulur. Örneğin Endüstri Mühendisinin arandığı bir pozisyonda baraj kriter Endüstri Mühendisidir. Bu kriteri sağlamayan bir adayın diğer kriterleri sağlayıp sağlamadığına bakılmaz.

İşe alımda bir pozisyon için verim, fayda ve kalıcılık düşünüldüğünde her zaman en iyi aday istenilen sonucu vermemektedir. Bu yüzden açık pozisyon için her zaman en iyi aday değil en uygun aday aranmalıdır. Adayın en iyi olması ilgili pozisyonun kriterlerini fazlasıyla karşılamasına rağmen adayın işe başladıktan sonra iş tatminsizliği yaşaması, ücret konusunda beklentisinin karşılanmaması, farklı karşılaştırmalar yaparak ilgili pozisyonda istenileni vermemeye başlayarak kısa sürede başka bir iş arayışına girmesi veya işveren feshi ile tekrardan ilgili pozisyonun açık kalmasına sebep olmaktadır. Bu ise ilk tercihten dolayı daha maliyetli bir durum almaktadır. Bu sebeple işe alım süreçlerinde hangi adayın alınacağı bilgisi ile beraber hangi adayın alınmaması gerektiği kararı da verilmelidir.

İş gören seçimi sürecinde, karar verici durumunda olanlar iki şekilde seçim hatası yapabilirler. Karar vericiler, aslında reddedilmesi gereken adayları işe alabilirler. Ya da bu durumun tersi olan, aslında iş için oldukça uygun olan adayları reddedebilirler. Bu tip hataların önlenmesi için de insan kaynakları temin ve seçim sürecinde güvenilir ve geçerli ölçüm araçlarının kullanılması gerekir [12].

Karar verme aşamasında alternatif ve kriterlerin karşılaştırma yapılabilmesi için birbiriyle aynı ölçütlerle kıyaslanmalıdır. Bu ise genel olarak sayısal ölçütlerle uygulanmalıdır. Karar verme yöntemlerinin ve çeşitlerinin sürekli olarak çoğalmasıyla, onların karşılaştırmalı değerlerinin anlaşılması çok önemli hale gelmiştir. Bu konuda kullanılan yöntemlerden her biri, karar vericilerin farklı alternatif kararlar arasından seçim yapmalarına yardımcı olmak için farklı sayısal teknikler kullanmaktadır. Bu alternatiflerin belirli kriterler üzerindeki etkisine ve dolayısıyla karar vericilerin genel faydasına dayanarak bulgular elde edilir. Karar yöntemlerini karşılaştırmaya ve en iyisini seçmeye çalışırken meydana gelen zorluk, bir paradoksun ortaya çıkmasına neden olabilir [13].

## Materyal ve yöntem

İlgili iş gören seçimi süreci için karar verme modelini uygulayacağımız iki kritik aşama bulunmaktadır: Bunlardan ilki, ilgili başvurular arasında mülakata katılacak olanları belirlemek, ikincisi ise mülakata katılanlar arasında en uygun adayı seçmektir. Bu duruma istinaden başvurular arasında bir sıralama yapmak ve en uygun kriterlere sahip olanları belirlenen mülakat programına dahil etmek gereklidir. Bu sebeple ilk aşamada sıralamada kullanılan ÇKKV yöntemi olan TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) kullanılacaktır. Sonrasında ise ağırlıklandırmada kullanılan ÇKKV yöntemlerinden VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemi, mülakat programına dahil olan adaylar arasında en uygun adayı belirlemek amacıyla kullanılmıştır

Benzetim için endüstri mühendisliği ilanı verilerek istenilen şartlara istinaden bu açık pozisyona başvuran 8 kişinin CV'lerindeki kriterler değerlendirilecek olup mülakat için TOPSIS yöntemi ile 4 kişi belirlenecektir. Daha sonra VIKOR yöntemi uygulanarak mülakat aşamasında ilgili açık pozisyon için en uygun aday seçimi yapılacaktır

## TOPSIS yöntemi

TOPSIS yöntemi, ÇKKV yöntemleri içerisinde en kullanışlı yöntemlerden biri olması sebebi ile literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. TOPSIS Yöntemi Hwang Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilmiştir [14]. Bu yöntemde yaklaşım çok kriterli kararlar içerisinde seçilen kararın pozitif ideal çözüme en yakın, negatif olan ideal çözüme de en uzak olanı bulmayı esas alır. Bununla birlikte; belirlenen en iyi kriter her zaman pozitif ideal çözüme en kısa mesafede olmadığı gibi; negatif ideal çözüme de en uzak mesafede olmayabilir. Karar verilirken en ideal çözüm bulunmaya çalışılır, en riskli çözüm veya karardan da uzak durulmaya çalışılır. Bu sebeple genel mantalite olarak işe alım mantığı ile örtüşmektedir. Çünkü bir pozisyon için en uygun olan aday belirlenirken bu pozisyon için olmaması gereken aday da belirlenmelidir. TOPSIS yöntemi aşağıda verilen aşamalardan oluşmaktadır.

### 1. Aşama: Karar matrisinin normalizasyonu

Bu aşamada normalize karar matrisleri hesaplanarak oluşturulur. Matrisin elemanları; her bir kriterle ait olan değerlerin o kriterlerin kareleri toplamının kareköküne bölünmesi ile Denklem (2)'deki gibi hesaplanır.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij})^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Denklem (2) yardımıyla elemanları hesaplanan normalize edilmiş karar matrisi Denklem (3)'te verilmiştir.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \dots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (3)$$

### 2. Aşama: Normalize matrisin ağırlıklandırılması

Burada normalize edilmiş değerler, önem derecelerini gösteren;  $w_j = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$ ,  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$  ağırlıkları ile çarpılır. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin son hali aşağıdaki gibi olur.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} = w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & w_3 r_{13} & \dots & w_n r_{1n} \\ v_{21} = w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & w_3 r_{23} & \dots & w_n r_{2n} \\ v_{31} = w_1 r_{31} & w_2 r_{32} & w_3 r_{33} & \dots & w_n r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} = w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & w_3 r_{m3} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

### 3. Aşama: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi

Bu aşamada;  $i = 1, 2, \dots, m$  ve  $j = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere pozitif ideal çözüm  $A^+$  ve negatif ideal çözüm  $A^-$  aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$A^+ = \{(\max v_{ij} / j \in J^+), (\min v_{ij} / j \in J^-)\} \quad (5)$$

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, v_{j+1}^+, \dots, v_n^+)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} / j \in J^+), (\max v_{ij} / j \in J^-)\} \quad (6)$$

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, v_{j+1}^-, \dots, v_n^-)$$

Burada,  $J^+$ ; fayda kriterlerini ve  $J^-$ ; maliyet kriterlerini ifade etmektedir.

### 4. Aşama: Uzaklıkların hesaplanması

Belirlenen karar veya çözümün her iki seçeneğe olan uzaklığı Denklem (7) ve Denklem (8) yardımıyla hesaplanır.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

### 5. Aşama: İdeal çözüme izafi yakınlığın hesaplanması

İdeal çözüme göre izafi yakınlık aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (9)$$

### 6. Aşama: Sıralamanın yapılması

Burada ideal çözüme olan yakınlığa göre sıralama yapılarak 1 veya sıraya göre kaç uygun alternatif varsa onlar sıralanır.

### TOPSİS yöntemi ile mülakat için aday belirlenmesi

Çalışmanın bu kısmında, endüstri mühendisliği ilanına başvuran 8 kişinin CV'lerindeki kriterler TOPSİS yöntemi ile değerlendirilerek mülakat için 4 aday belirlenmiştir. Adayların CV'leri üzerinde yapılan incelemelerde aşağıda maddeler halinde belirtilen kriterler dikkate alınmıştır.

- Yaş kriteri; doğum yılı baz alınarak hesaplanmıştır.
- Tecrübe yılları; yıl ve ay olarak hesaplanmıştır.
- Bilgisayar bilgisi; subjektif olarak CV'de yazılan programların 10 üzerinden puanlanmasıyla elde edilmiştir.
- Yabancı dil bilgisi; subjektif bir şekilde CV'de yazılan bilgiler göz önünde bulundurularak (okuduğu okul, sınav, ERASMUS gibi bilgiler göz önüne alınarak) 10 üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu kriterlerden yaş kriteri minimum, tecrübe, bilgisayar bilgisi ve yabancı dil bilgisi maksimum yönlüdür. Veriler gerçek bir süreçten alınmış ve aday isimleri mahremiyet açısından değiştirilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. İlanı başvuru yapan adaylara ait veriler

Ağırlık	İsim-Soy İsim	Ahmet Demir	Mehmet Kara	Ayşe Kartal	Demet Kurak	Murat Yiğit	Sevgi Yadigar	Ömer Aydın	Filiz Durak	
0.2	Yaş	Veriler	23	35	42	26	33	28	28	25
		Karesi	529	1225	1764	676	1089	784	784	625
		Normalize	0.266	0.405	0.486	0.301	0.382	0.324	0.324	0.289
		Ağırlıklı Normalize	<b>0.0532</b>	0.0810	<b>0.0972</b>	0.0601	0.0763	0.0648	0.0648	0.0578
0.3	Tecrübe	Veriler	1.5	9.4	11.3	5.9	7.8	5.5	3.7	4.2
		Karesi	2.25	88.36	127.69	34.81	60.84	30.25	13.69	17.64
		Normalize	0.077	0.485	0.583	0.304	0.403	0.284	0.191	0.217
		Ağırlıklı Normalize	<b>0.0231</b>	0.1455	<b>0.1749</b>	0.0913	0.1208	0.0851	0.0573	0.0650
0.3	Bilgisayar Bilgisi	Veriler	4	8	8	9	7	7	6	8
		Karesi	16	64	64	81	49	49	36	64
		Normalize	0.194	0.389	0.389	0.438	0.340	0.340	0.292	0.389
		Ağırlıklı Normalize	<b>0.0583</b>	0.1167	0.1167	<b>0.1313</b>	0.1021	0.1021	0.0875	0.1167
0.2	Yabancı Dil	Veriler	6	7	6	8	8	9	2	3
		Karesi	36	49	36	64	64	81	4	9
		Normalize	0.324	0.378	0.324	0.432	0.432	0.486	0.108	0.162
		Ağırlıklı Normalize	0.0648	0.0756	0.0648	0.0864	0.0864	<b>0.0972</b>	<b>0.0216</b>	0.0324

Tablo 1’de başvuru yapan adayların yaş, tecrübe, bilgisayar ve yabancı dil bilgilerine ait veriler sunulmuştur. Her kriter satırında adaylara ait olan en küçük ve en büyük değerler dikkate alınır. Pozitif ideal çözümler; yaş kriteri minimum yönlü olduğundan minimum olan veri, diğer kriterler maksimum yönlü olduğundan maksimum olan veriler dikkate alınarak belirlenmiştir. Negatif ideal çözümler ise bu durumun tam tersi uygulanarak belirlenmiştir. Tablodan da görüleceği üzere; kalın ve siyah renkli değerler pozitif ideal çözümleri, kalın ve kırmızı renkli değerler ise negatif ideal çözümleri ifade etmektedir. Pozitif ve negatif ideal çözümler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Pozitif ve negatif ideal çözümler

Kriter	Pozitif İdeal Çözüm	Negatif İdeal Çözüm
Yaş	0.0532	0.0972
Tecrübe	0.1749	0.0231
Bilgisayar Bilgisi	0.1313	0.0583
Yabancı Dil	0.0972	0.0216

Tablo 2’de sunulan verilerden faydalanılarak pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıklar hesaplanmıştır (Tablo 3). Pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklık değerleri kullanılarak ideal çözüme izafi yakınlıklar belirlenmiş ve Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 3. Pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar ile ideal çözüme izafi yakınlık değerleri

İsim-Soy İsim	Pozitif İdeal Çözüme Uzaklık $S_i^+$	Negatif İdeal Çözüme Uzaklık $S_i^-$	İdeal Çözüme İzafi Yakınlık $C_i^+$	Sıra No
Ahmet Demir	0.1714	0.0616	0.2644	8
Mehmet Kara	0.0481	0.1468	0.7531	1
Ayşe Kartal	0.0565	0.1682	0.7485	2
Demet Kurak	0.0846	0.1246	0.5957	4
Murat Yiğit	0.0666	0.1267	0.6554	3
Sevgi Yadigar	0.0951	0.1119	0.5404	5
Ömer Aydın	0.1470	0.0553	0.2734	7
Filiz Durak	0.1285	0.0825	0.3911	6

Tablo 3’ten görüleceği üzere; en büyük  $C_i^+$  değerine sahip aday en uygun adayı ifade etmektedir. En yüksek değere baktığımızda, Mehmet Kara’nın ilk çağrılacak aday olduğu tespit edilmiştir. Mülakat listesi tabloda verilen sıraya göre istenen sayıda çağrılabilir. Mülakata 4 kişinin çağrılacağı varsayılarak, 4 kişilik mülakat listesi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Tablo 4. Mülakata çağrılacak aday listesi

Sıra No	Mülakata Çağrılacak Adaylar
1	Mehmet Kara
2	Ayşe Kartal
3	Murat Yiğit
4	Demet Kurak

Bu karar yöntemi ile ilgili başvurular arasında mülakata çağrılacak en uygun adaylar belirlenmiştir. Bu 4 kişilik aday

grubu mülakat tarihinden 2 gün önce aranmış, kendilerine ilgili pozisyon, mülakat tarihi ve yeri hakkında bilgi verilmiştir. Mülakat öncesi adaylara sınav gönderilmiş olup mülakat esnasında 4 aday da olumlu değerlendirilmiştir. Adayların mülakat sonuçlarının karşılaştırılabilir olması için mülakat sonuçları mülakat esnasında sorulara verilen cevaplar, iletişim yönü, yetkinlik, çalışma esnekliği, işe uyum gibi birçok kriterlere göre 10 üzerinden puanlanmıştır.

İkinci aşamada yani mülakat aşamasında, ilgili açık pozisyon için en uygun aday seçilecektir. Bu seçimde mevcut mülakat listesine VIKOR yöntemi uygulanarak en uygun iş gören tercihi yapılacaktır.

### VIKOR yöntemi

VIKOR yöntemi, birden çok kriterin değerlendirildiği karar verme problemlerinde alternatifler arasından uzlaşık bir sıralama yapma ve uzlaşık bir çözüme ulaşmayı amaçlar. Tekniğin temeli 'ideal çözüme yakınlık' ölçümüne dayanır. Uzlaşma, ortak kabul üzerinde anlaşmaya varmaktır. Uzlaşık çözüm ise ideale en yakın uygun çözümdür. Her alternatifin her kriter açısından değerlendirildiği varsayımı altında, ideal alternatife yakınlık değerleri karşılaştırılarak uzlaşık sıralama oluşturulur [15]. VIKOR yöntemi aşağıda verilen aşamalardan oluşmaktadır.

#### 1. Aşama: Karar matrisinin oluşturulması

İlgili karar durumunun bağlı olduğu kriterler, alternatifler ve kriterlerin bağlı olduğu alternatifleri puanlandıktan sonra ilgili skorlar karar matrisine dönüştürülür (Denklem (10)).

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (10)$$

#### 2. Aşama: Her kriter için en iyi ve en kötü değerlerin belirlenmesi

Karar matrisi oluşturduktan sonra en iyi ve en kötü değerler belirlenir. Burada, kriterlere göre iki farklı yol izlenir.

Eğer kriter fayda özelliği taşıyorsa;

$$f_j^+ = \max_i x_{ij} \quad (11)$$

$$f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (12)$$

Eğer kriter maliyet özelliği taşıyorsa;

$$f_j^+ = \min_i x_{ij} \quad (13)$$

$$f_j^- = \max_i x_{ij} \quad (14)$$

şeklinde hesaplanır.

#### 3. Aşama: Normalize karar matrisinin oluşturulması

Bu aşamada karar matrisini oluşturan değerlerin karşılaştırılabilirliğini artırmak ve daha sağlıklı ilerleyebilmek için normalizasyon işlemi yapılır. Normalize edilmiş karar matrisinin elemanları;



$$r_{ij} = \frac{f_{ij}^+ - x_{ij}}{f_{ij}^+ - f_{ij}^-} \quad (15)$$

şeklinde elde edilir.

#### 4. Aşama: Normalize edilen karar matrisinin ağırlıklandırılması

Ağırlık faktörleri ( $w_j$ ) normalize edilen karar matrisinin her bir elemanı ile çarpılarak ağırlıklandırılan normalize karar matrisi ( $V$ ) elde edilir. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elemanları ( $v_{ij}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{ij} = r_{ij} \cdot w_j \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2n} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & \dots & v_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (17)$$

#### 5. Aşama: Ortalama grup faydası ve en büyük pişmanlık değerlerinin hesaplanması

Ortalama grup faydası,  $S_i$ , en büyük pişmanlık değeri ise  $R_i$  ile ifade edilmektedir. Bu iki faktör aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} = \sum_{j=1}^n r_{ij} \cdot w_j = \sum_{j=1}^n \frac{f_{ij}^+ - x_{ij}}{f_{ij}^+ - f_{ij}^-} w_j \quad (18)$$

$$R_i = \max_j v_{ij} = \max_j \left( \frac{f_{ij}^+ - x_{ij}}{f_{ij}^+ - f_{ij}^-} w_j \right) \quad (19)$$

#### 6. Aşama: $Q_i$ değerlerinin hesaplanması

Tüm alternatifler içinde en uygun alternatifin bulunması gerekmektedir. Bunun için ise bu alternatifler sıralanmalıdır. Bu duruma bağlı olarak  $Q_i$  değerinin hesaplanması için aşağıdaki parametreler kullanılır:

$$S^+ = \min_i S_i \text{ ve } S^- = \max_i S_i \quad (20)$$

$$R^+ = \min_i R_i \text{ ve } R^- = \max_i R_i \quad (21)$$

Bu parametreler yardımıyla ve kriterlerin çoğunluğunun ağırlığını gösteren  $q$  parametresinin formülde yer almasıyla  $Q_i$  değeri bulunur.  $q$  parametresi genel olarak grup faydasını sembolize ederken  $(1-q)$  karşıt görüşün minimum pişmanlığını ifade etmektedir.  $q > 0.5$  olduğu durum,  $Q_i$ 'nin hesaplanması ile sıralamadaki alternatiflerin olumlu tutum gösterme eğiliminde olduğunu,  $q < 0.5$  olduğu durum bu durumun tam tersi olduğu yani olumsuz tutum gösterdiğini belirtir. Çoğunlukla  $q = 0.5$  seçilerek eşit mesafeli ve uzlaşmacı tutum sergilenir. Buradan  $Q_i$ ;

$$Q_i = \frac{q \cdot (S_i - S^+)}{S^- - S^+} + \frac{(1 - q) \cdot (R_i - R^+)}{R^- - R^+} \quad (22)$$

#### 7. Aşama: Alternatiflerin sıralanması ve şartların uygunluğunun kontrolü

Bu adımda  $S_i$ ,  $R_i$  ve  $Q_i$  değerleri kararın tutarlılığı konusunda bilgi verecektir. Bu parametreler sayesinde kararın uygunluğu kontrol edilir. Tüm alternatifler için  $Q_i$  değerleri hesaplanır. Bu bir tabloda en küçük  $Q_i$  değerinden en büyük  $Q_i$  değerlerine doğru sıralanır. Burada  $Q_i$  değerlerinin hazırlandığı tabloda en küçük  $Q_i$  değerine sahip alternatifin iki şartı sağlaması beklenir.

Şart 1: En ideal ve en ideale en yakın seçenek arasında fark olduğunu ortaya koyar.  $Q_i$  değerleri küçükten büyüğe sıralandığında en küçük ( $A_1$ ), ikinci en küçük değer ( $A_2$ ) olarak kabul edilirse:

$$D(A_2) - D(A_1) \geq DQ \quad (23)$$

koşulu sağlanmalıdır.  $DQ$  parametresi  $\frac{1}{m-1}$  formülüyle hesaplanır. Burada;  $m$ , alternatif sayısını göstermektedir. Eğer alternatif sayısı 4'ten küçükse  $DQ = 0.25$  kabul edilir. Buna göre (22)'de verilen eşitsizlik bu şartı sağlıyorsa  $A_1$  alternatifi bu koşulu sağlıyor denir.

Şart 2:  $Q_i$  tablosunda en küçük değere sahip olan  $A_1$  alternatifinin ayrıca  $R_i$  ve  $S_i$  tablosunda da sıralamada en küçük değerlere sahip olması beklenir. Bu durumda seçilen alternatif istikrarlı kabul edilir. Bu sonuçların tam tersi olma durumunda; eğer şart 1 sağlanmıyorsa, alternatiflerin tamamı uzlaşık en iyi çözüm kümesinde yer alır. Eğer şart 2'yi sağlamıyorsa,  $A_1$  ve  $A_2$  alternatiflerinin her ikisi de uzlaşık ortak çözüm kabul edilir.

Önceki bölümde ilan edilen açık pozisyon için yapılan başvurulardan 4 kişilik mülakat listesi TOPSİS yöntemi ile oluşturuldu. Mülakat için oluşturulan listelerdeki aday sayısı, mülakatı yapan tarafın ayıracağı zamana, pozisyon kritikliğine, şirketin işe alım politikalarına bağlıdır. Daha önce belirtildiği gibi mülakatların hem şeffaf olması hem de tüm adayların şansını deneyebilmesi amacıyla bir pozisyon için en az 3 aday çağrılmalıdır.

Bu aşamada VIKOR yöntemi kullanılarak açık pozisyon için en uygun aday seçimi yapılacaktır. Değerlendirme yapılırken adaylar, sınava ve mülakat değerlendirmesine tabi tutulduğu için mevcut kriterlere ek olarak yeni kriterler dikkate alınacaktır. Bu durumda TOPSİS yönteminde kullanılan kriterlerin ağırlıklarını değışecektir.

Kriter sayısı ve kriterlere ait ağırlıklar değıştiğinden karar matrisi tekrardan oluşturulmuştur. Sonrasında her kriter için en iyi ve en kötü değerler belirlenmiştir. Son olarak VIKOR yönteminde belirtilen aşamalar sırası ile uygulanmış ve gerekli parametreler hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu elde edilen veriler sırası ile Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 5. Mülakata çağırılan adaylara ait veriler ve  $f_i$  değerleri

İsim-Soy İsim	Yaş	Tecrübe	Bilgisayar Bilgisi	Yabancı Dil	Ücret	Sınav	Mülakat
Mehmet Kara	35	9.4	8	7	8.500	7	8
Ayşe Kartal	42	11.3	8	6	9.250	8	7
Murat Yiğit	33	7.8	7	8	8.000	8	6
Demet Kurak	26	5.9	9	8	7.500	7	8
En iyi değer, $f_j^+$	26	11.3	9	8	7.500	8	8
En kötü değer $f_j^-$	42	5.9	7	6	9.250	7	6

Tablo 6. Mülakata çağırılan adayların  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri

Ağırlık		0.11	0.15	0.11	0.11	0.14	0.18	0.2	$S_i$	$R_i$
İsim-Soy İsim		Yaş	Tecrübe	Bilgisayar Bilgisi	Yabancı Dil	Ücret	Sınav	Mülakat		
Mehmet Kara	Normalize	0.5625	0.3519	0.5	0.5	0.5714	1.0	0.0	<b>0.485</b>	<b>0.180</b>
	Ağırlıklı									
	Normalize	0.062	0.053	0.055	0.055	0.080	0.180	0.000		
Ayşe Kartal	Normalize	1.0000	9.4	0.5	1.0	1.0000	0.0	1.0	2.025	1.410
	Ağırlıklı									
	Normalize	0.110	1.410	0.055	0.110	0.140	0.000	0.200		
Murat Yiğit	Normalize	0.4375	11.3	1.0	0.0	0.2857	0.0	2.0	<b>2.293</b>	<b>1.695</b>
	Ağırlıklı									
	Normalize	0.048	1.695	0.110	0.000	0.040	0.000	0.400		
Demet Kurak	Normalize	0.0000	5.9	0.0	0.0	0.0000	1.0	0.0	1.065	0.885
	Ağırlıklı									
	Normalize	0.000	0.885	0.000	0.000	0.000	0.180	0.000		

Tablo 7. Hesaplanan  $Q_i$  değerleri

İsim-Soy İsim	$S_i$	$R_i$	$Q_i (q = 0.5)$	$q = 0.5$ 'e göre sıralama
Mehmet Kara	0,4847	0,1800	0,0000	1 ( $A_1$ )
Ayşe Kartal	2,0250	1,4100	1,0248	3 ( $A_3$ )
Murat Yiğit	2,2931	1,6950	1,2500	4 ( $A_4$ )
Demet Kurak	1,0650	0,8850	0,5456	2 ( $A_2$ )

VIKOR yönteminde belirtilen  $D(A_2) - D(A_1) \geq DQ$  şartının sağlanması gerekmektedir. Uygulamada genellikle  $q = 0.5$  kabul edildiğinden, bu çalışmada da  $q = 0.5$  olarak dikkate alınacaktır.  $DQ = 1/(m - 1)$  olmak üzere  $m$  alternatif sayısı 4 alınarak  $DQ = 0.33$  olarak hesaplanmıştır. En küçük iki alternatifin  $Q_i$  değerleri birbirinden çıkarıldığında çıkan sonucun,  $DQ$  değerinden büyük eşit olması durumunda  $A_1$  alternatifinin seçilmesi kabul edilebilir avantaj şartını sağladığı kabul edilir.

$D(A_2) - D(A_1) \geq DQ \rightarrow 0.546 \geq 0.5$  olduğundan karar tutarlıdır. İkinci şart olarak  $Q_i$  değerleri küçükten büyüğe sıralandığında ilk olan ( $A_1$ ) alternatifi;  $R_i$  ve  $S_i$  sıralamalarında da en küçük olmalıdır.

Tablo 7 incelendiğinde,  $Q_i$  sıralamasında en küçük olan Mehmet Kara,  $R_i$  ve  $S_i$  tablosunda da minimum olmaktadır. Bu yüzden ilgili pozisyon için Mehmet Kara'nın seçilme kararı hem tutarlı hem de istikrarlıdır.

## Sonuç ve Öneriler

İş gören alımında karar verme hayati bir önem taşımaktadır. Karar verme aşamasında bazı kriterlerin ölçülemiyor olması ve burada alınacak kararın hem şirketin geleceğini ve hem de bir insanın hayatını etkiliyor olması insan kaynakları için kritik önem taşımaktadır.

Yaygın fikrin aksine birçok aday, başvuru aşamasında, CV iletiminde, telefon mülakatı gibi ön görüşmelerde de elenmektedir. Bu yüzden karar verme yönteminin yalnızca mülakat sonrası uygulanması hem insan kaynakları uzmanı için hem de iş arayışında bulunan aday için soruna yol açacaktır. Burada iş başvurusunun işe girmek kadar önemli olduğunu da göstermek adına karar verme yöntemi olarak TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Tercih edilebilecek adayların arasında bir sıralama yapılarak mülakatta şansını en yüksek adaylar çağrılarak hem açık pozisyon için gecikmemesi (bazı mülakatlarda olumlu adayın bulunmama durumunda

süreç tekrardan baştan başlamakta hem maddi hem de zaman anlamında kayıplar yaşanmaktadır) hem de en uygun adayların çağırılması sağlanmıştır. Daha açıklayıcı olmak adına “oyun bozucu” veya “baraj kriter” olarak adlandırılan kriterler (Endüstri Mühendisi pozisyonu için adayın Endüstri Mühendisi olamaması gibi) kontrollü bir şekilde takip edilmiştir. Aday mahremiyeti ve KVKK cezai sorumluluğu açısından adayların özel bilgileri değiştirilmiştir. İlk aşamada işe başvuran 8 aday TOPSIS yöntemi ile incelenip aralarında iş için en uygun 4 aday belirlenmiş ve mülakat listesi oluşturulmuştur. Bu sayede pozisyon için en uygun 4 aday netleştirilmiştir. Daha sonra ise TOPSIS yöntemiyle belirlenip çağırılan adaylar sınava alınmış ve mülakata tabii tutulmuştur. Burada adayların sınav sonucu, mülakatta bildirdikleri ücretleri ve mülakat notlarının da eklenmesiyle kriterlerin sayısı artmış ve ağırlık oranları değişmiştir. Buna bağlı olarak ikinci karar aşamasında VIKOR yöntemi uygulanmış ve 4 aday arasından mevcut kriterlere göre en uygun aday belirlenmiştir. Son kontrollerle bu tercihin istikrarlı ve tutarlı olduğu da doğrulanmıştır. Bu yöntem kapsamında yapılan analiz sonucu adaylardan “Endüstri Mühendisi” pozisyonu için en uygun aday Mehmet Kara isimli aday olup yöntemin hata payı kontrolleriyle de ilgili pozisyon için en uygun aday olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma ile de iş gören seçimlerinde özellikle tek bir aşamanın olmadığı, bu aşamaların her birinde zincirleme bir karar verme mekanizmasının işlediği görülmüştür. Bu yöntemler kullanılırken zaman, aday sayısı, pozisyonun kritikliği, aranan kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. İşe alım süreçlerinde sıralama ve ağırlıklandırma karar verme yöntemlerinin bir arada kullanılıp daha doğru ve yerinde işe alım tercihleri yapılmasının sağlanacağı görülmektedir.

## Kaynaklar

- [1] M. Krogerus and R. Tschappeler, “Neden Karar Verme Modellerine İhtiyacımız Var?,” *Karar Kitabı: Stratejik Düşünme Üzerine 50 Model*. İstanbul, Türkiye:The Kitap, 2019, pp. 11-12
- [2] A. Tozlu, “Karar Verme Yaklaşımları Üzerinde Herbert Simon Hegemonyası,” *Journal of Turkish Court of Accounts*, vol. 102, no 1, pp. 27-45, 2016.
- [3] B. F. Yıldırım, “Güçlü Zayıf Yöntemi ile Proje Değerlendirme İçin Alternatif Bir Ölçek Önerisi: KOSGEB Örneği,” *Yönetim Bilimleri Dergisi*, vol. 18, no. 38, pp. 747-765, 2020.
- [4] İ. Topçu, “Çok Ölçütlü Sorun Çözümüne Yönelik Bir Bütünleşik Karar Destek Modeli,” Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2000.

[5] Ş. Keysan, “Kişisel Özelliklerin Karar Verme Sürecine Etkileri: Denizli’de Finans Sektörü Çalışanları Üzerinde Uygulama,” Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, Türkiye, 2018.

[6] D. Cengiz, “Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Üzerine Karşılaştırmalı Analiz,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2012.

[7] S. S. Iyengar and M. R. Lepper, “When choice is demotivating: Can one desire too much of a good thing?,” *Journal of personality and social psychology*, vol. 79, no. 6, 995-1005, 2000.

[8] M. Soba ve K. Eren, “TOPSIS Yöntemini Kullanarak Finansal ve Finansal Olmayan Oranlara Göre Performans Değerlendirilmesi, Şehirlerarası Otobüs Sektöründe Bir Uygulama,” *SÜ İİBF Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, vol. 11, no. 21, pp. 23-40, 2022.

[9] F. Ecer, “Çok Kriterli Karar Verme Geçmişten Günümüze Kapsamlı Bir Yaklaşım,” Ankara, Türkiye:Seçkin Yayıncılık, 2020, pp. 17-18.

[10] D. Torrington and L. Hall, “Personnel Management: Hrm in Action,” Subsequent Edition, UK: Prentice Hall, 1989.

[11] A. Acer ve H. İnci, “Personel Seçimi Sürecinin AHP Tabanlı MOORA Yöntemi ile Değerlendirilmesi: Liman Saha Operasyon Elemanı Seçimi Üzerine Bir Uygulama,” *OPUS Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, vol. 16, 29 Ekim Özel Sayısı, pp. 3689-3713, 2020.

[12] A. Doğan ve E. Önder, “İnsan Kaynakları Temin ve Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Tekniklerinin Kullanılması ve Bir Uygulama,” *Journal of Yasar University*, vol. 9, no. 34, pp. 5796-5819, 2014.

[13] F. Urfaloğlu ve G. Tolga, “Çok kriterli karar verme teknikleri ile Türkiye’nin ekonomik performansının Avrupa birliği üye ülkeleri ile karşılaştırılması,” *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 35, no. 2, pp. 329-360, 2013.

[14] C. L. Hwang and K. Yoon, “Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey,” 1st ed. New York, USA:Springer-Verlag, 1981.

[15] Ş. LEZKİ, “VIKOR,” *In İşletmelerde Karar Verme Teknikleri*, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, 2016, pp.138-168.



## Kumsal Sedimanlarının ve Mikroplastik İçeriklerinin Karakterizasyonu: Muğla Kıyılarından (GB Türkiye) Örnek Çalışma

### *Characterization of Beach Sediments and Their Microplastic Contents: A Case Study from Muğla Coasts (SW Türkiye)*

Murat Gül<sup>1\*</sup>, Ceren Küçükuysal<sup>2</sup>, Ahmed Masud<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, [muratgul@mu.edu.tr](mailto:muratgul@mu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1555-6426>

<sup>2</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, [cerenkucukuysal@mu.edu.tr](mailto:cerenkucukuysal@mu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4108-3522>

<sup>3</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, [ahmedmasud2014@gmail.com](mailto:ahmedmasud2014@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7704-754X>

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale Geçmişi:*

Geliş 30 Kasım 2022  
Revizyon 20 Aralık 2022  
Kabul 23 Aralık 2022  
Online 23 Mart 2023

*Anahtar Kelimeler:*

*Mikroplastik, Kumsal sedimanı,  
Tane boyu, FTIR,  
Polietilen, Polipropilen,  
Muğla*

#### ÖZ

Kumsal sedimanlarının tane boyu ile mikroplastik miktarları arasındaki ilişkiyi irdelemek amacıyla Muğla kumsallarından (Palamutbükü, Datça, Marmaris ve Akyaka) alınan örnekler öncelikle tane boyu bakımından karakterize edilmiştir. Meso- ve makroplastikler üstten aydınlatmalı mikroskop altında tüm sedimandan ayrılmış daha sonra düşük yoğunluklu mikroplastik ayırma yöntemleri uygulanarak mikroplastikler ayrılmıştır. Her lokasyondan örneklenen 1.2 kg kumsal sedimanında belirlenen meso-makroplastik içeriği ile temsili 50 g kumsal sedimanında belirlenen mikroplastik içeriği sırasıyla şöyledir: Palamutbükü örneğinde, 11 adet meso-makro plastik, 56 adet mikroplastik; Datça örneğinde, 13 adet meso-makro plastik, 33 adet mikroplastik; Marmaris örneğinde, 13 adet meso-makro plastik, 143 adet mikroplastik ve Akyaka örneğinde, 4 adet meso-makro plastik, 59 adet mikroplastik. İncelenen örnekler içinde en küçük ortalama tane boyuna sahip, orta kum boyunda olan Akyaka kumsal sedimanı örneği, meso-makroplastik içeriği en düşük olarak belirlenmiştir. İnce çakıl ortalama tane boyuyla en kaba ortalama tane boyuna ve en yüksek çakıl yüzdesine sahip Datça kumsal sedimanı örneği ise mikroplastik sayısı en düşük örneklerdir. Lif ve parça formunda plastik parçalarında gerçekleştirilen Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi analizi sonucunda mikroplastiklerin bileşimlerinde doğal polimer olan selülöz ile sentetik polimerlerden olan polietilen ve polipropilen olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, sediman tane boyu ile mikroplastik bolluğu arasında bir ilişki bulunmamaktadır. Ancak, tüm düşük yoğunluklu mikroplastikler içinde liflerin miktarının en az olması, sediman-mikroplastik ortamında hidrofobik etkileşimin zayıf olabileceği ve bu nedenle liflerin rüzgar, dalga vb. etmenlerle kolaylıkla taşınabileceği ihtimalini güçlendirmiştir

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received 30 November 2022  
Received in revised form 20 December 2022  
Accepted 23 December 2022  
Available online 23 March 2023

*Keywords:*

*Microplastic, Beach sediment,  
Grain size, FTIR,  
Polyethylene, Polypropylene,  
Muğla*

*Doi: 10.24012/dumf.1212109*

\* Sorumlu Yazar

#### ABSTRACT

In order to examine the relationship between grain size and microplastic amounts of beach sediments, samples taken from Muğla beaches (Palamutbükü, Datça, Marmaris and Akyaka) were first characterized in terms of grain size. Meso- and macroplastics were separated from the bulk sediment under a stereomicroscope, then microplastics were separated using low-density microplastic separation methods. The meso-macroplastic content determined in 1.2 kg beach sediment sampled from each location and the microplastic content determined in 50 g of the representative beach sediment are as follows: 11 meso-macro plastics, 56 microplastics in Palamutbükü sample, 13 meso-macroplastics, 33 microplastics in Datça sample, 13 meso-macroplastics, 143 microplastics in Marmaris sample, and 4 meso-macroplastics and 59 microplastics in Akyaka sample, respectively. Akyaka beach sediment of medium sand size, which has the smallest average grain size among the studied samples, are determined to have the lowest meso-macroplastic content. Datça beach sediment with an average grain size of fine gravel has the coarsest average grain size and the highest percentage of gravel and is the sample with the lowest microplastic content. As a result of the Fourier Transform Infrared Spectrometer analysis performed on plastics in the form of fibers and fragments, it was determined that the compositions of microplastics include cellulose, which is a natural polymer, and polyethylene and polypropylene, which are synthetic polymers. In this study, there is not any relationship established between sediment grain size and microplastic abundance. However, the minimum number of fibers among all low-density microplastics strengthened the possibility of weak hydrophobic interaction in the sediment-microplastic environment and therefore easy transportation of fibers by agents like wind, wave, etc.

## Giriş

Plastikler, hayatın her alanında kullanılabilir olmasının yanında kalıcılıkları yüksek olan, bozduklarında küçük parçalara ayrılabilen ve bu bakımdan ekosistemler için kirletici olabilen malzemelerdir [1]. Plastikler göllerde [2], nehirlerde [3], denizlerde [4], toprakta [5] ve havada [6] bulunabilmektedir. Özellikle denizel alanlarda yapılan çalışmalar plastiklerin hem su kolonunda hem de taban ve kumsal sedimanlarında tutunduğunu göstermektedir [7, 8].

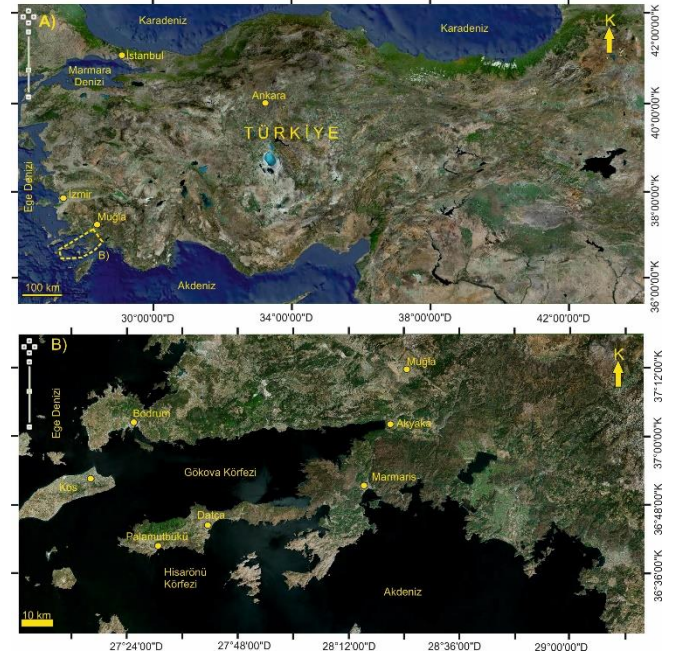
Fiziksel bozunma ile boyutları değişen plastiklerin, 25mm'den büyük olanları makroplastik; 5-25 mm arasında boyuta sahip olanları mesoplastik, 1-5 mm arasında olanlar mikroplastik, 1mm'den küçük olanlar ise mini-nanoplastik olarak sınıflandırılmıştır [8-11]. Gözle görülmesi ve ayırtılması zor olan 5 mm'den küçük olan plastikler okyanuslardaki plastik kirliliğinin %90'ndan fazlasını oluşturmaktadır [9,12-15].

Plastiklerin mekanik, fotolitik ve/veya kimyasal süreçlerle bozunması sonucu ortaya çıkan plastik atıklar (özellikle mikro-, mini- ve nanoplastikler) ve bunların ekosistemler üzerinde yarattığı fizyolojik ve biyokimyasal etkiler son yıllarda birçok çalışmaya konu olmaktadır [10,11,16]. Birincil mikroplastikler, paket/ambalaj, plastik şişe, araba parçaları, sentetik tekstil ürünleri, ev işlerinde kullanılan plastikler, kozmetik ürünleri, elektronik ekipmanlar, boyalar ve bunun gibi günlük hayatta kullanılan birçok malzeme olarak tanımlanırken [16-18]; ikincil mikroplastikler makro- ve mikroplastiklerin aşınması ve bozunması sonucunda oluşmaktadır [19]. Mikroplastikler köken maddeye bağlı olarak farklı renk ve şekillerde (şekilsiz, köşeli, yuvarlak, tüp şeklinde, levha şeklinde veya lifimsi) olabilirler [9]. Endüstriyel ve şehirleşme faaliyetleri ile açığa çıkan plastikler hem havadan ve hem de nehirlerle denizlere taşınmaktadır, ayrıca denizlerdeki ticaret-üretim faaliyetleri de önemli plastik kaynağı olarak literatürde yer bulmuştur [11]. Su kaynaklarına ulaşan mikroplastikler canlıların besin zincirine dahil olmaktadır [8,13,14,20,21].

Akdeniz kıyıları, en kirli denizel alanlardan biri olarak bilinmektedir [22-24]. Türkiye'yi çevreleyen denizlerin su yüzeyi, su kolonu, kumsal sedimanları ve çeşitli denizel organizmalardaki plastik içeriği bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur (Karadeniz [25,26]; Marmara Denizi [27-29]; Akdeniz [30-32]; Ege Denizi [33,34]). Muğla Türkiye'nin en uzun kıyılarına sahip olmasına rağmen, kumsal sedimanlarındaki mikroplastik içeriğine dair az sayıda çalışma bulunmaktadır. Yabancı vd. çalışmasında [33] Datça yarımadası güneybatı kısımlarında Aktur, Sörf Kampı, Ovabükü ve Kurucabük kumsal sedimanlarında mikroplastik içeriğini araştırırken, Masud çalışmasında [35] Bodrum yarımadasında bulunan Bodrum, Turgutreis, Boğaziçi ve Güllük kumsallarında mikroplastik içeriğini araştırmıştır.

Bu çalışma kapsamında ise daha önce çalışılmamış Palamutbükü (Datça yarımadası GB ucu), Datça ilçe merkezi, Marmaris ilçe merkezi ve Akyaka (Ula) kumsal sedimanlarında (Şekil 1A,B) mikroplastik içeriği araştırılmış,

ayrıca kumsal sedimanlarının tane boyu özellikleri de mikroplastik içeriği ile karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

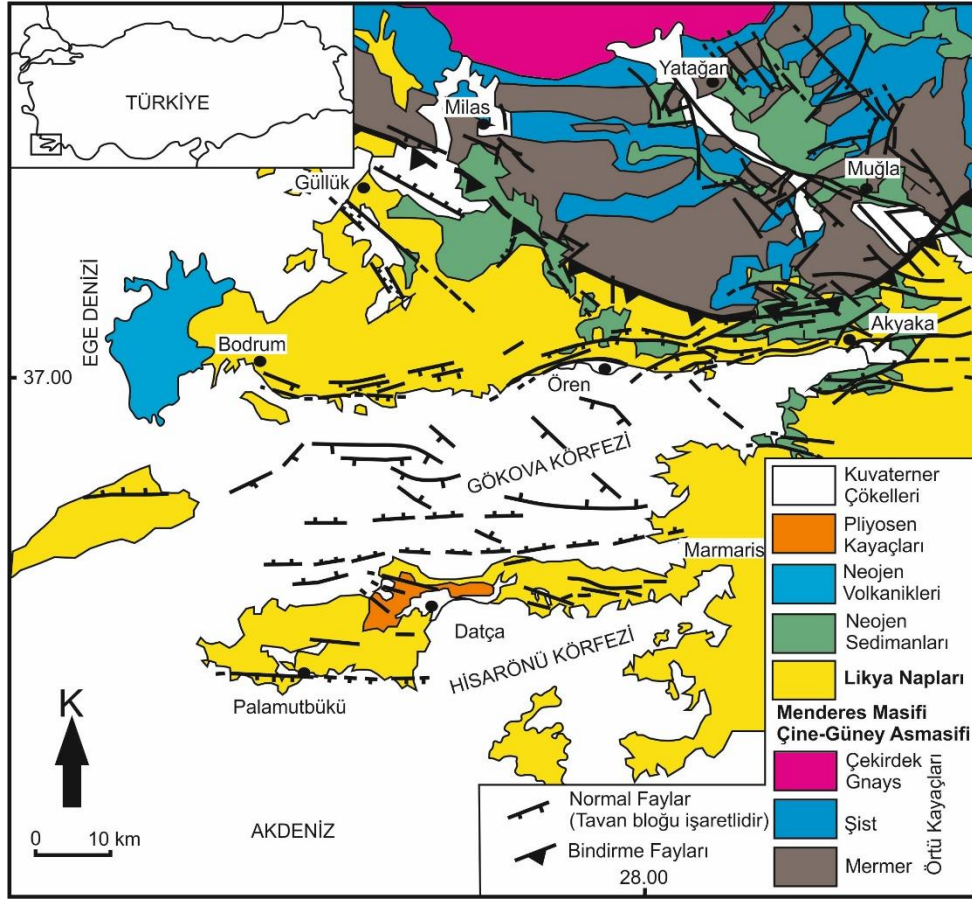


Şekil 1. A) Çalışma alanı yer bulduru haritası [36] B) örnekleme noktalarını gösteren yer bulduru haritası [36]

## Çalışma Alanı Jeolojisi

Farklı yaş ve bileşimlerde kayaçların ve jeolojik unsurların oluşturduğu, Muğla'nın kuzeyinde kalan, Güney (Çine) Asması Prekambriyen'den Orta Paleosen'e uzanan bir yaş aralığındaki, metamorfik baskın birimlerin (gözlü gnayslar, mika şistler, metakuvarsitler) yanında fillat, rekrystalize kireçtaşları, platform karbonatları, marn-killi kireçtaşları, pelajik mermerleri moloz akıntısı ve filiş çökellerinden oluşmaktadır [37-41]. İnceleme alanı ve çevresinde yer alan Likya Napları kireçtaşı ve kırıntılı sedimanlar (Triyas-Kretase ve Paleosen), ofiyolit ve ofiyolitik melanj (Geç Kretase) birimlerinden oluşmaktadır [42-49] (Şekil 2).

Marmaris ve Akyaka kıyılarının, baskın litolojilerinin, özellikle Likya Naplarından (beyaz-krem-gri renkli kireçtaşı sedimanları, yeşil-koyu yeşil-siyah renkli ofiyolitik kayaç parçaları) gelen sedimanlar olduğu belirtilmiştir [50] (Şekil 2). Datça ve Palamutbükü kıyıları ise oldukça geniş bir jeolojik yelpazeye sahip olup, bölgenin baskın litolojilerinden olan, Triyas-Jura karbonatlardan, Orta-Üst Jura radyolarit-çört-karbonatlardan, Üst Kretase-Alt Eosen yaşlı bloklu filiş çökellerinden, Üst Pliyosen yaşlı denizel-tatlı su ortamı çökeli konglomera-kumtaşı-marn-kiltaşı aralanmaları ve tüf birimlerinden [49,51]; bazaltik andezit, andezit, dasit ve riyolitik bileşimde lav parçaları ile kül, tüf, lapilli ve süngertaşı gibi oluşuklardan [52,53] türeyen sedimanları içermektedir (Şekil 2).



Şekil 2. İnceleme alanı genel jeoloji haritası (Görür vd. [44]'ten değiştirilerek alınmıştır).

## Metodoloji

### Örnekleme

İncelenen kumsal sedimanı örnekleri, 2019 sonbaharında Muğla kıyılarında, 4 farklı noktadan (Palamutbükü, Datça, Marmaris ve Akyaka) toplanmıştır (Şekil 1B, 2). Örnekleme noktaları, Muğla'nın kıyı turizmde yoğun olarak tercih edilen alanları olup, aynı zamanda antropojenik kıyı faaliyetlerinin ve yaz dönemi artan nüfusun belirgin olduğu yerlerdir.

Her sahadan, hemen kıyı çizgisi gerisinden, 1 x 1 m'lik karenin köşelerinden ve orta noktasından, yüzeyden 5 cm'lik kısımdan, metal kaşık kullanılarak örnekleme yapılmış; her sahaya ait örnekler kendi içinde birleştirilmiş ve temsili bir adet örnek oluşturularak, toplam 4 örnek laboratuvarında, kontaminasyon olmayacak bir ortamda, oda sıcaklığında kurutulmuştur.

### Sediman ve Mikroplastik Fraksiyonu Ayrımı

Kurutulan örnekler Folk sınıflamasına [54] göre 8 mm, 5mm, 4mm, 2 mm, 1mm, 500 µm, 250 µm, 125 µm, 63 µm eleklerle elenmiş; çakıl, kum, çamur yüzdeleri belirlenerek sediman sınıfları tespit edilmiştir. 5mm altında kalan fraksiyondan mikroplastik analizi için örnek ayrılmıştır.

5 mm'nin üzerinde kalan sedimanlarda ise gözle görülebilen mikroplastikler metal penset ile toplanmıştır. 5 mm'nin

altında kalan fraksiyondan ise 50 g ölçekte homojenleştirilmiş örneklerden mikroplastiklerin alınması için iki farklı yöntem izlenmiştir: Bunlardan ilki, gözle ayırt edilen mikroplastiklerin penset ile toplanması yöntemi olmuştur. Bunun için, laboratuvar koşullarının ve kullanılan ekipmanların steril olmasına dikkat edilmiştir. İkinci yöntem ise doymuş tuz çözeltisiyle uygulanan flotasyon yöntemidir. Bunun için, 358.9 g NaCl'nin 1 L saf su içinde çözülmesi ve 60 °C'de 600 rpm'de, 48 saat boyunca sürekli karıştırılmasıyla elde edilen bir çözelti hazırlanmıştır [55]. Hazırlanan çözelti öncelikle Fischer filtre kâğıdı ile süzülmüş, böylelikle çözeltiden kaynaklanabilecek mikroplastikler uzaklaştırılmıştır [56]. Saflaştırma aşamasından sonra, 200 mL tuz çözeltisi ile 50 g kumsal sedimanı manyetik karıştırıcı ile 600 rpm'de 20 dakika karıştırılmıştır [55]. Yaklaşık 5dk süre, yoğunluğu 1g/cm<sup>3</sup>'ten büyük olan sedimanların çökmesi için beklenmiş; çözeltide askıda kalan düşük yoğunluklu mikroplastiklerin ayrılması için 0.45 µm gözenek açıklığı olan filtre kâğıdı (Fisher scientific, Hollanda) ile süzme işlemi uygulanmıştır. Her örnek için 3 kez tekrarlanan bu süzme işleminden sonra, filtre kâğıtları ve üzerinde kalan taneler laboratuvar ortamında oda sıcaklığında kontaminasyondan korunarak kurumaya bırakılmıştır. Yaklaşık 24 saat kuruma sürecinden sonra filtre kâğıdının üstünde kalan fraksiyon SOIF marka üstten aydınlatmalı 25X ve 40X büyütme mikroskopla incelenmiştir. Bu aşamada ayırt edilen mikroplastikler şekil/form benzerliklerine göre

(lif, parça, tel vs.) olarak gruplanmış ve toplam tane sayılmıştır.

### ATR-FTIR Analizi

Palamutbükü kumsal sedimanlarından ayrılan mikroplastiklerden lif ve parça (şeffaf-beyaz) formunda olanlardan bazıları seçilmiş ve MSKÜ Kimya Bölümü FTIR Laboratuvarında Zayıflatılmış Toplam Yansıma- Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (ATR-FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. ATR-FTIR analizi, Thermo Scientific Nicolet iS10 Smart iTR kullanılarak iletim modunda dalga sayısının bir fonksiyonu olarak 4000–400  $\text{cm}^{-1}$  arasında 32 tarama sayısı ve 16  $\text{cm}^{-1}$  çözünürlük ile analiz edilmiştir. Spektrumların Thermo Scientific Nicolet iS10 Smart ATR kütüphanesindeki spektral veri tabanı ve ilgili literatür ile karşılaştırılması sonucunda meso-mikroplastiklerin moleküler fonksiyonel grupları belirlenmiş ve muhtemel plastik türü hakkında bilgi sunulmuştur.

## Sonuçlar

### Tane Boyu Analizi Sonuçları

Şekil 3'te verilen kurutulmuş makro örneklere bakıldığında, Palamutbükü ve Datça örneklerinin daha iri taneli, Marmaris örneğinin daha ince taneli, Akyaka örneğinin ise en ince taneli olduğu görülmektedir. Tablo 1'de örneklere ait elek analizi sonuçları, Şekil 4'te de bunların grafiksel gösterimleri verilmektedir.

Ortalama tane boyu açısından değerlendirildiğinde, makro gözlemlere benzer olarak kabadan inceye kumsal sedimanlarının, Datça: granül-ince çakıl, Palamutbükü: çok kaba kum, Marmaris: kaba kum, Akyaka: orta tane boyunda kum olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1). Datça ve Marmaris örnekleri, çok kötü boylanmalı olmalarının yanında bimodal frekans dağılımı göstermektedirler (Tablo 1, Şekil 4). Kum boyu taneler Akyaka (%99.9), Palamutbükü (%79) ve Marmaris (%72.3) sedimanlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Datça örneğinde çakıl oranı (% 53.6) kum oranından (% 46.4) daha yüksektir (Tablo 1, Şekil 4). Folk (1974) sınıflama sistemlerine göre Datça örneği kumlu Çakıl (sG), Palamutbükü ve Marmaris örnekleri çakıllı Kum (gS), Akyaka örneği az çakıllı Kum ((g)S) olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 1).

### Makro-, Meso- ve Mikroplastik Miktarları

Örneklenen kumsal sedimanlarının bileşimlerinde bölge jeolojisine bağlı olarak çoğunlukla ofiyolitlerden, kireçtaşı ve kırıntılı sedimanter kayalardan gelen kayaç parçaları ve mineraller bulunmaktadır. Bu sedimanlar ve eşlik eden fosil kavkuları mikro-, meso- ve makroplastiklerin üstten aydınlatmalı görüntüleri incelenirken görüntülenmiştir (Şekil 5). Plastiklerin parçalanmış (Şekil 5A, B, C, D) ve tel (Şekil 5B, C) formlarda olduğu belirlenmiştir.

Flotasyon yöntemi ile ayrılan düşük yoğunluklu mikroplastikler filtre kâğıdı üzerinde üstten aydınlatmalı

mikroskop ile görüntülenmiştir (Şekil 6). Lif formunda olan mikroplastikler, farklı renklerde gözlenmiş; kırmızı, siyah, yeşil, turuncu, kahverengi, mavi-lacivert renklerde olan bu formun en baskın renginin ise siyah lifler olduğu anlaşılmıştır. En fazla lif örneği, Marmaris örneğinde (17 adet) görülürken en az lif örneği ise Datça örneğinde bulunmuştur (Tablo 2; Şekil 6). Lif formu dışında tel ve parça formunda mikroplastikler de gözlenmiştir. Siyah ve kahverengi renklerde camsı-şeffaf görünümde olanlar en baskın olanlardır. Bunun yanında daha az oranda farklı renklerde olan parçalar da gözlenmiştir. Parça formunda mikroplastikler en fazla Marmaris örneğinde belirlenmiş; Akyaka ve Palamutbükü örneklerinde ise benzer sayılarda mikroplastik bulunurken, bu formda olan mikroplastikler en az Datça örneğinde tespit edilmiştir (Tablo 2).

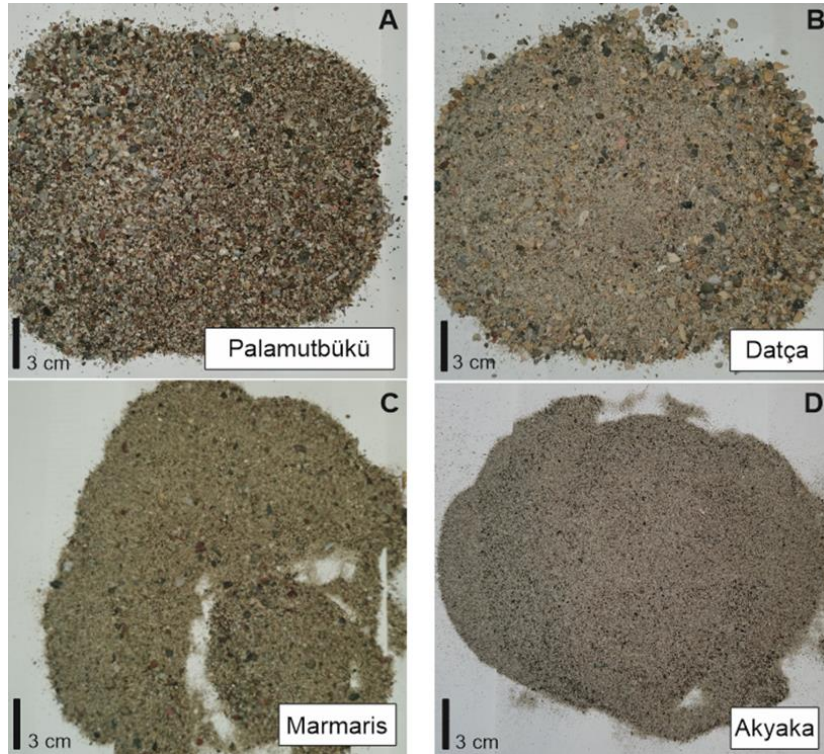
### ATR-FTIR Spektroskopisi Analizi

ATR-FTIR spektroskopisi analizi hem kumsal sedimanlarının hem de mikroplastiklerin bileşimlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, lif (Şekil 7A, B, F), tel (Şekil 7C) ve parça (Şekil 7D, E, G) formlarında seçilen mikroplastikler ve sediman taneleri (Şekil 7H) incelenmiştir. Mikroplastiklerin FTIR spektrumlarında 3 ana polimerin (selülöz, polietilen ve polipropilen) fonksiyonel grupları bulunmuştur. Buna göre, 3500-3000  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında görülen O-H gerilme bandı (Şekil 7D, F), 3000-2800  $\text{cm}^{-1}$  aralığında görülen C-H gerilme bandı ve 1630-1680  $\text{cm}^{-1}$  bandında görülen O-H bükme fonksiyonel grubu (Şekil 7G) selülözün lif içeriğinde bulunduğunu göstermektedir [57,58]. Palamutbükü örneğinden alınmış beyaz renkli bir lifin ATR-FTIR spektrumu Thermo Scientific Nicolet iS10 Smart iTR'nin kütüphanesindeki spektrumlarla karşılaştırıldığında beyaz lif örneğinin referans selülöz örneği ile %39-49 arasında örtüştüğü görülmüştür (Şekil 8). Ayrıca, 2900-2800  $\text{cm}^{-1}$  (Şekil 7B, C, D, E, G), 1400-1300  $\text{cm}^{-1}$  (Şekil 7A, B, C, D, E, F, G) ve 1100  $\text{cm}^{-1}$  (Şekil 7D, F) dalga boylarında görülen bantlar ise polipropilenin varlığını işaret etmektedir [59]. Benzer dalga boylarına (2900  $\text{cm}^{-1}$ ; 1450  $\text{cm}^{-1}$ ) ek olarak 717  $\text{cm}^{-1}$  (Şekil 7A) bandında görülen titreşimler ise polietilenin de mikroplastiklerin içeriğinde yer aldığını göstermektedir.

Sediman tanelerinden alınan ATR-FTIR spektrumunda ise 3620  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda O-H gerilmesinin varlığı hidroksil fonksiyonel grubunu, 2100-1900  $\text{cm}^{-1}$  aralığında belirlenen bantlar absorbe suyun varlığını ve 1000  $\text{cm}^{-1}$  civarında gözlenen titreşim ise Si-O fonksiyonel grubunu ve silika minerallerinden kuvarsın varlığını [60] belirtmektedir (Şekil 7H). Sedimanların ana kayalarının kompozisyonları düşünüldüğünde, tanelerin silikat minerali içeren bileşimlerinin yoğunlukta olduğu anlaşılmıştır.

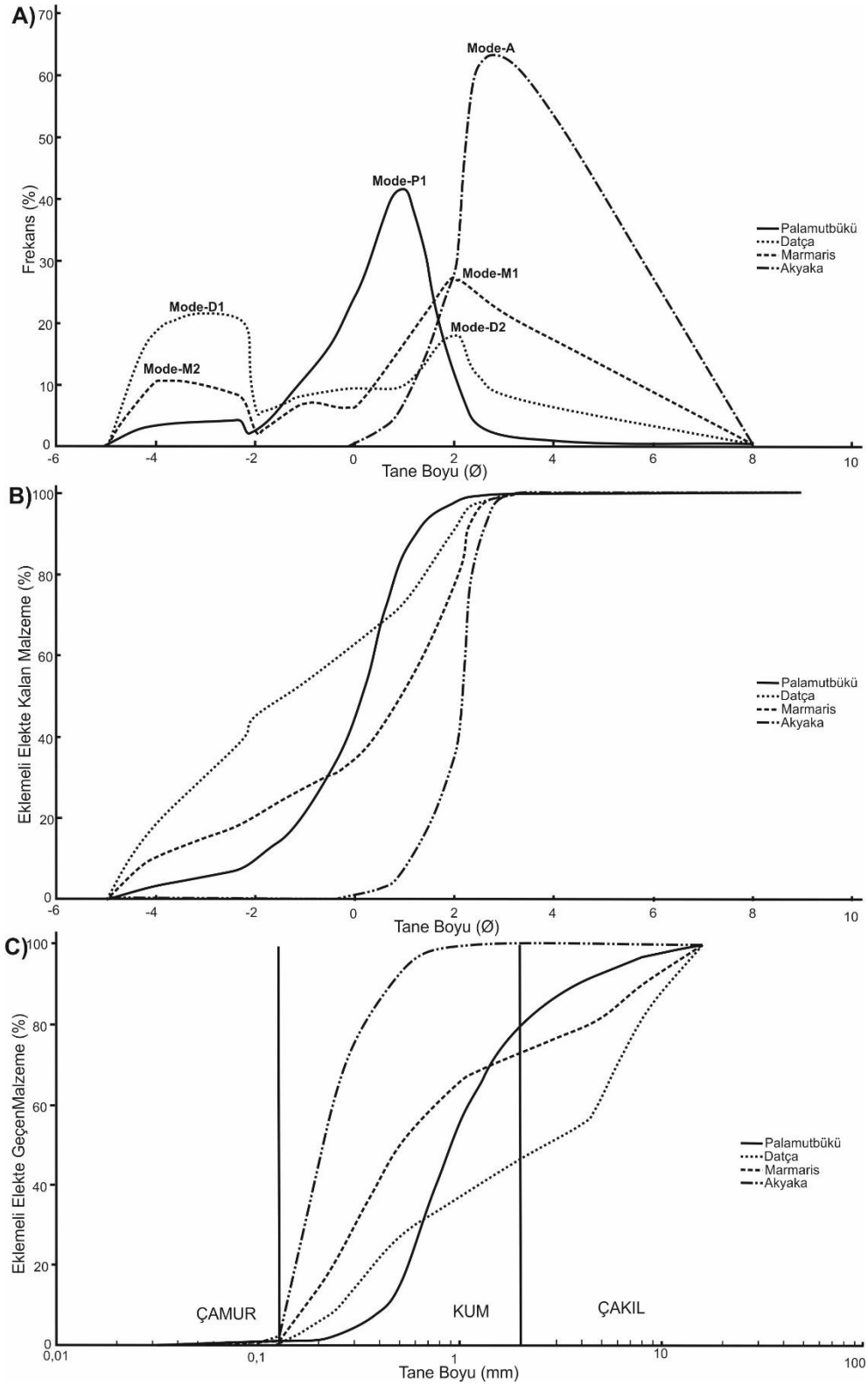
Tablo 1. Kumsal sedimanı örneklerinin elek analizi sonuçları

Tane boyu (mm)	Palamutbükü %	Datça %	Marmaris %	Akyaka %
8	3,39	18,50	10,27	0,00
5	4,18	20,27	8,08	0,00
4	2,35	6,48	2,38	0,00
2	11,07	8,33	6,96	0,03
1	23,35	9,58	6,93	0,58
0,5	41,16	10,00	16,15	7,21
0,25	12,03	17,90	27,06	28,44
0,125	2,05	8,58	21,52	62,82
0,063	0,38	0,36	0,63	0,89
Kap	0,05	0,01	0,01	0,04
Toplam (%)	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Ortalama Tane Boyu (Ø)</b>	-0,07	-1,33	0,13	2,00
<b>Ortalama Tane Boyu (mm) – Sediman sınıfı</b>	Çok Kaba kum	Granül	Kaba Kum	Orta Kum
<b>Mode 1- (Ø)</b>	0,5	-3	2	3
<b>Mode 2- (Ø)</b>	-	2	-4	-
<b>Boylanma- (Ø)</b>	1,33 Kötü boylanmalı	2,51 Çok kötü boylanmalı	2,31 Çok kötü boylanmalı	0,54 Orta derecede iyi boylanmalı
<b>Yamukluk -Skewness -(Ø)</b>	-0,38 Çok iri yamuk	0,03 Yaklaşık simetrik	-0,56 Çok iri yamuk	-0,54 Çok iri yamuk
<b>Basıklık-Kurtosis- (Ø)</b>	0,38 Çok yayvan	0,32 Çok yayvan	0,17 Çok yayvan	0,34 Çok yayvan
<b>Çakıl (%)</b>	20,98	53,58	27,69	0,03
<b>Kum (%)</b>	78,97	46,42	72,29	99,93
<b>Çamur (%)</b>	0,05	0,01	0,01	0,04
<b>Sediman Sınıfı (Folk, 1974)</b>	Çakıllı Kum (gS)	Kumlu Çakıl (sG)	Çakıllı Kum (gS)	Az çakıllı Kum ((g)S)

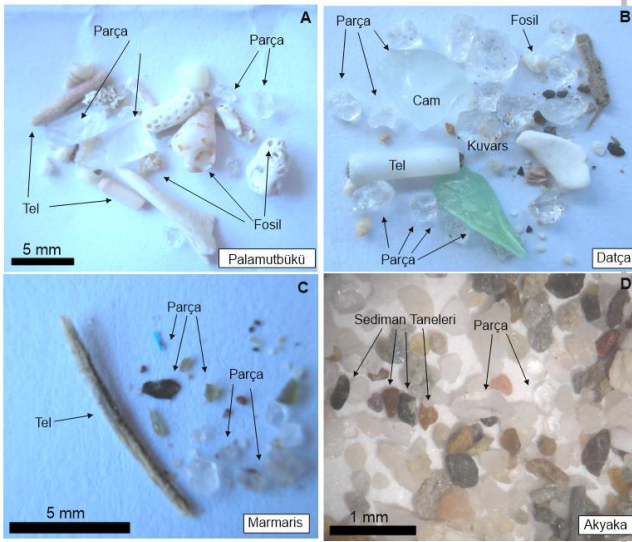


Şekil 3. Çalışma alanından alınan örnekler: A) Palamutbükü, B) Datça, C) Marmaris ve D) Akyaka kumsal sedimanları

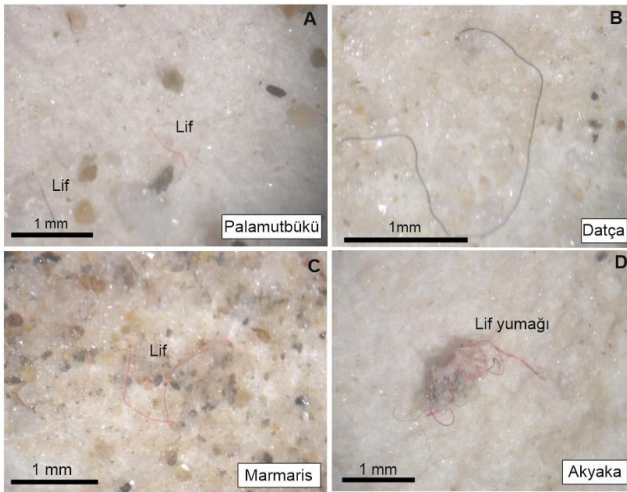




Şekil 4. Elek analizi sonuçları. A) Frekans eğrisi. B) Eklenele Elekte Kalan Malzeme Yüzdesi (%) – Tane Boyu (Ø) Eğrisi. C) Eklenele Elekte Geçen Malzeme Yüzdesi (%) – Tane Boyu (mm) Eğrisi



Şekil 5. Üstten aydınlatmalı mikroskop altında ayrılmış plastik taneleri, sedimanlar ve fosiller: A) Palamutbükü örneği, B) Datça örneği, C) Marmaris örneği, D) Akyaka örneği



Şekil 6. Flotasyon yöntemi ile ayrılmış düşük yoğunluklu mikroplastiklerin üstten aydınlatmalı mikroskop görüntüleri: A) Palamutbükü örneği, B) Datça örneği, C) Marmaris örneği, D) Akyaka örneği

## Tartışma

Mikroplastiklerin sedimandan ayrılması konusunda çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [61]. Bu çalışmada plastiklerin gözle ve mikroskop altında görülenlerinin penset ile ayrılması; bu yöntemle ayrılamayanların ise saf su ve tuzlu su çözeltisinde yüzdürme (flotasyon) yöntemi ile ayrılmasına çalışılmıştır. Her iki yöntem oldukça hızlı sonuç veren, uygun maliyetli ve mikroplastikleri aşındırmayan yöntemler olduğundan bu çalışmada tercih edilmiştir. Khuyen vd. [62] çalışmasına göre kumsal sedimanlarındaki plastiklerin çoğunluğu tek kullanımlık plastik ürünlerden oluşmakta, bunların ayrışması neticesinde ise düşük yoğunluklu mikroplastikler (örn; PE, PP) meydana gelmektedir. Aynı çalışmada mikroplastiklerin özellikle

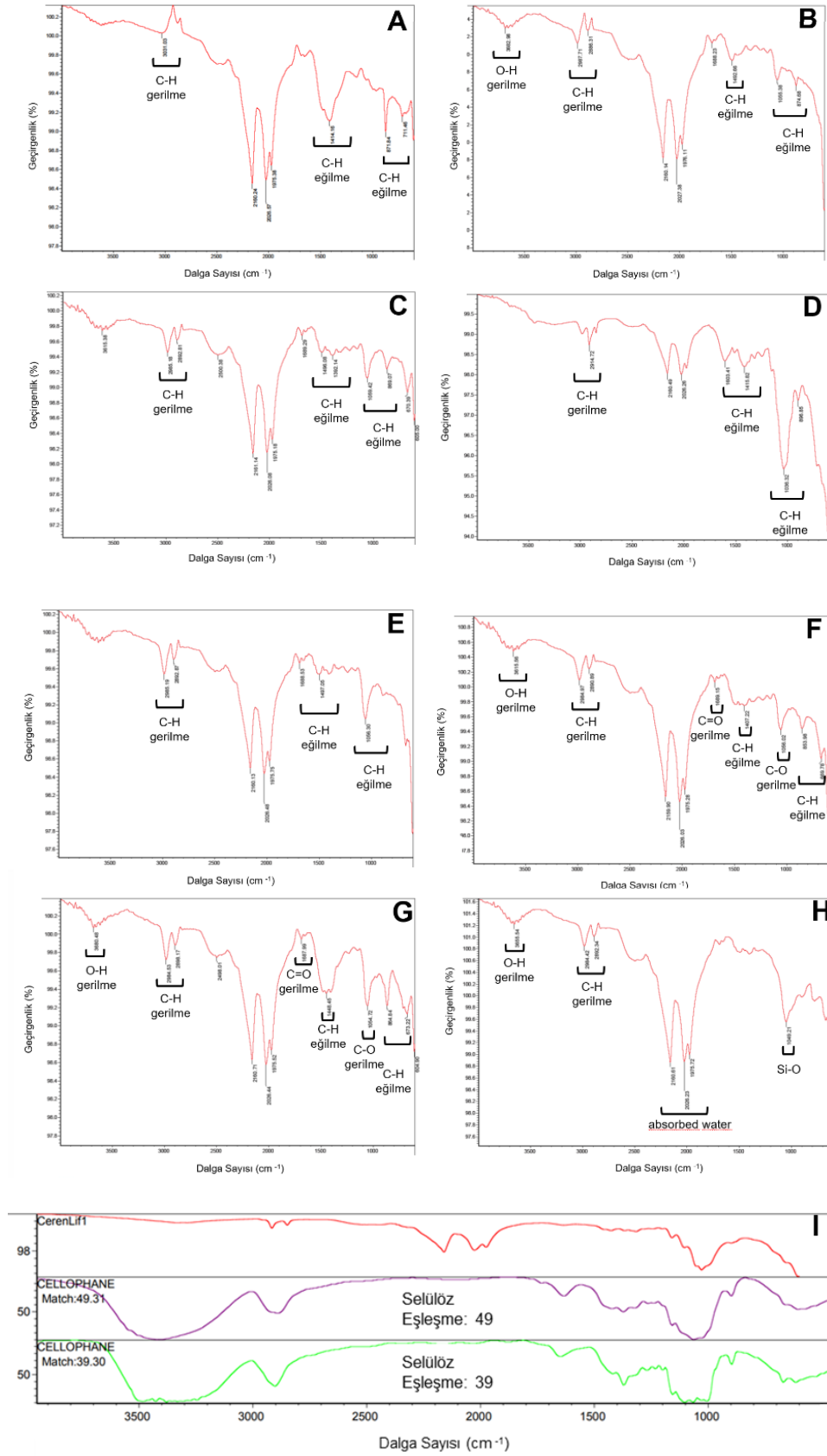
kumsal sedimanlarının ilk 5 cm'lik üst tabakasında yoğunlaştığı bildirilmiştir. Ayrıca, Li vd. [63] ve Nabi vd. [64] çalışmalarında mikroplastiklerin yoğunluklarının dağılımları üzerinde etkisinin oldukça fazla olduğunu ve bu nedenle özellikle düşük yoğunluklu mikroplastiklerin su kolununun en üst seviyelerinde yer alması ile sucul canlıların besin zincirlerine kolaylıkla dahil olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, mevcut çalışmanın izlediği örnekleme stratejisi ve mikroplastik ayırma yöntemleri kumsal sedimanlarında en fazla bulunan mikroplastik türlerine yönelik seçilmiştir.

Kumsal sedimanlarının tane boyu analizi sonuçları incelendiğinde, mikroplastik bolluğu ile sedimanların tane boyu arasında net bir orantı olmadığı ancak meso- ve makroplastik bolluğu ile tane boyu arasında doğru orantı olduğu gözlenmiştir. Sediman taşınma mesafesinin nispeten kısa olduğu düşünülen Datça-Palamutbükü-Marmaris örneklerinin kötü-oldukça kötü boylanmalı oldukları, ortalama tane boyunun kaba kum üzerinde tane boyunda olduğu, çakıl oranının %20'lerin üzerinde olduğu belirlenmiştir (Tablo 1; Şekiller 3, 4). Sediman taşınma mesafesinin daha uzun olduğu düşünülen Akyaka sahilinde ortalama tane boyu orta kum boyunda olup, %99'u kum olan örneğin oldukça iyi boylanmalı olduğu tespit edilmiştir (Tablo 1; Şekiller 3, 4). Tane boyu ile plastik içeriği karşılaştırıldığında ise ince taneli örneklerde makro- ve mesoplastik miktarının daha az; kaba taneli örneklerde ise lif formunda olan mikroplastik içeriğinin oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, kaba taneli kumsal sedimanlarında makro- ve mesoplastik içeriğinin ince taneli kumsal sedimanlarına göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 2. Çalışma konusu kumsal sedimanlarında belirlenen mikro-, meso- ve makroplastik miktarları

Örneklerde ayrılmış plastikler (adet)	Palamutbükü	Datça	Marmaris	Akyaka
Σmeso-makroplastik / 1,2 kg	11	13	13	4
Lif formunda mikroplastikler/ 50 g	14	6	17	12
Tel ve parça formunda mikroplastikler/ 50 g	42	27	126	47
Σmikroplastik/ 50 g	56	33	143	59
Σmikroplastik/ kg	1120	660	2860	1180

Makro-mesoplastik açısından bakıldığında en az sayıda plastik içeriği (4 adet/1200g) en düşük tane boyuna sahip Akyaka örneklerinde tespit edilmiştir. Bu durum, plastiklerin ortalama sediman boyutundan iri ancak düşük yoğunluklu olmaları nedeniyle rüzgâr veya dalga etkisiyle sedimandan



Şekil 7. Selüloz, polietilen (PE) ve polipropilen (PP) fonksiyonel grupları ile eşleşen mikroplastiklerin ve temsili kumsal sedimanı örneklerinin ATR-FTIR spektrumları: A) beyaz renkli lif; B) bordo renkli lif; C) tel; D) kahverengi parça; E) krem renkli parça; F) lif; G) parça; H) sediman taneleri; I) selüloz spektrumu ile lif örneğinin ATR-FTIR spektrumlarının karşılaştırılması

kolaylıkla uzaklaşabilecekleri ile ilişkilendirilebilir [62]. Toplam mikroplastik miktarına göre, Marmaris örneği en yüksek miktarda (2860 adet/kg) mikroplastik içeren örnek olmuştur. Mikroplastik miktarı en düşük (660 adet/kg) örnek ise en kaba taneli sedimanların bulunduğu Datça örneğidir.

Plastikler ayrışıp küçük boyutlara indirgenirken yüzey alanı/hacim oranları oldukça artar ve hidrofobik etkileşimden dolayı yapışma eğilimi gösterirler [61]. Hidrofobik etkileşimin zayıf olduğu örneklerde ise özellikle düşük yoğunluklu mikroplastikler kolaylıkla rüzgâr veya dalga etkisinden dolayı ortamdan uzaklaşır. Bu çalışmada mikroplastiklerin formu temel alındığında, lif formundaki mikroplastiklerin bolluğunun tel ve parça formunda olanlara göre oldukça düşük olması, mikroplastik-kumsal sedimanı ortamdaki hidrofobik etkileşimin lif formundakiler için daha zayıf olması ile açıklanabilir.

Datça yarımadasında 4 farklı sahilde gerçekleştirilen Yabancı vd. çalışmasında [33] belirlenen mikroplastik miktarları Aktur sahili için  $2073.3 \pm 648.6$  parça/kg; Sörf Kampı sahili için  $1327.5 \pm 422.4$  parça/kg; batısında kalan Kurucabük sahili için  $623.3 \pm 144.3$  parça/kg ve Ovabükü sahili için  $593.3 \pm 283.1$  parça/kg olarak verilmiştir; bu mikroplastiklerin bileşimlerinde stiren-bütadien-stiren kopolimeri, polistiren, polietilen, ataktik polipropilen, naylon II, etilen propilen dien monomer ve polivinil klorid olduğu da aynı çalışmada verilmiştir [33]. Masud tez çalışmasında [35] Bodrum yarımadasında Bodrum, Turgutreis, Güllük ve Boğaziçi sahillerinden ayırt edilen mikroplastiklerin miktarlarını sırasıyla 500-, 332-, 396- ve 228 adet/1.8 kg olarak vermiştir. Baskın olarak lif ve parça formunda mikroplastiklerin polietilen, polivinil asetat, politetrafloroetilen ve selülöz içerdiği sunulmuştur.

Bu çalışmada elde edilen mikroplastik miktarları (660-2860 adet/kg) ile çalışma alanına yakın çevrede farklı sahillerde gerçekleştirilen Yabancı vd. çalışması [33] ve Masud çalışmasında [35] sunulan mikroplastik miktarları karşılaştırıldığında, Datça yarımadası sahillерinden alınan verilerle oldukça yakın değerlerin belirlendiği, bunun yanında Bodrum yarımadasından alınan verilere göre mikroplastik miktarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, makroplastikler için yapılan karşılaştırmada, çalışma alanından elde edilen makroplastiklerin toplam sayısının (41 adet/1.2 kg), Yabancı vd. çalışmasında [33] verilen makroplastiklerin toplam sayısından ( $76 \pm 18$  adet/kg) az olması, plastik ayrışma sürecine etki eden doğal ve antropojenik faktörlerin değişkenliği ile ilişkilendirilebilir.

Bu çalışmada incelenen düşük yoğunluklu mikroplastiklerin bileşimlerinde bulunan selülöz, polietilen ve polipropilen dikkate alındığında, Datça yarımadası örnekleri [33] ve Datça-Palamutbükü-Marmaris-Akyaka örnekleri [35] bileşimleri ile benzerlik gösterdiği belirlenmiştir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada Muğla kıyılarında 4 farklı noktada yer alan kumsal sedimanlarının özellikleri araştırılmış ve plastik içerikleri ortaya konmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Akyaka sahilinden alınan örneklerin ortalama tane boyunun çalışılan tüm örnekler arasında en düşük olduğu, orta kum boyu ve orta derecede boylanmalı sedimanlar içerdiği belirlenmiştir. Bunun yanında, Datça-Palamutbükü-Marmaris örneklerinin ise kaba kum-ince çakıl ortalama tane boyutunda kötü-oldukça kötü boylanmalı olduğu tespit edilmiştir. Ana kaya kompozisyonlarına bağlı olarak, kumsal sedimanlarında yoğunlukla silikat mineralleri gözlenmiştir.
- Mikroplastiklerin fiziko-kimyasal özelliklerine zarar vermeden ayrılması için seçilen yöntemlerle (saf su ve tuzlu su çözeltisinde yüzdürme-flotasyon) düşük yoğunluklu mikroplastikler ayrılmıştır.
- Düşük yoğunluklu mikroplastiklerin ATR-FTIR spektroskopisi analizi, bileşimlerinde doğal polimer olan selülöz (selofan) ile, sentetik polimerlerden polietilen ve polipropilen olduğunu ortaya koymuştur.
- Datça-Palamutbükü-Marmaris-Akyaka kumsal sedimanlarında belirlenen mikroplastik miktarları ile sediman tane boyu arasında doğrusal bir ilişki olmadığı belirlenmiştir.
- Makro- ve mesoplastik miktarları en az olan örnekler Akyaka kumsal sedimanları olurken, en fazla mikroplastik miktarı Marmaris örneğinde bulunmuştur. En düşük mikroplastik miktarı ise en kaba taneli sedimanların bulunduğu ve en fazla çakıl yüzdesine sahip Datça örneğinde belirlenmiştir.

İncelenen mikroplastik formları içinde en az miktarda bulunan lif formundaki mikroplastiklerin yüzey alanı/hacim oranı en yüksek olmasına rağmen hidrofobik etkileşimlerinin zayıf olması nedeniyle ortamdan rüzgâr ve/veya dalga gibi doğal faktörlerle uzaklaştığı yorumuna varılmıştır.

Turizmin oldukça yoğun olduğu Muğla kıyılarında mikroplastiklerin kaynaklarının ve türlerinin belirleneceği, doğal ve beşeri faktörlere bağlı olarak miktarlarındaki değişimlerin izleneceği kapsamlı çalışmaların yapılması çevre sağlığı ve atık yönetimi konusunda önemli katkılar sunacaktır.

## Teşekkür

Arazi çalışması ve laboratuvarında örnek hazırlama aşamasında verdiği katkıdan dolayı Muratcan GÜL'e ve ATR-FTIR analizinin gerçekleşmesi konusunda katkısından dolayı Dr. Özge TOKUL ÖLMEZ'e (MSKÜ Kimya Bölümü) teşekkür ederiz. Yazarlar editör ve hakemlere yayına sundukları katkılardan dolayı teşekkür ederler.

**Kaynakça**

- [1] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, "Environmental and health risks of microplastic pollution," Publications Office of the European Union, Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/65378>, 2019.
- [2] P. L. Corcoran, T. Norris, T. Ceccanese, M.J. Walzak, P. A. Helm, and C. H. Marvin, "Hidden plastics of Lake Ontario, Canada and their potential preservation in the sediment record," *Environmental Pollution*, vol. 204, pp. 17-25, 2015.
- [3] S. Magni, L. Nigro, C. D. Torre, and A. Binelli, "Characterization of plastics and their ecotoxicological effects in the Lambro River (N. Italy)," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 412, 125204, 2021.
- [4] D. Materić, R. Holzinger, and H. Niemann, "Nanoplastics and ultrafine microplastic in the Dutch Wadden Sea – The hidden plastics debris?" *Science of The Total Environment*, vol. 846, pp. 157371, 2022.
- [5] Y. Huo, F. A. Dijkstra, M. Possell, and B. Singh. "Chapter One - Plastics in soil environments: All things considered" *Advances in Agronomy*, vol. 175, pp. 1-132, 2022.
- [6] N. F. A. Biber, A. Foggo, and R. C. Thompson, "Characterising the deterioration of different plastics in air and seawater," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 141, pp. 595-602, 2019.
- [7] V. Hidalgo-Ruz, L. Gutow, R. C. Thompson, and M. Thiel, "Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification" *Environmental Science and Technology*, vol. 46, pp. 3060–3075, 2012.
- [8] A. Lusher, "Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects" in *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. pp. 245-307, 2015.
- [9] R. C. Thompson, "Microplastics in the Marine Environment: Sources, Consequences and Solutions," in *Marine Anthropogenic Litter*, Springer Open, pp. 185-200, 2015.
- [10] C. Alomar, F. Estarellas, S. Deudero, "Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size," *Marine Environmental Research*, vol. 115, pp. 1-10, 2016.
- [11] L. G. A. Barboza, A. D. Vethaak, B. R. B. O. Lavorante, A. K. Lundebye, and L. Guilhermino, "Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 133, pp. 336–348, 2018.
- [12] M. Eriksen, L. C. M. Lebreton, H. S. Carson, M. Thiel, C. J. Moore, J. C. Borerro, F. Galgani, P. G. Ryan, and J. Reisser, "Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea," *PLoS One*, vol. 9(12), e111913, 2014.
- [13] T. S. Galloway, "Micro- and Nano-plastics and Human Health," in *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham., 2015, pp. 343-366.
- [14] A. A. Koelmans, E. Besseling, and W. J. Shim, "Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review" in *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. pp. 325-340, 2015.
- [15] G. Suaria, C. G. Avio, A. Mineo, G. L. Lattin, M. G. Magaldi, G. Belmonte, C. J. Moore, F. Regoli, and S. Aliani, "The Mediterranean plastic soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters," *Scientific Reports*, vol. 6, 37551, 2016.
- [16] M. A. Browne, "Sources and Pathways of Microplastics to Habitats," in *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. pp. 229-244, 2015.
- [17] M. R. Gregory, "Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 32, no.12, pp. 867-871, 1996.
- [18] L.S. Fendall, and M. A. Sewell, "Contributing to Marine Pollution by Washing Your Face: Microplastics in Facial Cleansers," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 58, pp. 1225-1228, 2009.
- [19] M. A. Browne, T. Galloway, and R. Thompson, "Microplastic—An Emerging Contaminant of Potential Concern?" *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 3, no. 4, pp. 559-561, 2007.
- [20] O. Güven, K. Gökdağ, B. Jovanović, and A. E. Kideys, "Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish" *Environmental Pollution*, vol. 223, pp. 286-294, 2017.
- [21] S. Rist, B. C. Almroth, N. B. Hartmann, and T. M. Karlsson, "A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics," *Science of the Total Environment*, vol. 626, pp. 720–726, 2018.
- [22] S. Gündoğdu, and C. Çevik, "Micro- and mesoplastics in Northeast Levantine coast of Turkey: The preliminary results from surface samples" *Marine Pollution Bulletin*, vol. 118, pp. 341–347, 2017.
- [23] A. Cincinelli, T. Martellini, C. Guerranti, C. Scopetani, D. Chelazzi, and T. Giarrizzo, "A potpourri of microplastics in the sea surface and water column of the Mediterranean Sea," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 110, pp. 321-326, 2019.
- [24] E. Constantino, I. Martins, J. M. Salazar Sierra, and F. Bessa, "Abundance and composition of floating marine macro litter on the eastern sector of the Mediterranean Sea," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 138, pp. 260–265, 2019.
- [25] U. Aytan, A. Valente, Y. Şentürk, R. Usta, F. B. Esensoy Şahin, R. E. Mazlum, and E. Ağırbaş, "First evaluation of neustonic microplastics in Black Sea

- waters,” *Marine Environmental Research*, vol. 119, pp. 22-30, 2016.
- [26] Y. Terzi, K. Gedik, A. R. Eryaşar, R. Ç. Öztürk, and A. Şahin, “Microplastic contamination and characteristics spatially vary in the southern Black Sea beach sediment and sea surface water,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 174, 113228, 2022.
- [27] S. Tunçer, O. B. Artüz, M. Demirkol, and M. L. Artüz, “First report of occurrence, distribution, and composition of microplastics in surface waters of the Sea of Marmara, Turkey,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 135, pp. 283–289, 2018.
- [28] S. Vardar, T. T. Onay, B. Demirel, and A. E. Kideys, “Evaluation of microplastics removal efficiency at a wastewater treatment plant discharging to the sea of Marmara,” *Environmental Pollution*, vol. 289, 117862, 2021.
- [29] K. Gedik, A. R. Eryaşar, and A. M. Gözler, “The microplastic pattern of wild-caught Mediterranean mussels from the Marmara Sea,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 175, 113331, 2022.
- [30] ÇŞB, “Denizlerde Bütünlük Kirlilik İzleme İşi 2014-2016 Akdeniz Özet Raporu” Çevre ve Şehircilik Bakanlığı – Çevresel Etki Değerlendirmesi, İzin ve Denetim Genel Müdürlüğü, 2017, pp. 68.
- [31] E. Kılıç, and N. Yücel, “Microplastic occurrence in the gastrointestinal tract and gill of bioindicator fish species in the northeastern Mediterranean” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 177, 113556, 2022.
- [32] A. E. Kideys, “ODTÜ - Deniz Bilimleri Enstitüsünde deniz atıkları/mikroplastik araştırmaları ve ilköğretime yönelik “Denizimi Tanıyorum Koruyorum Eğitimi. 5. Plaj Mavi Bayrak Temsilcisi Eğitimi Programı”, Antalya, 6-7 Nisan 2017.
- [33] M. Yabanlı, A. Yozukmaz, İ. Şener, and Ö. T. Ölmez, “Microplastic pollution at the intersection of the Aegean and Mediterranean Seas: A study of the Datça Peninsula (Turkey),” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 145, pp. 47–55, 2019.
- [34] A. Yozukmaz, “Investigation of microplastics in edible wild mussels from İzmir Bay (Aegean Sea, Western Turkey): A risk assessment for the consumers,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 171, 112733, 2021.
- [35] A. Masud, “Microplastic Contents and Sediment Classification of Selected Sites in Bodrum and Güllük Beaches (Muğla, SW Turkey),” M.S. thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Muğla Sıtkı Koçman University, Muğla, 2022.
- [36] <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> (erişim tarihi: 19/03/2020)
- [37] N. Konak, N. Akdeniz, and E. M. Öztürk, “Geology of the south of Menderes Massif” in Guide Book for the Field Excursion along Western Anatolia, for the IGCP Project No. 5: Correlation of Variscan and pre-Variscan events of the Alpine-Mediterranean mountain belt. Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, pp. 42-53, 1987.
- [38] A. Okay, “Geology of the Menderes Massif and the Lycian Nappes south of Denizli, western Taurides,” *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, vol. 109, pp. 37-51, 1989.
- [39] O. Ö. Dora, N. Kun, and O. Candan, “Metamorphic history and geotectonic evolution of the Menderes Massif”. In Proc. International Earth Sciences Congress on Aegean Regions, 1990, vol.2, pp. 102-115.
- [40] S. Özer, H. Sözbilir, I. Özkar, V. Toker, and B. Sarı, “Stratigraphy of Upper Cretaceous–Palaeogene sequences in the southern and eastern Menderes Massif (western Turkey),” *International Journal of Earth Sciences*, vol. 89, pp. 852–866, 2001.
- [41] E. Bozkurt, “Granitoid rocks of the southern Menderes Masif (southwestern Turkey): field evidence for Tertiary magmatism in an extensional shear zone,” *International Journal of Earth Sciences*, vol. 93, pp. 52–71, 2004.
- [42] Ş. Ersoy, “Batı Toros (Likya) Napları'nın yapısal öğelerinin ve evrimin analizi,” *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* vol. 37, 5-16, 1990.
- [43] Ş. Ersoy, “Datça (Muğla) yarımadasının stratigrafisi ve Tektoniği,” *Türkiye Jeoloji Bülteni*, vol. 34, pp. 1-14, 1991.
- [44] N. Görür, A. M. C. Şengör, M. Sakıncı, O. Tüysüz, R. Akkök, E. Yiğitbaş, F. Y. Oktay, A. Barka, N. Sarıca, B. Ecevitoglu, E. Demirbağ, Ş. Ersoy, O. Algan, C. Güneysu, and A. Aykol, “Rift formation in the Gökova Region, Southwest Anatolia: implications for the opening of the Aegean Sea” *Geological Magazine*, vol. 132, no. 6, pp. 637-650, 1995.
- [45] A. S. Collins, and A. H. F. Robertson, “Lycian melange, southwestern Turkey: an emplaced Late Cretaceous accretionary complex,” *Geology*, vol. 25, pp. 255-258, 1997.
- [46] A. S. Collins, and A. H. F. Robertson, “Processes of Late Cretaceous to Late Miocene episodic thrust-sheet translations in the Lycian Taurides, SW Turkey,” *Journal of the Geological Society of London*, vol. 155, pp. 759–772, 1998.
- [47] A. S. Collins, and A. H. F. Robertson, “Evolution of the Lycian Allochthon, western Turkey, as a north-facing Late Palaeozoic to Mesozoic rift and passive continental margin,” *Geological Journal*, vol. 34, pp. 107–138, 1999.
- [48] A. H. F. Robertson, “Mesozoic Tertiary tectonic-sedimentary evolution of a south Tethyan oceanic basin and its margins in southern Turkey” in Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area. Geological Society, London, Special Publications, vol 173, pp. 43-82, 2000.
- [49] K. Dirik, A. Türkmenoğlu, N. Tuna, and M. Dirican, “Datça Yarımadası'nın Neotektoniği, Jeomorfolojisi ve Bunların Eski Medeniyetlerin Yerleşimi ve Gelişimi Üzerindeki Etkisi” ODTÜ AFP-00-07-03-13 Kod Nolu Proje, 2003.

- [50] M. Gül, Ö. Yılmaz, and Ö. Zeybek, "Morphology and Textural Characteristics of Coastal Sediments of the NE of the Gökova Graben (SW Turkey)", *Journal of Coastal Conservation*, vol. 23, pp.417-434, 2019.
- [51] K. Dirik, "Neotectonic characteristic and Seismicity of the Reşadiye Peninsula and Surrounding Area, southwest Anatolia," *Türkiye Jeoloji Bülteni*, vol. 50 no. 3, pp. 130-149, 2007.
- [52] T. Ercan, E. Günay, H. Baş, and B. Can, "Datça Yarımadasındaki Kuvaterner yaşlı volkanik kayaçların petrolojisi ve kökensel yorumu," *MTA Dergisi*, vol. 97/98, pp. 45-56, 1984.
- [53] G. Gençalioğlu- Kuşcu, and G. Uslular, "Geochemical characterization of mid-distal Nisyros tephra on Datça peninsula (southwestern Anatolia)," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 354, pp. 13-28, 2018.
- [54] R. L. Folk, "The petrology of sedimentary rocks," Hemphill Publishing Co., Austin, 1974, pp. 182.
- [55] A. Besley, M. G. Vijver, P. Behrens, and T. Bosker, "A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 114, pp. 77-83, 2017.
- [56] D. Yang, H. Shi, L. Li, J. Li, K. Jabeen, and P. Kolandhasamy, "Microplastic pollution in table salts from China," *Environmental Science and Technology*, vol. 49, pp. 13622-13627, 2015.
- [57] G. Canché-Escamilla, D. E. Pacheco-Catalán, and S. B. Andrade-Canto, "Modification of properties of rayon fibre by graft copolymerization with acrylic monomers," *Journal of Materials Science*, vol. 41, pp. 7296-7301, 2006.
- [58] E. Andreassen, "Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene," in *Polypropylene: An A-Z Reference Chapter: Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene*. Kluwer Publishers, 1999.
- [59] P. Garside, and P. Wyeth, "Identification of Cellulosic Fibres by FTIR Spectroscopy- Thread and Single Fibre Analysis by Attenuated Total Reflectance," *Studies in Conservation*, vol. 48, no. 4, pp. 269-275, 2003.
- [60] B. Manoj, and P. Narayanan, "Study of Changes to the Organic Functional Groups of a High Volatile Bituminous Coal during Organic Acid Treatment Process by FTIR Spectroscopy," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 1, pp. 39-43, 2013.
- [61] M. Yuan, Y. Zhang, W. Guo, S. Chen, Y. Qiu, , and P. Zhang, "A rapid staged protocol for efficient recovery of microplastics from soil and sediment matrices based on hydrophobic separation." *Marine Pollution Bulletin*, vol. 182, 113978, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2022.113978>.
- [62] V.T.K. Khuyen, D.V. Le, H.A. Le, A.R. Fischer, and C. Dornack, "Assessing Microplastic Prevalence and Dispersion from Saigon Urban Canals via Can Gio Mangrove Reserve to East Sea by Raman Scattering Microscopy," *Microplastics*, vol. 1, pp. 536-553, 2022. <https://doi.org/10.3390/microplastics1030038>
- [63] C. Li, Q. Cui, M. Zhang, R.D. Vogt, and X. Lu, "A commonly available and easily assembled device for extraction of bio/non-degradable microplastics from soil by flotation in NaBr solution," *Science of the Total Environment*, vol. 759, 143482, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143482>.
- [64] I. Nabi, A.U.R. Bacha, and L. Zhang, "A review on microplastics separation techniques from environmental media," *Journal of Cleaner Production*, vol. 337, 130458, 2022.



## Cevherden Flotasyon Yöntemiyle Baritin Zenginleştirilmesi

## Barite Enrichment by Flotation Method from the Ore

İbrahim Dolak<sup>1\*</sup>, Rüstem Keçili<sup>2</sup><sup>1</sup>Dicle Üniversitesi, Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojileri Bölümü, [idolak@dicle.edu.tr](mailto:idolak@dicle.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2095-7614>Anadolu Üniversitesi, Yunus Emre Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, [rkecili@anadolu.edu.tr](mailto:rkecili@anadolu.edu.tr)ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8377-9042>

## MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 31 Ocak.2023  
Düzeltilme: 17 Mart.2023  
Kabul: 18.Mart 2023  
Online: 23 Mart 2023

Anahtar kelimeler:

Barit Zenginleştirme  
Sülfürleme  
Flotasyon

## ÖZ

Bu çalışmada, Eskişehir ili sınırları içerisinde bulunan ve ülkemiz açısından ekonomik değeri oldukça yüksek olan bastnasit cevherinde bulunan Barit ( $BaSO_4$ ) mineralinin flotasyon tekniği ile seçici olarak cevherden ayırımı ve yüksek saflıkta barit elde edilmesi amaçlanmıştır. İlgili bölgeden tekniğe uygun olarak alınan cevher numunesi kırtıcı-öğütücü yardımı ile öğütülmüş ve uygun tanecek boyutuna getirilmiştir. Uygun tanecek boyutundaki cevher numunesine eleme işlemi uygulanmış ve bu sayede uygun tanecek boyutlu ve homojenize edilmiş numune elde edilmiştir. Homojenize edilmiş numune içerisinde bulunan mineral analizi için uygun çözünürleştirilme işlemi yapıldıktan sonra analizler yapılmış, cevher bünyesinde bulunan, bastnasit, barit ve fluorit gibi minerallerin numune içerisindeki miktarları tespit edilmiştir. Ön flotasyon işlemleri ile baritin flotasyon verimleri incelenmiş ancak istenilen düzeyde zenginleştirilme yapılamamıştır. Flotasyon veriminin düşük olmasının cevherin mineralojik yapısından kaynaklandığı düşünülmüş ve cevherin kristal yapısını değiştirmek amacıyla flotasyon işleminden önce sülfürleme prosesi gerçekleştirilmiştir. Sülfürleme prosesinden sonra gerçekleştirilen flotasyon çalışmalarında baritin flotasyon veriminde ciddi oranda artış olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür. Tespit edilen optimum flotasyon koşullarında yapılan deneylerde cevher bünyesinde yer alan baritin % 92.04 flotasyon verimi ile cevherdeki tenörününün % 31,13'den % 91.14'e yükseldiği tespit edilmiştir.

## ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 January 2023  
Revised: 17 March 2023  
Accepted: 18 March 2023  
Available Online: 23 March 2023

Keywords:

Enrichment of Barite,  
Sulphurization  
FlotationDoi: [10.24012/dumf.1245294](https://doi.org/10.24012/dumf.1245294)

\* Sorumlu yazar

## ABSTRACT

In this study, it is aimed to selectively separate the barite ( $BaSO_4$ ) mineral found in bastnasite ore, which is located within the borders of Eskişehir province of our country and has a very important place in terms of economic return to our country, from the ore by flotation technique and to obtain high purity barite. The ore sample taken from the relevant region in accordance with the technique was ground with the help of a crusher-grinder and brought to the appropriate particle size. Sieve process was applied to the ore sample, which was brought to the appropriate particle size, and by this means, the appropriate particle size and homogenized sample was obtained. After the appropriate solubilization process for the mineral analysis in the homogenized sample, analyzes were made and the amounts of minerals such as bastnasite, barite and fluorite in the sample were determined. Pre-flotation processes and barite flotation yields were investigated, but the desired level of enrichment could not be achieved. It was thought that the low retention efficiency of the flotation efficiency was due to the mineralogical structure of the ore and it was subjected to sulphidation before flotation in order to change the crystal structure of the ore. As a result of the experiments, it was observed that there is a significant increase in the flotation efficiency of barite in the flotation processes performed after the sulfuration process. In the experiments carried out under the determined optimum flotation conditions, it was determined that the barite contained in the ore increased from 31.13% to 91.14% with a flotation efficiency of 92.04%.



## Giriş

Barit minerali ( $BaSO_4$ ) özgül ağırlığının büyük olmasından dolayı uzun zamanlardan bu yana insanoğlunun dikkatini çekmiş ve bir çok alanda 'ağır spat' adı altında kullanılmıştır. Barit adının eski Yunancada 'ağır' anlamına gelen 'barus' kelimesinden türediği düşünülmektedir. Barit minerali doğada genellikle lamelli fibröz, nadiren de olsa konkresyonlar halinde bulunmakta ve yine doğada ince taneli yada toprağımsı görünümlü olanına da rastlanmaktadır. Genelde camsı ve reçine parlaklığına sahip olan barit çok az da olsa yarı saydam görünümde de olabilmektedir [1-4].

Doğal bir  $BaSO_4$  içeriğine sahip olan barit minerali doğada çoğunlukla beyaz renklidir. Bununla birlikte, gri, pembe, sarı, yeşil, mavi ve siyah renkli olanları da mevcuttur. Barit mineralinin sertliği 2.6-3.6 aralığında, özgül ağırlığı 4.4-4.6 aralığında değişkenlik gösterebilmektedir. Mineralinin kimyasal yapısı  $BaSO_4$  şeklinde olmakla birlikte, sırasıyla %65.70 ve %34.30 oranlarında  $BaO$  ve  $SO_3$  ihtiva etmektedir. Bileşimindeki baryum içeriği %58.80 düzeyinde olup erime noktası  $1580^\circ C$ 'dir [1, 5-8].

Doğada bulunuş şekillerine göre barit minerali doğada başlıca 3 tip yataklanma göstermektedir [9,10].

**1.Kalıntı yataklar:** Barit yataklarının yada içinde barit minerali bulunan kayaçların yıkanma işlemi sonucu meydana gelen kalıntı tip barit yatakları oldukça geniş yayılma alanı gösterirler ve açık işletmeye uygunlukları sebebiyle ekonomik değerleri oldukça fazladır. Bu tür yataklarda baritle birlikte flüorit, kalsit, kuvars, ve sülfür de yer alabilmektedir.

**2.Hidrotermal filonlar:** Düşük sıcaklıklarda meydana gelen epitermal-filon şeklindeki barit yataklanmalarına oldukça yaygın bir şekilde rastlanmaktadır, Hidrotermal kurşun-çinko yataklarında gangü meydana getiren barit birçok yerde filonun büyük kısmını oluşturmakla birlikte yapıda yer alan diğer sülfürlü mineraller

küçük bir hacme sahiptir. Bu tür yataklarda barit az da olsa flüorit, kuvars, kalsit ile birlikte bulunur ve daha az olasılıkla selestit, dolomit ve siderit ile birlikte bulunmaktadır.

**3.Stratiform yataklar:** Farklı zamanlarda alt sedimenter formasyonlar bünyesinde stratifiye kütleler halinde meydana gelen barit yatakları özellikle dolomit ve kalkerler içerisinde yer almaktadırlar. Bu tür yatakların geniş alanda yer alması, 10 metreye kadar kalınlığa sahip olmaları ve açık işletmeye müsait olmaları nedeniyle ekonomik açıdan önem teşkil etmektedirler. Bu tür yataklarda baritin içinde bulunan ince taneli kuvars bulunmakta olup mineral bunun dışında da bir miktarda organik madde ihtiva etmektedir.

Dünyadaki barit rezervinin yaklaşık 180-200 milyon ton olduğu açıklanmıştır. Bu rezervlerin başlıcaları ABD'de (70 milyon ton) ve Almanya'dadır (7 milyon ton). Yapılan çalışmalarda, ülkemizde bulunan barit yataklarının dünya standartlarına göre gerek cevher bünyesindeki oranı gerekse de mineral örgüde ihtiva ettiği yabancı maddeler açısından yüksek kaliteli olduğu tespit edilmiştir. Ülkemizde devlet bünyesinde ve özel sektörlere ait ruhsatları bulunan Eskişehir, Kütahya, Konya, Kocaeli, Kayseri, Antalya, Mersin, Muş, İzmir, Trabzon ve Gümüşhane illerine dağılmış durumda barit yatakları bulunmaktadır [11-15].

Barit ( $BaSO_4$ ) genel olarak petrol endüstrisinde sondaj kısmında dolgu malzemelerin yapımında ve kimyasalların üretiminde yaygınca kullanılmaktadır. Bunların dünya pazarında tüketimi sırasıyla %90 sondaj, %7 kimya ve %3 dolgu sektörüdür. Barit mineralinin ilk kullanımı yüksek özgül ağırlığı ve beyaz renkte olmasından dolayı boya, kağıt ve cam endüstrilerinde olmuştur ancak 1920'lerden sonra oldukça yaygın bir şekilde petrol ve doğal gaz aramalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanda kullanımı oldukça yaygın hale gelen barit esas olarak petrol sondajlarında çamurun ağırlaştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Barit, sondaj işlemi esnasında oluşan formasyonların yukarı çıkarılmasında, oluşan sondaj deliği duvarlarının sağlamllaştırılmasında ve petrolün beklenen seviyelere yaklaştığında ve basınçlı gazın geliş hızını ayarlama da kullanılır. Barit

katkı maddesi olarak lastik, kâğıt ve ebonit sanayinde de oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Cam endüstrisinde parlaklığı arttırmak amacıyla, plastik sanayinde plastiğe matlık vermek amacıyla, mercek ve TV tüpleri üretiminde ve tarım ilaçları üretiminde inert madde olarak kullanılmaktadır. Baritin önemli kullanım alanlarından birisi de boya sanayiidir [16-18].

Flotasyon, farklı özelliklerdeki katı taneciklerinin birbirlerinden yüzdürme işlemi ile ayrılması işlemidir. Flotasyon işlemi genel olarak madencilik endüstrisinde metalürjik işlemlerde yaygınca kullanılmaktadır. Flotasyon işlemi ile ayrılması ve zenginleştirilmesi istenilen mineral cevher bünyesinde bulunan diğer minerallerden (gang) ya da mineral olmayan diğer bileşenlerden ayrılarak ekonomik olarak değer kazanmasına katkı sunmaktadır. Flotasyon işlemi ilk defa bazı sülfür ve oksit filizlerine uygulanmış ancak ilerleyen zamanlarda diğer mineral yapıların ayrılmaları içinde yaygınca kullanılmaya başlanmıştır [19-31].

Ülkemizde bulunan barit içerikli cevher % 30 tenörlü yaklaşık 1 milyon ton barit içermektedir. Cevher, bünyesinde barit dışında fluorit ve nadir toprak elementlerini ihtiva eden bastnasit minerali ile oldukça kompleks bir yapıya sahiptir [1]. Eskişehir ili sınırları içerisinde yer alan cevher yatağı ile ilgili yapılan araştırmalar 1959 yılına kadar uzanmaktadır. Bu araştırmaların ilk aşamasında cevherleşmenin oluşumu ve yatağın rezervi araştırılmış ve gerekli raporlar hazırlanmıştır. [15,32]. Bununla birlikte cevher yatağının teknolojik sorunlarını çözmek amacıyla bazı ön araştırmalar yapılmıştır [33]. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan araştırmalarda cevher bünyesinde bulunan minerallerin çok ince taneli yapıda olması, fiziksel yöntemler kullanılarak zenginleştirilebilmelerini oldukça zorlaştırdığı açıklanmıştır.

Cevher bünyesinde yer alan baritin diğer bileşenlerden ayrılması için yapılan araştırmalarda, sarsıntılı masa [34,35] ve flotasyon [36,37] gibi farklı teknikler uygulanmış, ancak cevher bünyesinde bulunan

baritin zenginleştirilmesi istenilen seviyede gerçekleştirilememiştir.

Bu çalışmada, ülkemizde Eskişehir ili sınırları içerisinde yer alan ve ülke ekonomisi için oldukça önem teşkil eden cevher numunesinden baritin flotasyon tekniği ile cevher bünyesinden ayrılması ve konsantre edilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında cevher örnekleri ilk önce belirli tanecik boyutuna gelmesi için öğütme işlemine tabi tutulmuş devamında öğütülen cevher numunelerinin homojen hale getirilmesi için elek işlemi uygulanmış ve numune -100 mesh tanecik boyutuna getirilmiştir. Bir sonraki aşamada ise cevher bünyesinde bulunan bileşenlerin analizi yapılmış; bastnasit bünyesindeki nadir toprak metalleri ICP-OES spektrometresi ile, barit analizi gravimetrik yöntemle ve fluorit analizi ise iyodometrik yöntemle tayin edilmiş, ve yapıda yer alan barit, bastnasit ve fluoritin miktarları belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında, cevher bünyesinde yer alan baritin flotasyon tekniği uygulanarak yapıdan ayrılması ve zenginleştirilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, cevherin serbestlik derecesini ve buna paralel olarak ve flotasyon verimini arttırmak amacıyla flotasyon işlemi öncesi sülfürleme aşaması gerçekleştirilmiştir. Sülfürleme çalışmasında, deneysel parametrelerin optimize edilmesi amacıyla, ortam sıcaklığı, zaman ve H<sub>2</sub>S miktarının sülfürleme işlemine olan etkisi araştırılmıştır.

Diğer taraftan, baritin flotasyonu işleminde optimum flotasyon koşullarını belirlemek amacıyla yapılan deneylerde ortam pH'ı, toplayıcı miktarı, pülp yoğunluğu ve bazı canlandırıcı ve bastırıcı reaktiflerin flotasyon verimine etkisi incelenmiştir. Optimum koşullarda elde edilen sonuçlar cevher numunesinde yer alan baritin flotasyon veriminin %92.04 olduğunu göstermiştir. Bu yöntemle ortaya çıkan konsantrede barit tenörü % 91.18'lere kadar yükseltilmiştir.

## Deneysel Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneysel prosedürler 4 ana kategoride toplanmıştır;

- ✓ Cevher numunelerinin temini, kırıcı-öğütücü vasıtası ile öğütülerek uygun tanecik boyutuna getirilmesi ve elek işlemi ile homojenizasyon sağlanması
- ✓ Homojen tanecik boyutuna getirilmiş cevher bünyesindeki barit mineralinin bileşen analizi: Bu aşamada cevher numunelerinin içeriğinde yer alan baritin miktarını belirlemek amacıyla numune çözünürleştirilmesi çalışmaları HF ve HNO<sub>3</sub> içeren karışımda, sıcaklık kontrollü mikrodalga cihazı (Berghow marka MWS-2 model) ile yapılmıştır. Cevher bünyesindeki baritin analizi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> eritiş işlemi yapıldıktan sonra gravimetrik olarak yapılmıştır.
- ✓ Cevher numunesindeki barit mineraline yönelik gerçekleştirilen flotasyon işlemindeki verim arttırımına yönelik sülfürleme prosesinin gerçekleştirilmesi ve deneysel koşulların optimizasyonu: Çalışmanın bu aşamasında sülfürleme prosesi Şekil 1’de verilen ve iç hacmi 1.5 L olan, 2 cm et kalınlığına sahip bir hücrenin yer aldığı, basıncı 250 atm ve yaklaşık 350 °C sıcaklığa kadar dayanacak şekilde dizayn edilmiş, Cr-Ni çeliğinden üretilen bir otoklav kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Sülfürleme prosesinde kullanılan otoklav

- ✓ Sülfürlenmiş cevher numunesindeki baritin flotasyon metodu kullanılarak deriştirilmesi işlemi: Flotasyon çalışması Denver marka flotasyon cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem öncesi ve sonrası barit analizi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> eritiş işlemi yapıldıktan sonra gravimetrik olarak yapılmıştır.

## Sülfürleme prosesinde kullanılan kimyasal maddeler

Otoklav kullanılarak gerçekleştirilen sülfürleme prosesinde temel olarak aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir.

- ✓  $FeS_2 \rightarrow FeS + S$  (Oksijensiz ortamda 725 °C’de kavurma işlemi) (1)
- ✓  $2FeS + H_2SO_4 \rightarrow H_2S(g) + FeSO_4$  (2)

Yukarıda verilen reaksiyonlardan da görüldüğü gibi sülfürleme aşamasında sülfür kaynağı ve asit olarak sırasıyla pirit ve sülfürik asit kullanılmıştır.

## Flotasyon işleminde kullanılan kimyasallar

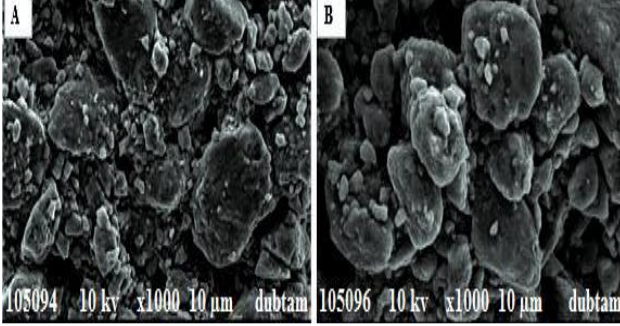
Baritin flotasyon işleminde kollektör olarak oleik asit (Merck), köpürtücü olarak DW<sub>250</sub>, silis ve demir bastırıcı olarak NaCN (Merck), pH ayarlamasında ise 0.1 M HNO<sub>3</sub> ve 0.1 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır.

Cevher numunesinin sülfürleme işlemi öncesi ve sonrası karakterizasyon işlemlerinde ise FEI marka Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Fourier Transform Infrared Spektrofotometre (FT-IR) (Perkin Elmer Spectrum 400) kullanılmıştır.

Barit analizlerinde kullanılan bütün kimyasallar Merck marka tuzlarından hazırlanmıştır. Deneysel aşamaların tamamında ortam pH’nın ölçülmesinde Mettler Toledo marka pH metre kullanılmıştır.

## Cevher numunesinin karakterizasyonu

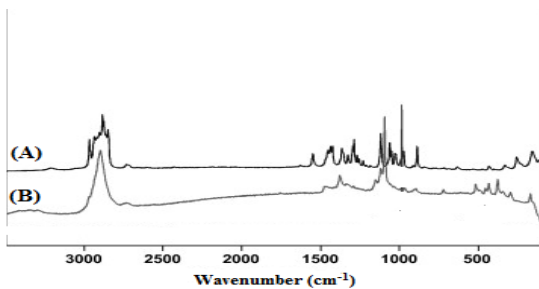
### SEM görüntüleri



Şekil 2. Cevher numunelerine ait SEM fotoğrafları A) sülfürleme prosesinden önce; B) sülfürleme prosesinden sonra

SEM görüntülerinden görüldüğü ve elde edilen deneysel verilerden de anlaşıldığı üzere sülfürleme işlemi öncesi cevher bünyesinde bulunan bastnasit, barit, flüorit ve diğer yan bileşenler arasındaki etkileşimin daha fazla olduğu, taneciklerin birbirleriyle daha sağlam örgü sistemi meydana getirdiği ve buna bağlı olarak serbestleşme derecesinin düşük olduğu sonucuna varılmış, yapılan ön deneylerde elde edilen deneysel veriler de bunu desteklemiştir. Sülfürleme işlemi sonrası SEM görüntüsünden de görüldüğü üzere tanecikler arası etkileşimin azaldığı ve buna bağlı olarak taneciklerin birbirlerinden uzaklaştığı tespit edilmiş, elde edilen deneysel veriler de ayrılma verimlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

### FT-IR Analizleri



Şekil 3. Cevher numunelerine ait FT-IR spektrumları (A) sülfürleme prosesinden önce; (B) sülfürleme prosesinden sonra

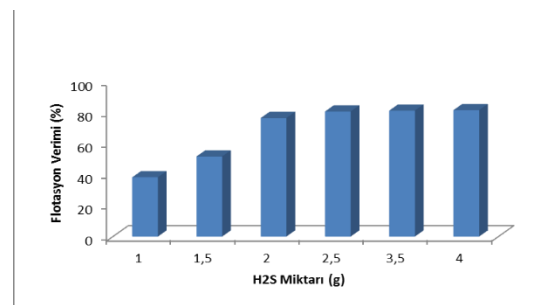
Şekil 3'teki FT-IR spektrumları incelendiğinde sülfürleme işlemi öncesi cevher bünyesinde bulunan bileşenlerin birbirleriyle etkileşimleri oldukça kuvvetli ve örgü sisteminde birbirleriyle etkileşim halinde oldukları için spektrumda sülfürleme işlemi sonrası piklerin daha belirgin ve pik bölgelerinin birbirinden ayrıldığı tespit edilmiştir. Spektrumda meydana gelen değişiklik taneciklerin sülfürleme işlemi sonrası birbirlerinden ayrıldığını ve kendilerine özgü piklerin daha belirgin oluşması şeklinde değerlendirilmiştir.

### Flotasyon Prosesi Öncesi Sülfürleme Koşullarının Optimizasyonu

Sülfürleme koşullarının optimizasyonu için ilk aşamada cevher içeriğinde bulunan barit mineralinin ayrışması amacıyla için flotasyon metodu uygulanmıştır. Ancak, flotasyon veriminin çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin cevher numunesinin mineralojik yapısı ile ilgili olduğu düşünülmüştür. Bu sorunu gidermek ve serbestleşme derecesinin istenilen düzeye artırılması için sülfürleme prosesi gerçekleştirilmiştir.

### Sülfürleme prosesinde ortamda yer alan optimum H<sub>2</sub>S miktarının belirlenmesi

Çalışmanın bu aşamasında, sülfürleme prosesinde ortamda yer alan optimum H<sub>2</sub>S miktarının belirlenmesi için, H<sub>2</sub>S miktarının flotasyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir.

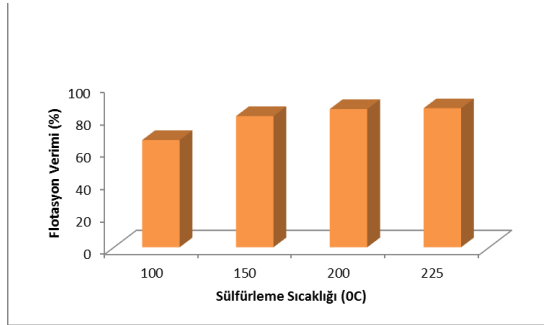


Şekil 4. H<sub>2</sub>S miktarının Barit flotasyon verimine etkisi

Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, 2,5 g H<sub>2</sub>S miktarından sonra barit flotasyon veriminin %81'ler düzeyinde sabit kaldığı belirlenmiştir ve elde edilen konsantre numunedeki barit tenörünün %76,2 olduğu yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir.

### Optimum sülfürleme sıcaklığının tespit edilmesi

Bir önceki aşamada tespit edilen, optimum H<sub>2</sub>S miktarı kullanılarak yapılan çalışmalarda sülfürleme prosesinde ortam sıcaklığının barit flotasyonunu ve verimini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ise Şekil 5'te verilmiştir.

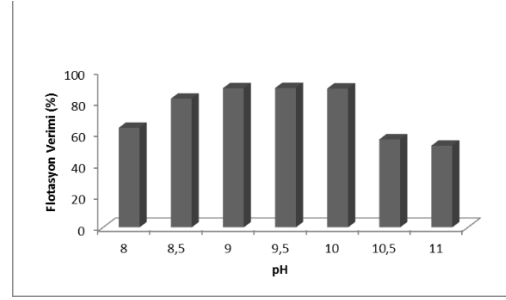


Şekil 5. Sülfürleme sıcaklığının baritin flotasyon verimine etkisi

Şekil 5'ten de görüldüğü gibi, sülfürleme sıcaklığı arttıkça 150 °C'ye kadar flotasyon verimi artmış ve sabitlenmiştir. Baritin flotasyon veriminin % 86'ya kadar yükseldiği tespit edilmiş elde edilen konsantrede numunedeki barit tenörünün ise % 82'lere yükseldiği belirlenmiştir.

### Flotasyon prosesine yönelik optimum pH'ın tespit edilmesi

Ortam pH'ının uygulanan flotasyon prosesinin verimine etkisini araştırmak için ortam pH'ı 8 ile 11 aralığında değiştirilmiş ve bu koşullarda % flotasyon verimi belirlenmiştir. pH düzenleyici olarak Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NaHCO<sub>3</sub> tamponu, NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub>Cl tamponu ve NaOH kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.

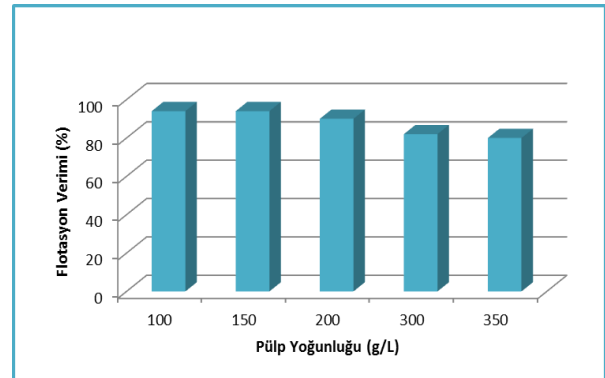


Şekil 6. Ortam pH'ının barit flotasyon verimine etkisi

Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, ortam pH'ı 9, 9.5 ve 10 olduğunda en fazla flotasyon verimleri elde edilmiştir. Bununla birlikte, pH 9.5 ve 10'da yüzen madde miktarının fazlalığı sebebi ile elde edilen konsantre numunedeki barit tenörlerinin pH 9.0'da elde edilen konsantre tenöründen düşük olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı, uygulanan flotasyon prosesindeki verim ile beraber yüzen madde miktarı da oldukça önemlidir ve optimum ortam pH'ı yüzen madde miktarı da dikkate alındığında 9.0 olarak tespit edilmiştir.

### Flotasyon prosesi için optimum pülp yoğunluğunun tespit edilmesi

Flotasyon prosesi için optimum pülp yoğunluğunun tespit edilmesi için gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda pülp yoğunluğu 100 ile 350 g L<sup>-1</sup> aralığında tutulmuştur. Şekil 7'de pülp yoğunluğunun barit flotasyon verimine etkisi verilmiştir.

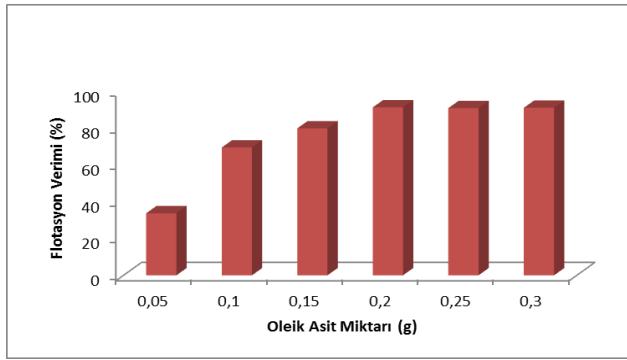


Şekil 7. Pülp yoğunluğunun barit flotasyon verimine etkisi

Şekilden de görüldüğü gibi, belirli bir pülp yoğunluğuna kadar ( $200 \text{ g L}^{-1}$ ) barit flotasyon veriminde önemli bir fark tespit edilmemiştir. Fakat, bu değerden sonraki pülp yoğunluğunda ( $300$  ve  $350 \text{ g L}^{-1}$ ) uygulanan flotasyon veriminin düştüğü gözlenmiştir.

### Toplayıcı miktarının flotasyon verimine etkisi

Cevher bünyesinde bulunan barite uygulanan flotasyon prosesinde kullanılan toplayıcının (oleik asit) optimum miktarının belirlenmesi amacıyla toplayıcı madde olan oleik asit miktarının  $0.05$ - $0.25 \text{ g}$  aralığında değiştirilerek flotasyon verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 8'de oleik asit miktarının barit flotasyon verimi üzerindeki etkisi verilmiştir.



Şekil 8. Oleik asit miktarının barit flotasyon verimi üzerindeki etkisi

Şekil 8'den görüldüğü gibi, toplayıcı madde olan oleik asitin  $0.2 \text{ g}$  olduğu durumda barit flotasyon veriminin en yüksek değerde olduğu (% 92) belirlenmiştir. Diğer taraftan, elde edilen konsantre numunedeki barit tenörü ise % 91.2 olarak hesaplanmıştır.

### Sonuçlar

Gerçekleştirilen bu çalışmada, Eskişehir ili sınırları içerisinde bulunan ve ülkemiz için oldukça yüksek ekonomik değere sahip barit-fluorit-bastnasit cevherinden baritin flotasyon yöntemi ile seçici olarak ayrılması ve zenginleştirilmesi hedeflenmiştir

Cevher numunesine flotasyon prosesi uygulanması durumunda elde edilen veriminin düşük olduğu tespit edilmiş, bundan dolayı numunenin serbestlik derecesinin yükseltilmesi amacıyla flotasyon prosesi uygulanmadan önce cevherin sülfürlenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra en uygun şartlar altında uygulanan flotasyon prosesinde cevher bünyesinde bulunan baritin ( $\text{BaSO}_4$ ) % 92'si flote edilmiştir ve konsantre numunedeki baritin tenörü % 91'lere kadar çıktığı tespit edilmiştir. Ana cevher içerisindeki başlangıç tenörünün % 30'lar olduğu göz önüne alınırsa 3 katın üzerinde bir zenginleştirme gerçekleştirilmiştir. Elde edilen konsantredeki barit tenörünün %91'lere kadar çıktığı göz önüne alındığında bu saflıkta barit konsantresinin bir çok uygulama alanında rahatlıkla kullanılabilceği bir saflık düzeyine konsantre edilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] İ. Dolak, 'Nadir Toprak elementleri içeren barit ve fluorit cevherinin değerlendirilmesi' *Ph.D. dissertation, Dept. Chem., Dicle Univ., Diyarbakır, Turkey, 2010.*
- [2] İ. Dolak, R. Ziyadanoğulları, 'Eskişehir bastnasit cevherinde bulunan toryumun zenginleştirilmesi', *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 10, no. 1, pp. 211-220, 2019.
- [3] İ. Dolak, 'Eskişehir bastnasit cevherinde bulunan seryumun zenginleştirilmesi', *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 12, no. 2, p. 309-315, 2021.
- [4] İ. Dolak, R. Keçili, 'Eskişehir bastnasit cevherinde bulunan lantanın zenginleştirilmesi', *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 79-85, 2019.
- [5] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, 'Removal and Preconcentration of Pb(II), Cr(III), Cr(VI) from the Aqueous Solution and Speciation of Cr(III)-Cr(VI) by Using Functionalized Amberlite XAD-16 Resin with Dithioethylenediamine' *Asian Journal Of Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 6117-6124, 2010.
- [6] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, 'Removal and Preconcentration of Pb(II), V(V), Cr(VI) from the Aqueous Solution and Selective Separation of V(V)-Cr(VI) by Using Functionalized Amberlite XAD-16 Resin with Dithioethylenediamine' *Asian Journal of Chemistry*, vol. 22, no. 8, pp. 6107-6116, 2010.

- [7] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, 'Synthesis and preconcentration of Amberlite XAD-4 resin modified by dithioethylenediamine' *Asian Journal of Chemistry*, vol 21, no. 1, pp. 165-175, 2009.
- [8] İ. Dolak, İ. Teğin, R. Güzel, R. Ziyadanoğulları, 'Reduction of Cr (VI) in aqueous solutions by natural and roasted pyrite' *Asian Journal of Chemistry*, vol. 19, no. 3, pp 2389-2396, 2007.
- [9] H. Kaplan, 'MTA Genel Müdürlüğü, Enerji Hammadde Etüt ve Arama Dairesi' *MTA Dergisi*, Ankara, Türkiye, 1977.
- [10] S. Kulaksız, 'Eskişehir toryum cevherinin değerlendirilmesi', Ph.D. dissertation, Dept. Chem., Hacettepe Univ., Ankara, Turkey, 1977.
- [11] [24] İ. Dolak, 'Selective Adsorption of U(VI) by using U(VI)-imprinted poly-hydroxyethyl methacrylate-methacryloyl-L-histidine (p-[hema-(mah)3]) cryogel polymer', *Applied Ecology and Environmental Research*, vol. 17, no. 2, pp. 3165-3178, 2018.
- [12] İ. Dolak, 'Ion Imprinted Affinity Cryogels for the Selective Adsorption Uranium in Real Samples', *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*, vol. 38, no. 6, pp. 115-125, 2019.
- [13] M.S. Çiftçi, 'Eskişehir-Sivrihisar-Beylikahır fluoritli kompleks cevher yatağının fluorit yönünden değerlendirilmesine ilişkin ön teknolojik çalışmalar' *MTA Dergisi*, vol. 103, p. 82-83, 1985.
- [14] İ. Dolak, M. Karakaplan, B. Ziyadanoğulları, R. Ziyadanoğulları, 'Solvent Extraction, Preconcentration and Determination of Thorium with Monoaza 18-Crown-6 Derivative', *Bulletin of the Korean Chemical Society*, vol. 32, no. 5, pp. 1564-1568, 2011.
- [15] Elgin G., (1983). MTA Genel Müdürlüğü, Maden Analizleri ve Teknolojisi Dairesi, *MTA Dergisi*, Ankara, Türkiye.
- [16] R. Keçili, İ. Dolak, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, 'Ion imprinted cryogel-based supermacroporous traps for selective separation of cerium (III) in real sample', *Journal of Rare Earths*, vol. 36, no. 8, pp. 857-862, 2018.
- [17] M. Kul, Y. Topkaya, İ. Karakaya, 'Rare earth double sulfates from pre-concentrated bastnaesite', *Hydrometallurgy*, vol. 93, no. pp. 129-135, 2008.
- [18] G. Canpolat, İ. Dolak, R. Keçili, R. Onat, Z. Baysal, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, 'Development of molecular imprinting-based smart cryogels for selective recognition and separation of serum cytochrome-c as a biochemical indicator', *Process Biochemistry*, vol. 106, pp. 112-119, 2021.
- [19] R. Vijalayakshmi, S.L. Mishra, H. Singh, C.K. Gupta, 'Solvent Extraction of Uranium from Wet Process Phosphoric Acids', *Hydrometallurgy*, vol 61, pp. 75-80, 2001.
- [20] Z. Baysal, E. Aksoy, İ. Dolak, A. Ersöz, R. Say R., 'Adsorption behaviours of lysozyme onto poly-hydroxyethyl methacrylate cryogels containing methacryloyl antipyrine-Ce(III)', *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 67, no. 4, pp. 199-204, 2018.
- [21] E.V. Oral, S. Özdemir, İ. Dolak, V. Okumus, A. Dundar, B. Ziyadanoğulları, Z. Aksoy, R. Onat, R., 'Anoxybacillus sp. SO B1-Immobilized Amberlite XAD-16 for Solid-Phase Preconcentration of Cu(II) and Pb(II) and Their Determinations by Flame Atomic Absorption Spectrometry', *Bioremediation Journal*, vol .19, no. 2, pp. 139-150, 2015.
- [22] İ. Yener, E.V. Varhan, İ. Dolak, S. Özdemir, R. Ziyadanoğulları, 'A new method for preconcentration of Th (IV) and Ce (III) by thermophilic Anoxybacillus flavithermus immobilized on Amberlite XAD-16 resin as a novel biosorbent', *Ecological Engineering*, vol. 103, pp. 43-49, 2017.
- [23] R. Chi, X. Zhang, G. Zhu, Z.A. Zhou, Y. Wu, C. Wang, F. Yu F, 'Recovery of rare earth from bastnaesite by ammonium chloride roasting with fluorine deactivation', *Minerals Engineering*, vol. 17, pp. 1037-1043, 2004.
- [24] İ. Dolak, R. Keçili, D. Hür, A. Ersöz, R. Say, 'Ion-imprinted polymers for selective recognition of neodymium (III) in environmental samples', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol 54, no. 19, pp. 5328-5335, 2015.
- [25] M. Chamsaz, M.S. Hosseini, M.H. Arbab-Zavar 'Synergic Flotation Spectrophotometric Investigation of Rare Earth(III) Ions with Alizarin and 1,10-Phenanthroline', *Journal of Colloid Interface Science*, vol 256, pp. 472-476, 2002.
- [26] İ. Dolak, 'Selective Separation and Preconcentration of Thorium (IV) in Bastnaesite Ore Using Thorium (IV)-Imprinted Cryogel Polymer', *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, vol. 46, no. 2, pp. 187-197, 2018.
- [27] J. Ren, S. Song, A. Lopez-Valdivieso, S. Lu, 'Selective flotation of bastnaesite from monazite in rare earth concentrates using potassium alum as depressant', *International Journal of Mineral Processing*, vol. 59, pp. 237,245, 2000.
- [28] İ. Dolak, R. Keçili, R. Onat, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, 'Molecularly imprinted affinity cryogels for the selective recognition of myoglobin in blood serum', *Journal of Molecular Structure*, vol. 1174, pp. 171-176, 2018.

- [29] İ. Dolak, G. Canpolat, A. Ersöz, R. Say, 'Metal chelate based site recognition of ceruloplasmin using molecularly imprinted polymer/cryogel system', *Separation Science and Technology*, vol. 55, no. 2, pp. 199-208, 2020.
- [30] İ. Dolak, G. Canpolat, R. Keçili, R. Onat, Z. Baysal, B. Ziyadanoğulları, A. Ersöz, R. Say, 'A novel lanthanide-chelate based molecularly imprinted cryogel for purification of hemoglobin from blood serum: An alternative method for thalassemia diagnosis', *Process Biochemistry*, vol. 91, pp. 189-196, 2020.
- [31] İ. Dolak, R. Keçili, F. Yılmaz, A. Ersöz, R. Say, 'Selective Recognition and Separation of Ubiquitin by Nanoparticle Embedded Cryogel Traps with Ubiquitin Memories Based on Photosensitive Covalent Imprinting', *Journal of Analytical Chemistry*, vol. 76, no. 2, pp. 165-171, 2021.
- [32] Roskill R., The Economics of Rare Earths, '*Developments in Geochemistry*', Vol. 2, pp. 423-466 1988.
- [33] İ. Kayabalı, R. Baybörü, *Industrial Minerals*, Vol. 47, pp. 63-81, 1993.
- [34] G. Canpolat, İ. Dolak, C. G. Hussain, R. Keçili, C. M. Hussain, Sample Preparation with Conductive Polymers, *Conductive Polymers in Analytical Chemistry*, pp.119-140, 2022.
- [35] A.E. Yüce, Ph.D. dissertation, Dept. Chem., İstanbul Teknik Univ., İstanbul, Turkey, 1988.
- [36] G. Canpolat, İ. Dolak, R. Keçili, C. G. Hussain, A. Amiri, C. M. Hussain, Conductive Polymer-Based Nanocomposites as Powerful Sorbents: Design, Preparation and Extraction Applications, *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, Vol. , p. 1-14, 2022.
- [37] M. Gündüz, Ph.D. dissertation Dept. Chem., Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 1992.





# The Application of Different Technologies for Removal of Rifampicin from Aquatic Environments: A Recent Review

Hatice ERDEM\*

Muş Alparslan University, Department of Food Engineering, h.erdem@alparslan.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-7666-8301

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 24 May 2022  
Received in revised form 17  
December 2022  
Accepted 27 December 2022  
Available online 23 March 2023

### Keywords:

*rifampicin removal, adsorption,  
advanced oxidation process,  
membrane process, degradation*

Doi: 10.24012/dumf.1120755

\* Corresponding author

## ABSTRACT

Antibiotics are a group of drugs widely used as human and veterinary drugs and in aquaculture and agriculture. Recently, parent compounds and their metabolites are constantly excreted and released into environmental matrices, due to the fact that antibiotics cannot be completely metabolized after consumption by humans and animals and cannot be completely removed by conventional wastewater treatment plants. The accumulation and persistence of antibiotics in environmental matrices can lead to harmful effects on ecosystems, even at concentration levels as low as ng/L to µg/L. Rifampicin (RIF), which belongs to the macrocyclic antibiotic class, is the most important antibiotic widely used in the tuberculosis treatment. Lately, the RIF was detected in aquatic environments and needs to be removed effectively. This review considers the current state of knowledge regarding the sources, fate, effects and removal processes of the antibiotic RIF. In this review, the different treatment techniques such as adsorption, advanced oxidation processes (AOPs) and other technologies (membrane process and moving bed biofilm reactor) for RIF removal were evaluated and compared. A comparison between these techniques was made focusing on performance and efficiency. As a result, it was found that adsorption and AOPs were the most studied method and almost all of the studied RIF removal methods were also to be successful.

## Introduction

The emerging pollutants are new chemicals or products that do not have regulatory policy and whose effects on the environment and human health are unknown, and have now become a serious environmental problem due to changing lifestyle patterns. These emerging pollutants usually involve personal care products, pesticides, endocrine disruptors, microplastics and pharmaceuticals [1, 2]. Pharmaceuticals among emerging pollutants have been a turning point in the development of human scientific, and have prolonged life span, saved millions of people from fatal diseases and improved the quality of life. This success has resulted in their emergence as rapidly growing environmental pollutants. In the last three decades, residues of pharmaceuticals have been detected in almost all environmental matrices on every continent, including the polar regions which have the world's most pristine environment. These environmental matrices include surface waters, groundwaters, wastewater treatment plant influents and effluents, and sludge. Pharmaceutical pollutants widely are visible in the geosphere and biosphere, and their concentrations are in a wide range. Variable degradation rates result in limited degradation both in the natural environment and in wastewater treatment plants. Although

most pharmaceuticals are not enormously persistent, their constant release into the environment in small but important amounts from different sources makes a lots of them "pseudo-persistent" [3].

Pharmaceutical compounds can be classified into different classes such as antibiotics, anti-inflammatory, antidepressants, hormones, beta-blockers, antiepileptic, contrast products, statins, etc. [2]. The term "antibiotic" is used to refer to any class of organic molecules that inhibits or kills microbes through specific interactions with bacterial targets, regardless of the origin of a particular compound or class [4]. Antibiotics can be grouped according to their chemical structure or mechanism of action. These are a diverse group of chemicals that can be divided into different subgroups such as macrolides, β-lactams, sulfonamides, tetracyclines, quinolones, and others [5]. Antibiotics are continuously excreted and discharged into the environment from anthropogenic sources such as wastewater treatment plants due to their overuse and misuse for human (domestic and hospital use), veterinary and agricultural purposes. The introduction of these compounds into the environment through anthropogenic sources can pose a potential risk to aquatic and terrestrial organisms. The presence of antibiotics in the environment, even at their low concentration levels (ng/L - µg/L), was associated with a

prevalence of chronic toxicity and resistance to antibiotics in bacterial populations, making them ineffective in the treatment of several diseases in the near future [4, 6].

Rifampicin (RIF) is one of the most potent broad-spectrum antibiotics against bacterial pathogens and is used as a first-line drug to treat tuberculosis, as well as against diseases such as HIV, cancer, leprosy, and Alzheimer [7, 8]. In addition, a recent study revealed that RIF has good binding affinity with the COVID-19 protease and therefore can be used as prophylaxis and therapeutic treatment for corona patients [9]. After RIF enters the body, it is partly digested and the excessive amount is excreted in the faeces or urine. Lately, RIF was detected in wastewater from sewage treatment plants. However, RIF antibiotic contaminant cannot be completely removed in existing treatment systems due to its stability in the environment, high solubility in aqueous media and low bioavailability. RIF leakage into surface water, groundwater and sediments during production or application stages can possibly cause endocrine disorders and chronic toxicity in aquatic organisms and humans. It has also been found that RIF residues in the aquatic ecosystem can lead to the formation of antibiotic resistant genes (ARGs) in fish pathogens, the development of resistance to antibiotics, the alteration of microbial communities, and the potential transmission of ARGs to pathogens of humans as well as terrestrial animals [10]. Therefore, it is necessary to choose an efficient, easy-to-operate, cost-effective and environmentally friendly approach to the removal of RIF. According to the author's knowledge, any review article on the methods for the removal of antibiotic RIF have not yet been published. Therefore, the purpose of this review paper is to compare the different treatment processes used in the literature to date for the removal of RIF from aqueous matrices and thus provide insights for researchers in their future studies.

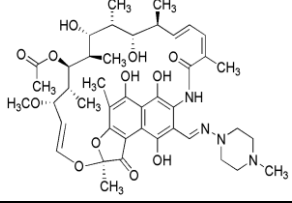
### Rifampicin and its impacts on the environment and humans

RIF, 3-[(4-methyl-1-piperazinyl)imino]methyl rifamycin, also known as rifampin, belongs to the class of macrocyclic antibiotics containing a naphthohydroquinone ring spanned by a highly substituted aliphatic bridge, and the type and location of the substituent on their aromatic ring are different from each other. RIF is the most important antibiotic widely used in the treatment of tuberculosis, Hansen's disease, and other serious infections such as HIV, which inhibits bacterial DNA-dependent RNA polymerase [11].

RIF, the first antibiotic of the ansamycin family, was isolated in 1959 and entered into therapy in 1962 [12]. RIF was approved by the Food and Drug Administration (FDA) in 1971 for the treatment of patients with tuberculosis and asymptomatic carriers of *Neisseria meningitidis*, and these are still the only approved indications [13]. RIF is also used by the government health program as an adjuvant in the treatment of immunocompromised patients and is on the World Health Organization (WHO) Essential Medicines List, the most important medications needed in the basic health system [14-16]. RIF is a limit Class II drug,

according to the Biopharmaceutical Classification System (BCS). RIF exhibits amphiphilic properties due to its chemical structure with very low pH-dependent aqueous solubility and poor stability in aqueous media [17]. RIF has zwitterionic nature with a  $pK_{a1}$  of 1.7 related to the 4-hydroxyl group and a  $pK_{a2}$  of 7.9 related to the 3-piperazine nitrogen, with an isoelectric point at pH 4.8 in aqueous solution [18]. Molecular structure and physicochemical properties of RIF are given in Table 1. RIF is relatively non-toxic [18]. However, a high dose of RIF can be toxic to biological systems and cause various side effects such as allergic reactions, nausea, diarrhea, vomiting, hepatotoxicity, loss of appetite, immunological disturbances, oxidative conjunctivitis, fatigue, headache and organic brain syndrome [19, 20].

Table 1. Physicochemical properties and molecular structure of RIF

CAS No.	13292-46-1
Molecular structure	
Molecular formula	$C_{43}H_{58}N_4O_{12}$
Molecular weight (g/mol)	822.953
Log Kow	4.24
pKa	1.70, 7.90
Solubility (H <sub>2</sub> O, mg/mL)	1.4

Once in the body, RIF is partly digested and its excess is excreted by humans through urine and faeces to the sewage systems, and was detected in effluents from wastewater treatment plants since the conventional treatment plants cannot effectively remove this type of resistant compounds [21]. It is of great concern that if RIF leaches into surface and groundwater, it can be a cause of chronic toxicity for humans and aquatic species [22]. RIF was detected at concentrations of 112.37–211 ng/g in sediments of the Dagu River [23], and at an average concentration of 0.3 ng/L with a 20% detection frequency in aquaculture ponds located in Dongying City, Shandong Province, in China [24]. RIF applied in shrimp rearing in coastal wetland of Cangio District (Hochiminh City, Vietnam) was detected both in rearing ponds and outlet as 0.19–0.23 and 0.24–16.5 µg/l, respectively [25].

RIF can be used for the control of bacterial diseases (e.g., columnaris disease) in fish caused by bacterial and viral infection. Because RIF is a fat-soluble compound, RIF can enter into the body easily. It produces residues in the edible tissues of fish products and hereby can be harmful for human health. It can also lead to drug resistance in the

human body [19]. Studies on RIF residues in the aquaculture environment have shown that RIF with a high risk of developing resistance leads to ARGs in fish pathogens, increases antibiotic resistance, alters the microbial community, and potentially transfers ARGs to terrestrial animal and human pathogens [26, 27]. Huang et al. [28] detected  $310 - 6.1 \times 10^4$  CFU/mL of rifampicin-resistant bacteria with average percentages of 11% in the effluent of a wastewater treatment plant in China. In addition, hepatotoxicity caused by anti-tuberculosis drugs was documented in many studies [29, 30]. The effect of RIF on the metabonomic profile of rat urine and its relation to the traditional toxicity assessment of blood biochemical markers and histopathology was investigated and RIF was found to cause hepatotoxicity [31]. A 2-month regimen of RIF and pyrazinamide for the treatment of tuberculosis was found to be effective, but causes hepatotoxicity of increasing severity [32].

## Different technologies for removal of rifampicin

### Adsorption

Adsorption is the mechanism in which an ion or molecule in the liquid or gaseous bulk phase stays on the surface of a solid. Here the ion or molecule is an adsorbate and the solid used for adsorption is called as an adsorbent. A liquid is rarely used as an adsorbent. Adsorption is a surface phenomenon involving only the adsorbent surface, and the adsorbate should not penetrate inside the adsorbent structure. The reverse mechanism, i.e. the separation of a molecule from the adsorbent surface, is called as desorption [33]. Adsorption was one of the most efficient, promising and widely used processes for the removal of pharmaceutical pollutants from waters due to its low initial investment, operational simplicity, non-selective nature and also not causing the formation of hazardous products [34]. Diverse porous materials such as activated carbon, zeolite, silica, resin, clay, graphene oxide, multi-walled carbon nanotubes and chitosan were investigated to improve the adsorption capacity of pharmaceuticals on adsorbents. The main adsorbents used to remove pharmaceuticals from wastewater are given in Figure 1 [35]. In this section, a review of adsorption studies in the literature for RIF removal is discussed and important outlines of these studies reported in recent years are presented.

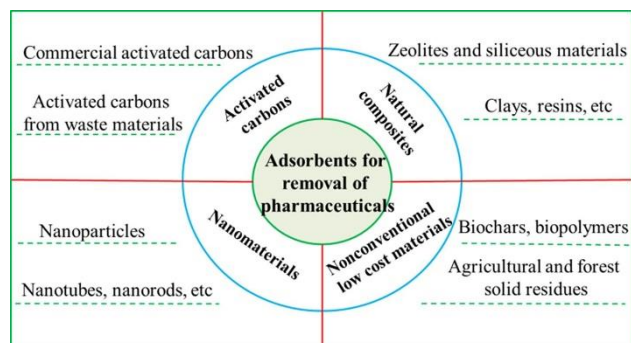


Figure 1. Main adsorbents used to remove pharmaceuticals from wastewater [35].

Among the adsorbents, activated carbons (ACs) have received more attention by reason of their better adsorption performances than other adsorbents. ACs are defined as a carbonaceous solid with high surface area, high micropore volume, and high adsorption capacity. Due to these characteristics, ACs are classified as an effective adsorbent for air pollution control and water treatment. Appropriate application of AC is dependent on its properties that vary with the type of raw precursor used and the technique of preparation. Commonly used materials for synthesis of ACs are natural coal, petroleum residue and wood due to their high carbon content. Recently, the production of activated carbon from agro-industrial wastes for a less costly adsorption system was on the focus of researchers [36]. In a study, the AC was prepared and characterized by  $ZnCl_2$  activation using vine shoots (*vitis vinifera*) which is a lignocellulosic and low cost precursor. Then, adsorption experiments were carried out by selecting RIF as the target pollutant to determine the adsorption capacity of the prepared AC. It was reported that the pore size, surface area and pore volume of AC increased with increasing impregnation rate and temperature, reaching a maximum at an impregnation rate of 40/30 (precursor/ $ZnCl_2$ ) at  $700^\circ C$ . Under optimum conditions, it was found that the activated carbon has the total pore volume of  $0.842\text{ cm}^3/\text{g}$ , BET surface area of  $1689\text{ m}^2/\text{g}$ , iodine number of  $1276\text{ mg}/\text{g}$  and the point of zero charge ( $pH_{PZC}$ ) of 4.8 as well as high carbon content (89.65%), acidic functional groups (total  $0.2516\text{ meq}/\text{g}$ ) and a very porous surface. It was observed that the RIF removal yield increased with the increase of AC dosage and contact time, while it decreased with increasing initial dosage of RIF. It was determined that the adsorption data best matched the Langmuir adsorption isotherm and the maximum adsorption capacity was found to be  $476.2\text{ mg}/\text{g}$ . As a result, it was reported that the quality AC can be produced with  $ZnCl_2$  activation from vine shoots [37].

In another study, the activated carbon cocoa shells (ACCS) were applied as a biosorbent to remove RIF antibiotics from industrial effluents. It was observed that the ACCS surface had an irregular and coarse structure before RIF adsorption, and the structure of the cocoa shells did not change significantly after RIF adsorption. The contact time to reach the equilibrium between adsorbent and adsorbate was found to be a minimum of 2 hours. It was determined that the effect of temperature on adsorption was low. Whereas the percentage of RIF removal efficiency increased with the increase of adsorbent dosage, but decreased in excessive adsorbent dosage ( $> 0.3\text{ g}/\text{L}$ ). It was explained as the reason for this that higher dosage leads to aggregation of particles and repulsive forces between the binding sites, resulting in reduced interaction of RIF with the adsorbent and a decrease in the total surface area of the adsorbent. When the effect of pH on RIF removal efficiency was investigated in the pH range of 5-10.5, it was determined that the yield decreased with increasing pH ( $> 6$ ). It was stated that this effect can be due to the surface charge of adsorbent ( $pH_{PZC}$ : 6.8) and that RIF molecules were converted from protonated, zwitteronic to anionic form during the transition from acidic to neutral and alkaline solutions. It was

concluded that the mechanisms controlling the adsorption of RIF on ACCS can be attributed to a combination of bond formation, hydrogen bonds, electrostatic interaction and hydrophobic interaction. It was found that the Freundlich isotherm model and the general order kinetic model ensured the best fit to the experimental data, and negative enthalpy indicated an exothermic process occurring through physisorption. From the obtained experimental data, it was concluded that the isosteric heat values decreased with the increase of the surface coating, indicating the existence of strong interactions between RIF and cocoa shell [38].

*Mytella falcata* shells (a bivalve mollusk), which has recently caught the attention of Brazilian researchers by cause of its high abundance and polluting potential, were used as a biosorbent for the antibiotic RIF removal from water. *Mytella falcata* shells were tested raw or after either pyrolysis or calcination (700 °C) to increase adsorption capacity. As a result of characterization studies, aragonite and calcite, which reflect the composition of *Mytella falcata* shells, were found to be mainly crystalline calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) forms of calcined *Mytella falcata* shells. The pHPZC of the adsorbent was determined as 11.80. After pyrolysis and even more after calcination, irregular particles of reduced size were observed, after which a more regular size shape was obtained. It was stated that this was an indicative of the change of material structure as it goes through the heat treatment processes. It was determined that calcined *Mytella falcata* shells have a high concentration of calcium (Ca) and compounds such as Sr, Si and K in much smaller proportions. The affinity of the raw, pyrolyzed or calcined *Mytella falcata* shells for RIF was preliminary tested and the calcined *Mytella falcate* shells were found to show the highest removal efficiency (78 ± 0.2). RIF is a non-polar molecule (polarity: Log P 3.719), solution pH changes its solubility, but was observed to have little effect on its adsorption on calcined *Mytella falcata* shells. It was explained that this result is related to the pHPZC of the adsorbent and the amphoteric properties of RIF. Therefore, it was stated that the substance can interact with the solid surface both below and above pH 11.8 (pHPZC). In addition, the equilibrium data showed that the RIF adsorption capacity was independent of temperature, probably due to the increase in the simultaneous water desorption with the increase in temperature. Experimental data showed a better fit to the pseudo-first order kinetic model. The obtained data from isotherm results fitted better to the Redlich-Peterson model, which is characterized by the multilayer adsorption hypothesis with non-uniform heat distribution. Thermodynamic parameters showed that the adsorption process was spontaneous and slightly endothermic. Further adsorption tests were conducted to investigate the effect of ionic strength; it was concluded that an important increase of about 15% in the salt concentration in the medium promoted RIF adsorption on calcined *Mytella falcata* shells. Adsorbent regeneration tests by sonication showed a important decrease of process performance after 5 adsorption/desorption cycles [21].

Rusu et al. developed 6 types of eco-friendly biosorbents (SC-A-5%, SP-A-5%, SC-C-2.5%, SP-C-2.5%, SPRMB-

A-5% and SPRMB-A-9%) by immobilizing *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces pastorianus* and *Saccharomyces pastorianus* residual biomass on natural polymers (alginate and chitosan) and evaluated their biosorptive potential for removal of three drugs (cephalexin, rifampicin, ethacridine lactate) and two dyes (orange II and indigo carmine). It was determined that the synthesized biosorbents lost their sphericity but it was less accentuated for the materials obtained by the immobilization of *Saccharomyces cerevisiae* ve *Saccharomyces pastorianus* on alginate than those on chitosan, and this behavior was due to the removal of water during drying. While similar proportions of carbon, nitrogen and oxygen were present in all biosorbents, there were differences in the percentages of sodium and calcium according to the preparation methods. pHPZC values for biosorbents prepared with sodium alginate were lower than the values for biosorbents prepared on chitosan bentonite (6.9 for SC-A-5%, 6.6 for SP-A-5%, 6.9 for SPRMBA-5% and 6.8 for SPRBM-A-9%, 8.3 for SC-C-2.5% and 8.8 for SP-C-2.5%). Collected data indicated that the best values for RIF removal was obtained for biosorbents containing chitosan as polymeric matrix (24.70 mg/g for SC-C-2.5% and 24.89 mg/g for SP-C-2.5%). It was reported that electrostatic and  $\pi$ - $\pi$  interactions and hydrogen bonding between RIF and biosorbents can be responsible for biosorption. As a result, it was stated that the removal efficiency depended on the type of polymer used for immobilization [39].

Nanoscale iron particles (Fe NPs) with large surface areas and high surface reactivity are next-generation environmental remediation technologies that can provide cost-effective solutions. Equally important, Fe NPs provide tremendous flexibility for in-situ applications and researches have shown that they are very effective to remove a wide variety of common environmental pollutants [40]. Lin et al. aimed to simultaneously removal of RIF and Pb(II) by Fe NPs produced using a green tea extract. The synthesized Fe NPs were mainly amorphous, suggesting that organic molecules from the green tea extract successfully combined with Fe NPs and covered the surface of Fe NPs. When the surface composition and elemental distribution of Fe NPs were examined, it was found that the original Fe NPs consisted only of C, O, and Fe, and after the reaction, an important new Pb element (15.1%) formed, consistent with the Pb(II) adsorption by the Fe NPs. Before exposure to pollutants, the exterior of the Fe NPs was relatively rough, and the nanoparticles were uniformly dispersed and exist in the form of chains. In contrast, after exposure to pollutants, Fe NPs showed a large amount of agglomeration and the morphology became coarser, which was associated with RIF and Pb(II) adsorbing to the Fe NPs surface. The specific surface area of Fe NPs was calculated as 37.3 m<sup>2</sup>/g (meso/macro porous). The adsorption of both Pb(II) and RIF by Fe NPs best fitted pseudo-second order kinetics in which the adsorption process was mainly by chemisorption. The probable mechanism of the simultaneous Pb(II) and RIF removal by Fe NPs was explained by the those two strategies: a) Pb(II) was adsorbed to the Fe NPs surface thanks to the natural

adsorption properties of iron oxides for metal ions, b) RIF and Pb(II) interacted more specifically with functional groups on the Fe NPs surface. As a result of experiments performed with real wastewater samples, it was determined that both pollutants were successfully removed (97.5% of Pb(II) and 68.8% of RIF) in a short time (20 min) by Fe NPs. Adsorbent reusability analysis suggested that even after 5 cycles, Fe NPs showed relatively high yields (52.3% of Pb(II) and 64.9% of RIF) and were highly reusable [41].

Green synthesized magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles by *Excoecaria cochinchinensis* extract were applied as a novel technology for RIF removal. The RIF adsorption efficiency of commercial Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and green synthesized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> were compared, and the removal efficiency of green synthesized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was found to be quite high, since the interaction between commercial Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and RIF is mild and unstable, coupled with simultaneous adsorption and desorption processes. SEM images showed that different shapes and particle sizes were formed by spherical nanoparticles agglomerated in diameter range of 20-30 nm. The zeta potentials of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> were determined in the solution pH range of 4-10, and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was found to be negatively charged at all solution pHs. The BET-specific surface area, a volume of pores and an average pore size of prepared Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was found to be 111.8 m<sup>2</sup>/g, 9.06 cm<sup>3</sup>/g and 6-7 nm, respectively. It was determined that the adsorbent dosage, temperature and initial pH parameters significantly affected the RIF removal efficiency. The increase in the adsorption rate with the increase in temperature showed that the adsorption process was endothermic. It was found that RIF removal increased when pH increased from 4 to 5.5, whereas it decreased when pH increased from 5.5 to 10. This was attributed to the fact that the pH change can remarkably affect the surface charge of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, and also RIF has two pKa. When the pH was higher than 5.5, the OH<sup>-</sup> concentration in the reaction system continued to rise, the negative charge on the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> surface increased. Therefore, the electrostatic adsorption was strongest at the 5.5 of pH and the RIF was zwitterion at this point. The interaction between RIF and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was predicted to inhibit or promote removal efficiency. The kinetic studies showed that the pseudo second-order model fitted for the adsorption process well and the Langmuir model was better to explain the adsorption of RIF by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. The calculated activation energy value (E<sub>a</sub>: 32.46 kJ/mol) showed that the adsorption process was mainly chemisorption. In the light of characterization and batch experiments, it was suggested that the adsorption mechanism of RIF on Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles can be electrostatic attraction and adsorption reaction between RIF and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> active surface sites. Reusability tests of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> for RIF adsorption showed that the removal efficiency dropped to 61.5% after five cycles. The application of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> for the removal of RIF from real wastewater samples was investigated and within 1 h 82.5% and 76.0% of RIF was removed from municipal and aquaculture wastewaters, respectively [27].

Various materials (graphene, iron-based materials, metal/metal oxide nanoparticles and modified metal composites, etc.) used in the removal of antibiotics have

some restrictions. For instance, graphene adsorbs the pollutant that can then become a secondary pollution source, metal/metal oxide NPs can release trace amounts of toxic heavy metals into the environment and iron-based materials tend to aggregate, all of which disrupts ecosystems. To overcome these limitations, the focus was on the production of non-agglomerated, non-toxic, modified iron-based materials for the removal of antibiotic contaminants such as RIF. Xu et al. prepared a hybrid RGO@Fe/Pd composite by one-step green synthesis using a green tea extract for RIF removal. The best conditions for the synthesis of RGO@Fe/Pd were determined as Fe/Pd: 100/5 and GO/Fe: 1/1. Characterization analyzes revealed that the elemental composition of RGO@Fe/Pd consisted of Pd (28.1%) and Fe (2.96%), and Fe on RGO@Fe/Pd was in an oxidized state while Pd was in the divalent (Pd<sup>2+</sup>) and zerovalent (Pd<sup>0</sup>) states. 96.1% RIF removal was achieved by RGO@Fe/Pd having a surface area of 48.14 m<sup>2</sup>/g. It was determined that RGO@Fe/Pd removed RIF by adsorption and reduction, and catechol and caffeine were the two main biomolecules involved in the reduction process [42]. In another study using RGO@Fe/Pd, parameters affecting RIF removal, adsorption and reduction kinetics, and RIF degradation mechanism were investigated. RGO@Fe/Pd dosage, initial RIF concentrations, pH and temperature were found to affect the removal process. It was determined that the removal efficiency increased when the pH was increased from 5 to 7, whereas the removal efficiency decreased by approximately 20% at pH 9. This difference in removal efficiencies was attributed to the fact that RIF has two different pKa. It was estimated that the removal efficiency was higher at pH 7 due to the negatively charged hybrid material, but decreased when RIF was negatively charged at pH 9. It was reported that rGO@Fe/Pd remained stable at relatively high temperatures and did not lose its functionality. Optimal isothermal adsorption parameters for RIF by rGO@Fe/Pd NPs demonstrated that the process comply with a Freundlich-type adsorption, pointing out that multilayer adsorption had occurred. However, it was suggested that since the pKa values of RIF are both between pH 1.7 and 7.9, RIF would have a double charge under experimental conditions and the adsorption process would use electrostatic attraction. The E<sub>a</sub> value was calculated 33.15 kJ/mol, proving that the adsorption occurred mainly by chemisorption. Adsorption and reduction kinetics showed that RIF followed a pseudo-second order model. A mechanism for RIF degradation based upon adsorption and catalytic reduction was proposed. It was determined that the RIF was reduced with nano iron, and nano palladium acted as a catalyst during this process. It was concluded that RIF degradation was incomplete and only converted to slightly smaller molecules, and therefore more studies are needed for complete degradation of RIF and to avoid exposure to intermediates of unknown toxicity. In addition, the practical removal yield of RIF in municipal sewage (58.1%) and aquaculture sewage water (71.9%) was successfully verified [43].

Xue et al. [44] prepared a hybrid bimetallic Fe/Ni nanoparticles and reduced graphene supported bimetallic Fe/Ni nanoparticles (Fe/Ni-rGO) and evaluated them for

simultaneous Pb and RIF removal. The removal efficiency of Fe/Ni-rGO was higher than rGO, nFe/Ni or Fe-rGO. Compared to the single pollutant systems (i.e. RIF or Pb(II) added in isolation), the removal of both RIF and Pb(II) in the mixed pollutant system were reduced. It was suggested that this was from competitive adsorption and reduction between RIF and Pb(II) in the mixed pollutant system. Exhaustive characterization and analysis of Fe/Ni-rGO showed that both Fe and Ni nanoparticles were evenly dispersed on the rGO surface, and the aggregation of Fe, Ni nanoparticles and stacking of rGO were reduced in the hybrid. LC-TOF-MS analysis demonstrated that RIF degraded to small-molecule fragments and the degradation process was incomplete. The adsorption of RIF was found to best fit a pseudo-second order kinetic model and the Freundlich isotherm model. It was proposed that the mechanism for simultaneous RIF and Pb(II) removal by Fe/Ni-rGO included surface adsorption on rGO followed by catalytic reduction of RIF by surface-coated Fe/Ni bimetallic nanoparticles. After 5 cycles, the removal of RIF by Fe/Ni-rGO decreased from 84.6% to 75.4%, confirming the good reusability of Fe/Ni-rGO.

Shafaati et al. synthesized chitosan/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> grafted graphene oxide (CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO) nanocomposite and used for RIF adsorption to evaluate its effectiveness. It was determined that the GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite consisted of oxygen (26.1%), carbon (6.8%), iron (65.9%) and nitrogen (1.8%). On this basis, the iron signal in the GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite was attributed to the presence of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and the nitrogen signal to the presence of CS. When the magnetic property of naked Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> composite was measured using a vibrating sample magnetometer at room temperature, the magnetic saturation (Ms) of GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was 49.8 emu/g, which was lower than that of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (57.6 emu/g). This decrease was associated with the relatively smaller particle size of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particles in naked Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and the quenching of the magnetic moment by the interaction between the CS and GO coating layers and the surface of the Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> particles. BET surface area, average pore diameter, pore volume, and pH<sub>PZC</sub> of GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> was calculated 96.14 m<sup>2</sup>/g, 8.1248 nm, 0.1953 cm<sup>3</sup>/g and 5, respectively. The effects of experimental parameters on adsorption efficiency were investigated by batch experiments. With an increase in solution pH from 3 to 5, both the the removal efficiency and adsorption capacity improved and reached the maximum, which can be explained by increase in the electrostatic interaction between the RIF<sup>±</sup> zwitterions and the positively charged surface of the adsorbent. On the other hand, it was reported that with a greater increase of pH from 6 to 9, the adsorption capacity and RIF removal was significantly reduced due to the electrostatic repulsion between RIF<sup>-</sup> and the negatively charged adsorbent surface, which inhibited adsorption of RIF. However, it was suggested that adsorption of RIF can occur through hydrophobic interactions, and the  $\pi$ - $\pi$  stacking interaction between the aromatic rings of RIF and the delocalized- $\pi$  electron systems of GO on GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. The increase of removal efficiency with increased temperature was ascribed to the increase in the diffusion rate of RIF molecules to the inner GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> pores and

the boundary layer, and to the decrease in fluid viscosity facilitating the motion of RIF molecules towards the active adsorbent sites. It was determined that the increase in sodium chloride (NaCl) concentration, which was used to examine the effect of ionic strength on RIF adsorption, decreased the efficiency of RIF removal. It was stated that this was due to the fact that Cl<sup>-</sup> ions was probably in competition with RIF ions to occupy the available adsorption sites. RIF adsorption on GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> showed the highest fit with the second-order kinetic model and the Langmuir isotherm model. Thermodynamic studies have exhibited the endothermic and spontaneous nature of RIF adsorption. GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> showed satisfactory regeneration performance with high removal efficiency (> 70%) after seven cycles of adsorption-desorption. In addition, real water samples to research the practical use of GO/CS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> to adsorb RIF in contaminated waters were used as models in adsorption tests without pretreatment, and it was concluded that the groundwater matrix did not have a important effect on the adsorption process [10].

Abbasi et al. [45] investigated the uptake and release properties of RIF by ultrasound-assisted synthesized Cu-BTC nanoparticles, by comparing them with activated carbon and bulk Cu-BTC. It was determined that the amount of RIF adsorbed on nano Cu-BTC was much higher than that on bulk Cu-BTC and activated carbon. It was clearly verified that when XRPD models were investigated to confirm the crystal structure of the adsorbent, the Cu-MOF particles were successfully prepared by ultrasound irradiation. Silva et al. [46] synthesized MgFe Layer Double Hydroxides (LDH) by co-precipitation, ultrasound irradiation, hydrothermal and microwave methods. Considering the synthesis time, crystallinity, surface area, volume and diameter of the pores, and the percent removal of RIF, the ultrasound followed by hydrothermal (U-H) method was found to be the best material among the synthesis methods. In another study, green nanoemulsion (GNE) multiple components (N1-N5) were used to remove RIF from contaminated aqueous bulk solution. The highest removal efficiency value (91.7%) was obtained with NF5 in correlation with the lowest size (maximum surface area available for contact adsorption) value (~39 nm), polydispersity index (0.112) and viscosity (82 cP) [47].

As can be seen from the above-mentioned data, the different adsorbents used for the adsorption of RIF have been quite successful. The most studied adsorbents for RIF adsorption were nanoparticles, activated carbons, and hybrid materials consisting of carbonaceous and metal-based materials. The results of the researchers' studies demonstrated that the characteristics of the adsorbent (surface area, pore diameter, pore volume, pH<sub>PZC</sub>, etc.), the physicochemical properties of RIF (e.g., pKa) and operating parameters of process (temperature, pH, etc.) affect the RIF removal. The main adsorption mechanisms were hydrogen bonding, electrostatic attraction/interaction and  $\pi$ - $\pi$  interaction. However, no information was given on the disposal of the used adsorbents after application. Table 2 and Table 3 provides a comparison of different adsorbents reported for RIF removal in the literature.

Table 2. Comparison of different adsorbents reported for RIF removal in the literature.

Adsorbent	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	Conditions	Removal (%)	Isotherms	Kinetics	Adsorption capacity (mg/g)	Ref.
GO/CS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanocomposite	96.14	RIF: 20 mg/L, GO/CS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> : 0.5 g/L, pH: 5, 55 °C, 75 min	95	Langmuir	Pseudo-second order model	102.11	[10]
Calcined <i>Mytella falcata</i> shells	-	RIF: 100 mg/L, biosorbent: 0.2 g, 30 °C, pH: 13, 30-45 min	96	Redlich-Peterson model	The pseudo-first order model	≈10	[21]
Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	111.8	RIF: 20 M, nanoFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 10 mg, pH: 5.5, 30 °C, 90 min	98.4	Langmuir	Pseudo-second order model	84.80	[27]
Activated Carbon from Vine Shoots	1689	RIF: 500 mg/L, AC: 5 g/L, pH: 7, 25 °C, 30 min	88	Langmuir	-	476.2	[37]
Activated carbon cocoa shells (ACCS)	-	RIF: 10 mg/L, ACCS: 0.3 g/L, pH: 6, 20 °C, 120 min	80	Freundlich	Pseudo n-order model	26.66	[38]
Biosorbents (SC-C-2.5%) (SP-C-2.5%)	-	RIF: 50 mg/L, Biosorbents: 1g/25 mL, pH: 6, 12 h, ambient temperature	-	-	-	24.70 (SC-C-2.5%), 24.89 (SP-C-2.5%)	[39]
Fe-NPs	37.3	RIF: 50 mg/L, Fe-NPs: 0.5 g/L, pH: 3-5, 20-40 °C, 120 min	91.6	Freundlich	Pseudo-second order model	107.70	[41]
rGO@Fe/Pd	48.14	RIF: 20 mg/L, rGO@Fe/Pd: 0.2 g/L, pH: 7, 30 °C, 20 min	96.1	-	-	-	[42]
rGO@nFe/Pd	-	RIF: 20 mg/L, rGO@Fe/Pd: 0.2 g/L, pH: 7, 30 °C, 20 min	89	Freundlich	Pseudo-second order model	90.9	[43]
Fe/Ni-rGO	-	RIF: 50 mg/L, Fe/Ni-rGO: 1.6 g/L, pH: 5.1, 30 °C, 180 min	96.8	Freundlich	Pseudo-second order model	27.92	[44]
Cu-BTC MOF	376.4	RIF: 0.17 mmol, Cu-BTC: 13 mg/50 mL, 48 h	-	-	-	42.15	[45]
MgFe/LDH	82.1 (U-H) 75.1 (M-H)	RIF: 0.05 mg/L, MgFe/LDH: 5 g/L, 24 h	82.7 (U-H) 82.5 (M-H)	-	-	9.33 (U-H) 9.16 (M-H)	[46]

Table 3. Thermodynamic parameters for rifampicin adsorption reported for RIF removal in the literature.

Adsorbent	Temperature (°C)	ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (kJ/mol)	Ref.
GO/CS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> nanocomposite	25	-13.41	18.63	0.107	[10]
	35	-14.48			
	45	-15.56			
	55	-16.63			
Calcined <i>Mytella falcata</i> shell	30	-29.28	1.65	-1.101	[21]
	40	-29.59			
	50	-31.32			
	60	-32.1			
Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20	-7.853	43.810	0.177	[27]
	25	-9.463			
	30	-10.420			
	35	-10.977			
	40	-11.490			
Activated carbon cocoa shells (ACCS)	20	-6.46	-13.74	-7.43	[38]
	30	-5.80			
	40	-5.87			
	50	-5.61			

Adsorbent	Temperature (°C)	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta H^\circ$ (kJ/mol)	$\Delta S^\circ$ (kJ/mol)	Ref.
Fe NPs	20	-3.35	23.08	0.081	[41]
	30	-4.62			
	40	-6.56			
rGO@nFe/Pd	20	-4.36	17.77	0.075	[43]
	30	-4.59			
	40	-5.88			

### Advanced Oxidation Processes

Advanced oxidation processes (AOPs) were first proposed for drinking water treatment in the 1980s and then extensively studied for the treatment of different wastewaters. During the AOP treatment of wastewater, free radicals are generated to remove refractory organic matter, traceable organic pollutants or particular inorganic pollutants, or to increase biodegradability of wastewater as a pretreatment before the next biological treatment [48]. Free radical species (e.g., hydroxyl radicals ( $\bullet\text{OH}$ ), sulfate radicals ( $\text{SO}_4^{\bullet-}$ ), singlet oxygen ( $^1\text{O}_2$ ), and superoxide radicals ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ )) are atoms or molecules that can exist independently and have one or more unpaired electrons [49]. AOPs are characterized by a diversity of radical reactions involving combinations of auxiliary energy sources (e.g., electronic current, ultraviolet-visible (UV-Vis) radiation, ultrasound and  $\gamma$ -radiation) and chemical agents (e.g., hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), transition metals, ozone ( $\text{O}_3$ ) and metal oxides).  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ,  $\text{O}_3/\text{UV}$ ,  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ , Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ), photo- and electro-Fenton, chelating agent supported Fenton/photo-Fenton,  $\gamma$ -radiolysis, heterogeneous photooxidation with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2/h\nu$ ) and sonolysis processes are examples of AOPs (Figure 2) [50, 51].

In 1987, Glaze et al. have coined the term AOPs established on the in-situ production of a strong oxidizing agent such as  $\bullet\text{OH}$  at a adequate concentration to efficiently purify water for water treatment processes carried out at room temperature.  $\bullet\text{OH}$  is one of the most reactive free radicals and the strongest oxidants (2.80 V) which has a reaction rate of  $10^6\text{-}10^{10} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  and can react with various organic molecular groups. The most frequent reactions of  $\bullet\text{OH}$  with organic pollutants are a substitution of aromatic rings, an addition to unsaturated carbon-carbon bonds, abstraction of the hydrogen atom from the target molecule, or mono-electronic oxidation [52]. In recent years, sulfate radical-based AOPs (SR-AOPs) have been frequently studied to degrade organic pollutants as they overcome some of the shortcomings of  $\bullet\text{OH}$  radical-based AOPs.  $\text{SO}_4^{\bullet-}$  is a strong single-electron oxidant with a high oxidation potential ( $E_0 = 2.5\text{-}3.1 \text{ V}$ ) and a longer life ( $t_{1/2} = 30\text{-}40 \mu\text{s}$ ) allowing excellent electron transfer and contact with target pollutants. In addition, it can selectively react with unsaturated or aromatic compounds over a wide pH range, such as 2-8 [53].  $\text{SO}_4^{\bullet-}$  radicals are generated via the activation of peroxymonosulphate (PMS,  $\text{HSO}_5^-$ ) or persulfate (PS,  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ). The direct reaction of PMS/PS

with organic pollutants takes place at a very low rate. Therefore, PMS/PS must be activated to form  $\text{SO}_4^{\bullet-}$  and can be activated by various methods such as heat, UV, alkali, transition metals ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  ve  $\text{Ag}^+$ ) and carbonaceous materials (e.g., activated carbon) [54]. In this section, the different AOPs studied by various researchers for the RIF degradation were reviewed and a summary of these studies reported were presented. Table 4 compares the results of these studies.

AOPs are carried out either in the presence of catalysts (catalytic processes) or in the absence of catalysts (non-catalytic processes). Catalysts increase the cavitation effect and the rate of decomposition of organic molecules [55]. Tahvildari et al. [56] used metallic catalysts consisting of zinc (Zn) and copper (Cu) to remove RIF from pharmaceutical wastewaters. Parameters such as total zinc and copper catalyst amount, ratio of catalysts, reaction time, rotation speed, temperature and pH were investigated. As a result, it was found that 96.4% of RIF could be removed from synthetic RIF solutions and real wastewater with 70% zinc and 30% copper at 600 rpm for 120 min, neutral pH and ambient temperature ( $25^\circ\text{C}$ ). It was concluded that RIF was removed by the oxidation process and adsorption did not occur. It was found that the catalysts could be used repeatedly to remove RIF from wastewater. Madivoli et al. [57] synthesized spherical  $\text{TiO}_2$  microspheres by the sol-gel method and investigated for their ability to degrade RIF. When morphology and the size of  $\text{TiO}_2$  microspheres were examined by SEM, it was observed that the sizes of the synthesized particles were spherical, varying between 200-2000 nm, and these particles were well dispersed with the absence of aggregates or agglomerates, which was an indicator that the method used was effective for synthesis of microspheres. Degradation of RIF in acidic, neutral and basic medium by microspheres also demonstrated that the antibiotic degradation was pH dependent. The percentage of degradation was higher at pH 12 than at pH 3 and 6.5, and was calculated as 57.6% for pH 3, 62.9% for pH 6.5 and 63.8% for pH 12. However, the degradation rate was higher in acidic medium than in neutral and basic medium. In addition, the existence of  $\text{H}_2\text{O}_2$  increased the degradation efficiency due to the formation of  $\bullet\text{OH}$  radicals that help the antibiotic degradation and process followed the first-order reaction pattern.



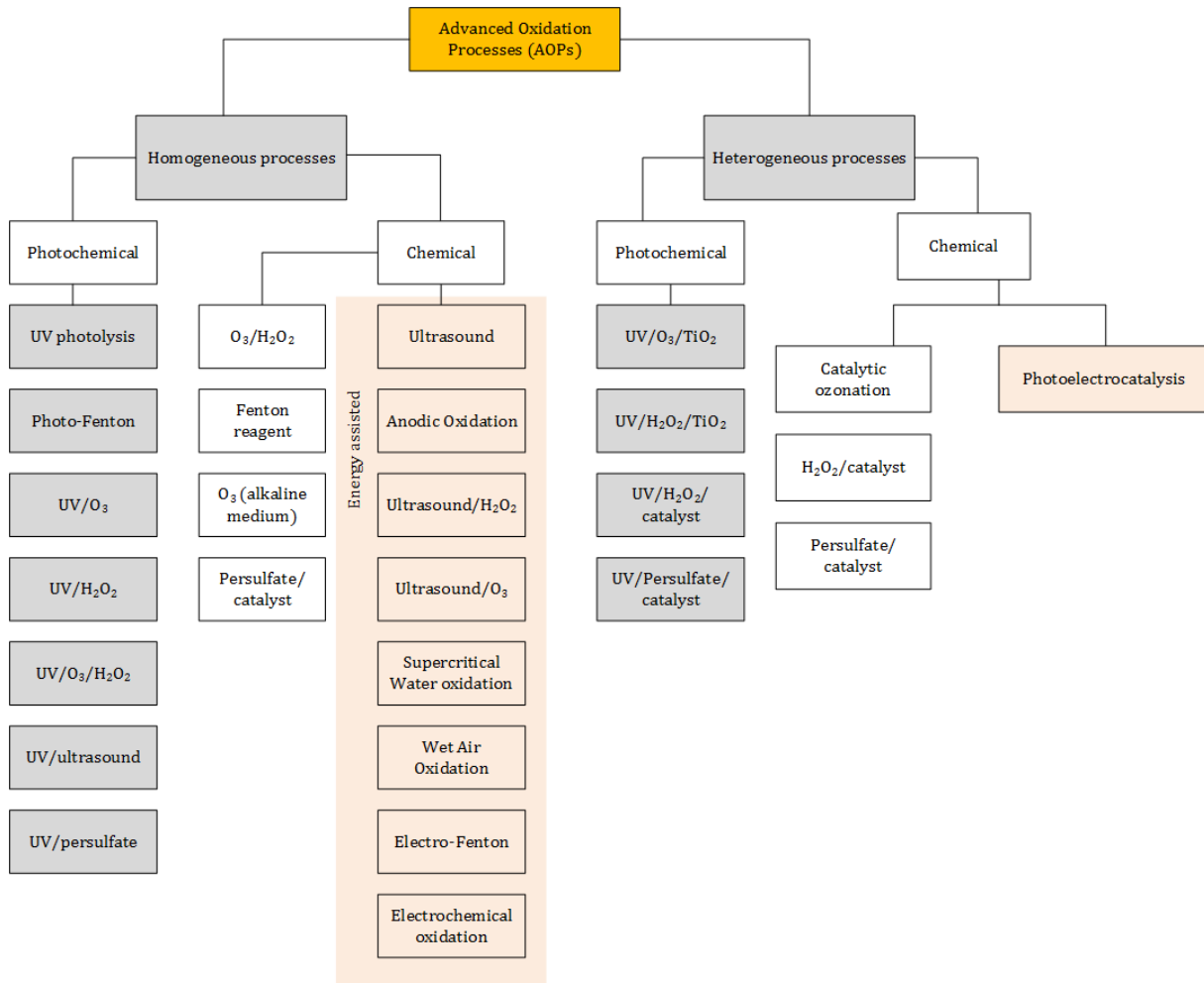


Figure 2. Classification of different treatments based on AOPs [51].

*Sonochemical degradation (sonolysis)*, degradation that is driven or enhanced by sonication, emerged in the 1990s. Ultrasound (US) is sound that exceeds the range of human hearing and has a wide frequency range between 18 kHz and 500 MHz. Ultrasonic propagation with cycles of compression and rarefaction leads to the phenomenon of acoustic cavitation, described as a sonochemical source. Such a large number of cavitation bubbles are also called microreactors as they act as centers of chemical reactions. The cavitation bubbles filled with gas grow and burst extensively under the positive pressure that occurs during the compression cycle of US in water bulk. Meantime, enormous local temperatures (ca. 5000 K) and high pressures (ca. 500 atm), micro jets and shock waves are produced. Then, reactive oxygen species (ROS) are produced by the pyrolysis of water molecules in the collapsing bubbles (hotspots) and oxidizes the substrates in the water. Furthermore, hydrophobic volatile compounds also undergo thermal decomposition in hotspots, and both of the above actions contribute to the degradation of organic pollutants. Theoretically, sonication is capable of degradation a wide range of organic pollutants without added chemicals. Therefore, sonication is frequently considered as a green and safe method for treatment of

wastewaters. However, sonolysis of organic pollutants has limited efficiency and consumes significant energy. Sonocatalysis, Sono/Fenton, sonication-ozonation (Sonozonation), sonophotocatalysis (Sono/Photo), sonication-persulfate (Sono/PS), sonoelectrochemical degradation, sonication-microwaves, sonication-hydrodynamic cavitation and sonication-based combinations such as ultrasound-assisted biological processes have attracted great interest to improve removal efficiency and reduce energy consumption (Figure 3) [58].

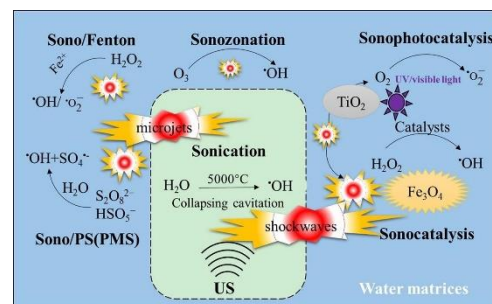


Figure 3. Sonication-involved processes in water matrices (US: ultrasound, PS: peroxydisulfate, PMS: peroxymonosulfate) [58].

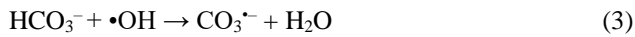
Afrozān Bāzghale and Mohammad-Khāh [59] studied the sonocatalytic RIF removal with nitrogen-doped zinc oxide/graphene oxide hybrid nanocomposite (N:ZnO/GO). This study demonstrated the adequacy of RIF removal (95% at optimum condition) with N:ZnO(0.2 M)/GO in the presence of US. Dumping tests revealed that  $\bullet\text{OH}$ ,  $\text{O}_2^{\cdot-}$  ve  $\text{h}^+$  species play a significant role in the sonocatalytic RIF degradation. For the sonocatalytic degradation of RIF by N:ZnO(0.2 M)/GO, the proposed mechanism was explained as follows: On the one hand, excited electrons in the less positive conduction band (CB) of N:ZnO move to the more positive valence band (VB) of GO and then it reaches the electrons in the CB, and then the electrons in the CB of N:ZnO and the holes in the VB of GO are combined. On the other hand, electrons aggregated in CB of GO and holes in VB of N-doped ZnO can participate in oxidation and reduction reactions. In fact, electrons in the CB of GO can react with and reduce the absorbed molecular oxygen since these electrons have more negative potential than  $\text{O}_2/\text{O}_2^{\cdot-}$  (-0.3 eV). Moreover, the holes formed in the valence band of ZnO have more positive potential to generate a large number of active OH with high oxidizing ability from water or hydroxyl molecules absorbed from the surface. TOC analysis performed under optimized conditions to investigate the mineralization of the contaminants indicated 80.8% mineralization of RIF after degradation of RIF by N:ZnO(0.2 M)/GO for 60 min. Khataee et al. [60] synthesized  $\text{ZrO}_2$ -pumice and  $\text{ZrO}_2$ -tuff nanocomposites by a modified sol-gel method and used them as catalysts for the sonocatalytic degradation of RIF. After characterization studies, it was found that zirconia NPs were immobilized on the surface of pumice and tuff samples without aggregation. BET surface area and pore volume of  $\text{ZrO}_2$ -pumice and  $\text{ZrO}_2$ -tuff nanocomposites were determined higher than that of pure pumice and tuff sample (5.87 m<sup>2</sup>/g and 1.35 cm<sup>3</sup>/g for  $\text{ZrO}_2$ -pumice and 1.16 m<sup>2</sup>/g and 0.27 cm<sup>3</sup>/g for  $\text{ZrO}_2$ -tuff, respectively). It was suggested that these differences can be related to the presence of nano- $\text{ZrO}_2$  particles on the modified samples. The analysis results demonstrated that  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  of tuff (7.7) and pumice (7.3) were higher than those of  $\text{ZrO}_2$ -tuff (6.4) and  $\text{ZrO}_2$ -pumice (6.5). It was reported that the lower  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  of the catalysts than that of pumice and tuff can be due to the low  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  (about 5) of the  $\text{ZrO}_2$  NPs immobilized on the catalyst surface. It was observed that the degradation efficiency of RIF depended on the initial concentration, dose of catalyst, pH value and ultrasonic power and increased with the addition of enhancers (hydrogen peroxide and potassium persulfate) and different gases ( $\text{Ar} > \text{O}_2 > \text{air}$ ). It was found that 67.3% COD and 53.8% TOC were removed after 90 min degradation of RIF by the US/ $\text{ZrO}_2$ -pumice process. Scavenging experiments revealed that  $\bullet\text{OH}$  radicals were the predominant reactive species responsible for RIF degradation. After five runs, 86.7% and 77.8% of RIF were still degraded by the US/ $\text{ZrO}_2$ -pumice and US/ $\text{ZrO}_2$ -tuff treatments, proving the stability of both catalysts.

The IUPAC defines *photocatalysis* as “change in the rate of a chemical reaction or its initiation on exposure to ultraviolet, visible or infrared radiation in the presence of a substance, the photocatalyst that absorbs light quanta and is

involved in the chemical transformation of the reaction partners” [61]. Photocatalytic oxidation of organic pollutants was very effective in wastewater treatment due to its advantages such as complete mineralization of substrate and intermediates, operating conditions (ambient temperature and pressure), disposal of solid waste without problems, use of sunlight, visible light or near-UV light for irradiation and cost efficiency. Photocatalysis is a process in which reactive species such as  $\bullet\text{OH}$  required for the redox are produced upon the catalyst activation by photons. It is considered a very significant technology for solving environmental and energy problems. Two types of photocatalysis are used for the mineralization of organic pollutants in wastewater: homogeneous photocatalysis (e.g., photon-Fenton) and heterogeneous photocatalysis (e.g., solid semiconductors such as  $\text{WO}_3$ , ZnO and  $\text{TiO}_2$ ) [62]. Heterogeneous photocatalysis refers to a type of catalytic reaction related to various fields including oxidation, hydrogen transfer, dehydrogenation, metal reduction, removal of gaseous pollutants and  $\text{H}_2\text{O}$  detoxification. The classical heterogeneous photocatalysis mechanism usually involves a series of oxidation and reduction reactions on the surface of a semiconductor. The entire process of removing various contaminants can be divided into five steps: (a) Photocatalytic reactions begin with the adsorption of the target substrate onto the photocatalyst surface from the surrounding medium; (b) absorption of light with photon energy greater than the band gap (BG) energy of the photocatalyst and production of photogenerated electron ( $\text{e}^-$ ) - hole ( $\text{h}^+$ ) pairs in bulk phase; (c) migration of  $\text{e}^-$  and  $\text{h}^+$  to the surface of the photocatalyst to participate in the redox reaction and simultaneously, recombination of some photogenerated carriers from the surface and the inside of the photocatalyst; (d) oxidation and reduction of  $\text{H}_2\text{O}$  molecules and  $\text{O}_2$  adsorbed on the surface of the photocatalyst to  $\bullet\text{OH}$  and  $\text{O}_2^{\cdot-}$  by  $\text{h}^+$  in the valence band and  $\text{e}^-$  in the conduction band, respectively. At the same time, pollutants can be reduced to small molecules (e.g.,  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$ ); and (e) degraded small molecules are desorbed from the interface into the bulk solution and the photoreaction continues [63]. Gao et al. [14] investigated the photocatalytic degradation of RIF on  $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  under visible light irradiation and achieved complete RIF degradation within 90 min. In their studies, they determined that the main ROS was  $\text{O}_2^{\cdot-}$  and the minor ROS was  $\bullet\text{OH}$ . The photocatalytic degradation pathway of RIF was proposed. It was stated that the main transformation process for RIF was detachment of the nitrogenous ring via cleavage of the N-N bond, cleavage of nitrogen-bearing heterocycles starting from the C-N bond, demethylation, detachment of acetoxyl group, acetyl and methoxyl. During the 180 min photocatalytic degradation of RIF, 34 kinds of intermediates were detected. Thereinto, it was reported that 21 kinds of intermediates were completely decomposed and then reduced to simpler compounds, and other 13 kinds of products remained as the final product in the reaction mixture after 180 min of photocatalytic reaction.

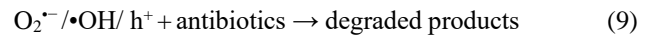
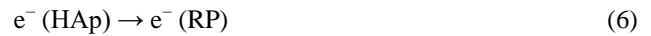
Kais et al. [64] investigated the photocatalytic degradation of RIF in aqueous solution under solar irradiation using ZnO as a photocatalyst. Since the removal of RIF by

adsorption on ZnO or photolysis was weak and did not exceed 4%, the heterogeneous photocatalysis process under solar radiation was applied for RIF removal. ZnO dosage, initial RIF concentration and pH were found to be important factors, and the  $pH_{PZC}$  of ZnO was 7.46. With the addition of salts (200 mg/L) to the reaction solution, it was determined that  $SO_4^{2-}$  and  $HCO_3^-$  negatively affected the process, while  $Cl^-$  increased the degradation of RIF. It was suggested that  $SO_4^{2-}$  significantly reduced the rate constant following affinity, which causes their fixation on the ZnO surface and the formation of  $SO_4^{\bullet-}$  or  $\bullet OH$  species according to the reactions in Equations 1-2. In the case of  $HCO_3^-$ , the inhibitory effect was explained possibly by the consumption of  $\bullet OH$  groups involved in RIF degradation (Equation 3). However, it was stated that the addition of NaCl facilitates the degradation of RIF due to the production of  $Cl^{\bullet}$ , which has strong oxidizing power (Equation 4). The Langmuir-Hinshelwood model was used in the kinetic study. It was observed that the active species responsible for photocatalytic degradation on ZnO under solar radiation were  $\bullet OH$ , photon electrons and  $O_2^{\bullet-}$ , respectively.



Soleimani and Nezamzadeh-Ejehieh [65] used a coupled CdS-ZnS system as a photocatalyst for the removal of RIF from an aqueous solution. Cubic ZnS structure and hexagonal CdS structure with a crystallite size of 10 nm were determined from XRD models. It was observed that the coupled ZnS-CdS system had better photocatalytic activity than the single systems, and the best activity was obtained when the moles of CdS were 6 times higher than the ZnS component. When the effects of some scavenging agents were examined to evaluate the importance of the reactive species produced by the coupled ZnS-CdS catalyst for RIF photodegradation, it was concluded that superoxide radicals and photogenerated electrons have a relatively higher role in RIF photodegradation, followed by  $\bullet OH$  and finally the photogenerated holes. The mechanism pathway for RIF photodegradation was proposed, and some intermediates (acetic acid, butyramide, formamide, 3-penten-1-ol) was reported in the final mineralization. The reusability of the coupled CdS-ZnS catalyst in RIF photodegradation was investigated in 5 consecutive runs. The degradation activities after 5 runs for the calcination temperature of 100 and 200°C were calculated as 75 and 85%, respectively, confirming that the coupled CdS-ZnS catalyst has relatively high stability for 2 h photodegradation process. Zou et al. [66] synthesized a new and green red phosphorus (5.0 wt%)/hollow hydroxyapatite microsphere (RP (5.0 wt%)/HAp) photocatalyst in RIF degradation. RP particles were immobilized on the surface of hollow HAp microspheres. The BET specific surface

area of RP (5.0 wt%)/HAp (60.3 m<sup>2</sup>/g) was calculated to be much higher than that of hollow HAp microspheres (44.2 m<sup>2</sup>/g). The photocatalytic activity of the RP (5.0 wt%)/HAp composite was no significant change even after three runs, thus demonstrating its good recyclability in the degradation of RIF.  $O_2^{\bullet-}$ ,  $\bullet OH$ , and  $h^+$  were determined to be the dominant active species in the photocatalytic process. Based on the experimental results, a reasonable degradation pathway was suggested and the possible photocatalytic equations were expressed as follows (Equations 5-9):



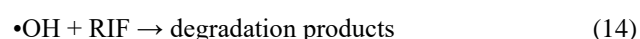
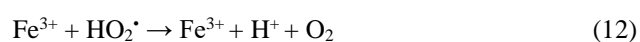
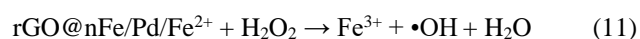
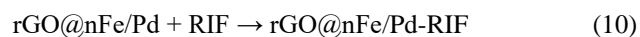
In a research, the new photocatalytic TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash was used for decomposition of RIF. As a result of the experiments, it was determined that the RIF separation efficiency of TiO<sub>2</sub>/Nd and TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash within 90 min under sunlight reached approximately 86% and 75%, respectively. Despite its lower yield, TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash was chosen to decompose RIF residue in water under sunlight by photocatalytic treatment, since this material has some advantages such as less amount needed and easy recovery. In the RIF removal process, k values were found to fit zero and first-order kinetics more. BET surface areas of nano TiO<sub>2</sub>/Nd and TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash materials were determined as 58.97 and 107 m<sup>2</sup>/g, respectively. TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash size was also much larger than the nano TiO<sub>2</sub>/Nd particle size. It was suggested that because RIF has bulky molecular structure with many functional groups (-OH, >NH, >C=O etc.), it can easily bond with metals of adsorbents [67].

*Electrochemical technologies* have become very important around the world due to increasing drinking water supply standards and strict environmental regulations regarding wastewater discharge [68]. Electrochemical oxidation is a process in which organic matter is oxidized and converted or decomposed to non-toxic and harmless substances under the action of an electric current [69]. Electrochemical treatment is interesting processes using an effective, versatile, cost-effective, easy and clean technology for the removal of toxic organic compounds. In electrochemical processes, oxidation takes place on anodes (graphite, TiO<sub>2</sub>, Ti-based alloys, Ru or Ir oxides, boron-doped diamond (BDD) etc.) in the presence of an electrolyte [6]. Oxidation of organic pollutants in an electrolytic cell occurs in two different ways: (a) direct electron transfer to the anode and (b) indirect oxidation with heterogeneous ROS formed from water discharge at the anode, such as physisorbed radical  $\bullet OH$  or chemisorbed "active oxygen" [70]. Brito et al. used different anodes (boron doped diamond (BDD), PbO<sub>2</sub> and Pt) and cathodes (carbon felt (CF), stainless steel (SS),

graphite (Gr) and titanium (Ti)) for the electrochemical treatment of a synthetic wastewater and different real water matrices contaminated with RIF. The effects on the exchange of applied current density ( $j$ ) and supporting electrolyte during RIF degradation were investigated. At the end of their studies, it was seen that the process performance increased with an increase in  $j$  and better RIF degradation results were obtained by CF and BDD as cathode and anode, respectively. The greater performance of BDD as an anode was attributed to the high  $\bullet\text{OH}$  production on its surface through water discharge, a prominent feature of this electrode type, which was thought to be inactive. It was noted that since  $\bullet\text{OH}$  did not strongly adsorb on the BDD electrode surface, it was relatively free, and was suitable for degradation of RIF and its byproducts. It was reported that the better efficiency of the CF cathode was due to its specific properties, such as high reactive surface area, porosity, high active sites, its ability to respond to the organic pollutant degradation in terms of electro-reduction, and its ability to produce hydrogen peroxide, which is a weak oxidant. 100% color removal was achieved in all applied  $j$ , but complete organic matter (chemical oxygen demand (COD)) removal was achieved only at higher  $j$ . For a selected cathode, the efficiency of the anode materials followed the trends  $\text{BDD} > \text{PbO}_2 > \text{Pt}$ , while the efficiency of the cathode for a selected anode material was  $\text{CF} > \text{Ti} > \text{SS} \approx \text{Gr}$ . By using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  or  $\text{NaCl}$ , the production of strong secondary oxidant species was supported. When the BDD/CF electrochemical cell for different real water samples was used, the drug degradation and mineralization were found to be independent of this parameter.  $\bullet\text{OH}$  was also found to oxidize dissolved organic matter in synthetic wastewater and real water matrices. It was determined that the end-products of RIF degradation were acetic, oxalic, fumaric and maleic acids [71].

Easy to handle and operate, *Fenton systems* can be used to remove micro-pollution caused by residual pharmaceuticals. Fenton oxidation can be performed in homogeneous or heterogeneous systems, the former being the most used to date. Homogeneous oxidation with Fenton's reagent occurs from a hydrogen peroxide solution and an iron salt catalyst (iron (II) or iron (III) ions) via a free radical chain reaction generated  $\bullet\text{OH}$  in acidic medium [6, 72, 73]. Basically, Fenton reactions are based on electron transfer between  $\text{H}_2\text{O}_2$  and  $\text{Fe}^{2+}$ . Both  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{H}_2\text{O}_2$  do not oxidize target compounds directly, but act as catalysts synergistically in Fenton oxidation. Acting as a predominant reducer of  $\text{H}_2\text{O}_2$ , metal ions activate  $\text{H}_2\text{O}_2$  dissociation to form  $\bullet\text{OH}$  radicals [74]. Liu et al. [22] synthesized reduced graphene oxide combined with bimetallic iron/palladium nanoparticles ( $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$ ) via a green tea extract and used it to remove RIF from aqueous solution. When the composite and Fenton oxidation were combined, the RIF removal increased from 79.9 to 85.7%. The pseudo-second order kinetic model was found to be more fitting to remove RIF by adsorption and Fenton oxidation. Fenton oxidation degradation of RIF by  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  was indicated as a surface-controlled reaction ( $E_a$ : 47.3 kJ/mol). Temperature,  $\text{H}_2\text{O}_2$  dose,  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  dose, initial RIF concentration and pH were found to affect

RIF removal. The surface area, pore volume and pore size of  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  before adsorption was 29.43  $\text{m}^2/\text{g}$ , 0.128  $\text{cm}^3/\text{g}$  and 17.36 nm, respectively. After adsorption, the surface area (1.16  $\text{m}^2/\text{g}$ ) and pore volume (0.082  $\text{cm}^3/\text{g}$ ) decreased, while the pore size (281.40 nm) increased significantly, mainly due to the adsorption of RIF on the surface of  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  and to blocking of pores. In addition, after adsorption and Fenton oxidation, the surface area and pore volume of  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  increased to 13.76  $\text{m}^2/\text{g}$  and 0.253  $\text{cm}^3/\text{g}$ , respectively, while its pore size decreased to 73.60 nm. This was attributed to the degradation of RIF on  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  by  $\bullet\text{OH}$ , resulting in consequently eluted any pore-blocking materials and changes in the material's surface chemistry causing deactivation of the adsorption sites. Therefore, some RIF was desorbed into the solution. It was suggested that in the initial stages of RIF removal, RIF is mainly removed by adsorption and Fenton oxidation, while in the later removal stages it is mainly removed by Fenton oxidation. The dissolved iron concentration increasing with the reaction in solution was attributed to the continuous iron leaching from  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$ . In the light of the analysis results and experimental data, it was concluded that the removal mechanism of RIF by  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  was a combination of adsorption and Fenton oxidation (Equations 10-14). In addition, it was found that the RIF removal efficiencies of the composite material for river, aquaculture and domestic wastewater were 80.4, 77.9 and 70.2%, respectively. Reusability experiments of  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  was shown that even after five cycles,  $\text{rGO}@n\text{Fe}/\text{Pd}$  still had a relatively high removal efficiency (71.7%).



Although the treatment of pharmaceuticals widely accomplished by single AOP methods, *hybrid AOP methods* have also received remarkable attention. Compared to single AOP, the removal efficiency of pharmaceuticals has increased due to the increase in the amount of reactive species produced synergistic effect and better mineralization in hybrid systems. To maximize degradation efficiency in these systems, active pharmaceutical ingredients from real or synthetic wastewater are removed either sequentially or simultaneously [75]. Duarte et al. [15] compared the performance of Fenton reaction, electrochemical treatment and combined treatment processes for the removal of synthetic wastewater containing RIF. Regarding the studied electrode materials, it was determined that the RIF degradation efficiency decreased in the order of  $\text{BDD} \gg \text{Ti}/\text{Pt} > \text{Ti}/\text{Ru}_{0.3}\text{Ti}_{0.7}\text{O}_2$  (DSA, Dimensionally stable anode). Higher efficiency of BDD was attributed to

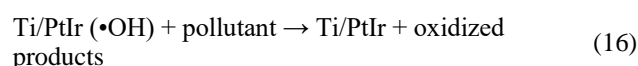
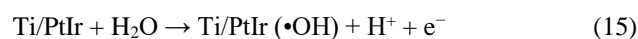
the high amount of free hydroxyl radicals produced by BDD, which promoted significantly degradation/mineralization of organic substrates more efficiently than the  $\text{RuO}_{(x+1)}$  and  $\text{PtO}_{(x+1)}$  species formed on Ti/Pt and Ti/Ru<sub>0.3</sub>Ti<sub>0.7</sub>O<sub>2</sub> surfaces. It was also suggested that persulfate could be produced electrochemically at the BDD anode, which contributed to the pollutant oxidation. When the results from removal of RIF-containing synthetic wastewater by electrooxidation were compared with the Fenton reaction, the Fenton reaction was found to be efficient because at 20 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration, RIF absorbance and COD were reduced by approximately 91% and 79%, respectively. When BDD electrolysis was studied by applying 90mA/cm<sup>2</sup>, approximately 95% of RIF absorbance and 81% of COD were removed. However, it took a shorter time (40 min) for effluent treatment by Fenton reaction compared to BDD-electrolysis. Both the electrochemical process and the Fenton reaction did not fully mineralize the RIF. Under the optimum conditions of the electrochemical process and the Fenton reaction, 19 and 21% of the COD remained in solution, respectively, as resistant intermediates were likely formed during the processes. The combined process (electrochemical treatment + Fenton reaction) was used to increase the efficiency of RIF removal in the purification. The results clearly showed that no significant improvement was made when both technologies were combined. However, a remarkable increase in reaction efficiency was observed in the use of BDD when H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> was added to the electrochemical process.

Stets et al. [76] evaluated the degradation efficiency of photo-assisted AOPs (UV/TiO<sub>2</sub>, UV/ZnO, homogeneous and heterogeneous Fenton and photo-Fenton processes) using RIF as the target pollutant. As a result of the experiments, it was found that approximately 95% of RIF were removed in 60 min by UV-A TiO<sub>2</sub>-photocatalysis under optimized conditions, while the ZnO-assisted photocatalytic degradation was lower than that of TiO<sub>2</sub>, probably due to the lower specific surface area of ZnO (5 m<sup>2</sup>/g) and its tendency to agglomerate larger. The low-cost UV-A homogeneous photo-Fenton treatment removed 80% of the RIF in 60 min. The photo-Fenton process using iron-immobilized in chitosan beads showed lower degradation efficiency (50%), probably due to the lower iron availability on the catalyst surface. The results showed that the RIF degradation process was mainly affected by h<sup>+</sup>, as demonstrated by a reduction of the degradation rate to 30% in the presence of sodium oxalate. RIF reactivity towards h<sup>+</sup> was stated to be consistent with its high adsorption (15%) to the photocatalyst surface and abundance of donating electron pairs.

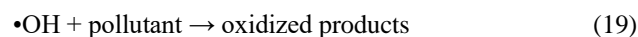
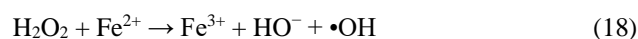
Mukimin et al. [77] aimed to propose a new solution for antibiotic RIF degradation via three electrocatalytic based mechanisms, namely electrochemical advanced oxidation (EAOP), electrochemical Fenton reagent (EFRP) and electrochemical flotation processes (EFP), while producing peroxide as an intermediate. Performance of process was evaluated with COD removal, UV-VIS absorbance spectra and time-of-flight mass spectrometry analysis (TOF-MS).

As a result, RIF was efficiently degraded. Complete mineralization was achieved as indicated by 100% COD removal as well as the disappearance of the UV-VIS absorbance spectrum peaks at  $\lambda$  470, 340 and 240 nm of the treated wastewater. In addition, this result was supported by the TOF-MS analysis results showing the absence of chromatogram peaks in m/z 821, m/z 759, m/z 700 and m/z 144. It was concluded that COD removal was probably achieved through three mechanisms (EAOP, EFRP and EFP), as in the equations below (Equations 15-21):

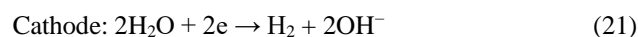
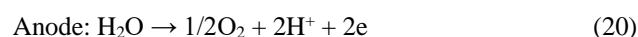
EAOP:



EFRP



EFP



From the above studies, it is seen that photocatalysis, electrochemical, US-assisted AOPs, Fenton process and heterogeneous catalysis was generally used for RIF degradation. Typically, these AOPs studies included the effect of operational parameters, kinetics, mineralization measurements (TOC or COD), mechanism of degradation, transformation products, quenching tests to identify the predominant reactive species, and reusability tests to determine catalyst stability if used. Existing data suggest that these AOPs have great potential for the removal of resistant organic pollutants such as RIF from wastewaters. Although good removal efficiencies was observed using AOPs, in most of the studies RIF could not be completely degraded and turned into transformation products.

### Other Technologies

In addition to adsorption and AOP methods, other technologies applied for RIF removal in the literature are reviewed and a summary of the researches performed is presented in this section. Membrane-based processes have attracted much attention for water treatment due to their properties such as high efficiency, environmental friendliness, lower cost, lower footprint, scalability and simplicity. Actually, membranes play a significant role in the challenges of water treatment [78]. Arefi-Oskoui et al. [79] used the nanocomposite of MoS<sub>2</sub> nanosheets and oxidized multi-walled carbon nanotubes (MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs) as a nano additive for the improvement of polyethersulfone (PES) polymeric membrane. They

investigated the effective removal of RIF by 0.75 wt% MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs/PES to evaluate the potential of developed membranes in the treatment of different wastewaters using membrane-based processes. A uniform flat surface without any agglomeration was observed for all blended membranes. For bare and blended membranes, asymmetrical structure was observed with small pores in the uplayer and finger-like pores in the sublayer, indicating that the membrane formation mechanism did not change in the presence of nanoadditive in the dope solution. When the homogeneous distribution of MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs nanocomposite in the blended membrane matrix was examined, it was revealed that the average surface roughness, porosity, hydrophilicity and average pore size increased by blending the optimum MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs amount (0.75 wt%). The modified blended membrane (0.75 wt% MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs/PES membrane) showed better permeability (flux: 192.2 L/m<sup>2</sup>.h) and better antifouling (FRR: 60.8%) compared to bare PES membrane (flux: 128.1 L/m<sup>2</sup>.h and FRR: 50.0%). As a result, the 0.75 wt% MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs/PES membrane exhibited permeability of 64.1 L/m<sup>2</sup>.h.bar and 97.5% removal for RIF.

MBBRs (Moving Bed Biofilm Reactors) are based on biofilms grown on small plastic carriers (1-4 cm in diameter) suspended and stirred in a reactor. In this way, MBBRs offer the advantages of biofilm reactors while being as robust in design as activated sludge treatment.

MBBRs have been recognized as compact and robust reactors for wastewater treatment in terms of increasing nitrification. Recently, it was proven by many studies that different biofilm technologies can remove micropollutants. Among these biofilm technologies, MBBRs have turned out to be a promising solution for the removal of micropollutants such as pharmaceuticals [80]. Li et al. [81] investigated the removal of some antibiotics (including RIF) using a MBBR and evaluated the effects of antibiotics on the organic matter removal, changes in ARGs and the abundance of antibiotic resistant bacteria (ARB), and changes in the bacterial community in reactors caused by antibiotics. It was concluded that sub-µg/L-sub-mg/L concentrations of antibiotics did not have a important effect on TOC removal. It was also reported that the relative abundance of ARGs and ARBs in the MBBR biofilm is increased due to the selective pressure of antibiotics. In addition, it was determined that antibiotics reduced the diversity of the biofilm bacterial community and changed the structure of bacterial community. It was suggested that these results will provide an empirical basis for the development of suitable practices for aquaculture and that disinfection and advanced oxidation should be applied to remove antibiotics, ARGs and ARB from mariculture wastewater.

Table 4. Comparison of different AOPs used by various researchers for degradation of RIF.

Process type	Conditions	Removal (%)	Ref.
ZnIn <sub>2</sub> S <sub>4</sub> /visible light irradiation	RIF: 10 mg/L, ZnIn <sub>2</sub> S <sub>4</sub> : 50 mg/L, light intensity: 50 mW/cm <sup>2</sup> (100 W iodine-gallium lamp), 90 min	100	[14]
Electrochemical process (BDD anode)	RIF: 0.2 g/L, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0.5 M, current density: 90 mA/cm <sup>2</sup> , pH: 3, 30 °C, 3 h	95 81 (COD)	[15]
Fenton reaction	RIF: 0.2 g/L, Fe <sup>2+</sup> : 0.1 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 20 mM, pH: 3, 15 min	91 79 (COD)	[15]
Electrochemical process + Fenton reaction	RIF: 0.2 g/L, Fe <sup>2+</sup> : 0.1 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 5 mM, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0.5 M, current density: 30 mA/cm <sup>2</sup> , pH: 3, 3 h	45 (BDD) 46 (Ti/Pt) 43 (Ti/Ru <sub>0.3</sub> Ti <sub>0.7</sub> O <sub>2</sub> ) (COD)	[15]
rGO@nFe/Pd	RIF: 20 mg/L, rGO@nFe/Pd: 0.2 g/L, pH: 6.14, 30 °C	79.9	[22]
rGO@nFe/Pd + Fenton	RIF: 50 mg/L, rGO@nFe/Pd: 0.2 g/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 74 mM, pH: 6.14, 30 °C	85.7	[22]
Metallic catalysts (Zn/Cu)	RIF: 40 ppm, Zn/Cu (%): 70/30, 600 rpm, neutral pH, 25 °C, 120 min	96.4	[56]
US/(N:ZnO/GO)	RIF: 30 mg/L, catalyst: 0.1 g, frequency: 50 KHz, US power: 400 W, natural pH, 25 ± 3 °C, 60 min	95	[59]
US/ZrO <sub>2</sub> -pumice	RIF: 20 mg/L, catalyst: 1.5 g/L, frequency: 40 KHz, US power: 300 W, natural pH, 25 ± 3 °C, 90 min	95	[60]
US/ZrO <sub>2</sub> -tuff	RIF: 20 mg/L, catalyst: 1.5 g/L, frequency: 40 KHz, US power: 300 W, natural pH, 25 ± 3 °C, 90 min	83	[60]
CdS-ZnS/solar irradiation	RIF: 8 mg/L, CdS-ZnS: 0.5 g/L, pH: 2, 120 min	98	[65]
RP (5.0 wt%)/HAp composite	RIF: 10 mg/L, catalyst: 1.0 g/L, pH: 6, 20 min, 300 W Xe lamp	100	[66]

Process type	Conditions	Removal (%)	Ref.
ZnIn <sub>2</sub> S <sub>4</sub> /visible light irradiation	RIF: 10 mg/L, ZnIn <sub>2</sub> S <sub>4</sub> : 50 mg/L, light intensity: 50 mW/cm <sup>2</sup> (100 W iodine-gallium lamp), 90 min	100	[14]
Electrochemical process (BDD anode)	RIF: 0.2 g/L, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0.5 M, current density: 90 mA/cm <sup>2</sup> , pH: 3, 30 °C, 3 h	95 81 (COD)	[15]
Fenton reaction	RIF: 0.2 g/L, Fe <sup>2+</sup> : 0.1 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 20 mM, pH: 3, 15 min	91 79 (COD)	[15]
Electrochemical process + Fenton reaction	RIF: 0.2 g/L, Fe <sup>2+</sup> : 0.1 mM, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 5 mM, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 0.5 M, current density: 30 mA/cm <sup>2</sup> , pH: 3, 3 h	45 (BDD) 46 (Ti/Pt) 43 (Ti/Ru <sub>0.3</sub> Ti <sub>0.7</sub> O <sub>2</sub> ) (COD)	[15]
BDD/CF cell	RIF: 0.2 mM, Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 50 mM, current density: 50 mA/cm <sup>2</sup> , 6 h	100	[71]
TiO <sub>2</sub> /UV-A photocatalysis	RIF: 10 mg/L, TiO <sub>2</sub> : 0.5 g/L, radiation: 125 W, pH: 6, 25 ± 1 °C, 60 min	95	[76]
Homogeneous UV-A photo-Fenton process	RIF: 10 mg/L, Fe <sup>2+</sup> : 15 mg/L, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 150 mg/L, pH: 3, 25 ± 1 °C, 60 min	80	[76]
Heterogeneous UV-A photo-Fenton process	RIF: 10 mg/L, Fe-immobilized chitosan: 10 g, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> : 150 mg/L, pH: 6, 25 ± 1 °C, 60 min	50	[76]

## Conclusions

This review highlighted the treatment processes used for the removal of RIF from aqueous matrices, and recommendations for future studies were outlined. AOPs, adsorption and several other treatment processes were applied for the removal of RIF. Different adsorbents were investigated for RIF adsorption and almost all studied adsorbents effectively removed RIF. Although the adsorption process is effective, no information could be found in the researches about cost of process and the disposal of the used adsorbent, which can be considered as the hazardous waste that is the main drawbacks of adsorption. The AOPs were the other most investigated course of treatment for the removal of RIF. Except for the heterogeneous UV-A photo-Fenton process, all AOPs were successfully performed for RIF degradation. Although the current AOPs used for the degradation of RIF have shown very good efficiencies, their transformation products and high costs limited their large-scale application in wastewater treatment plants. In addition, sulfate radical-based AOPs, which have attracted the attention of researchers in recent years, were not used for the degradation of RIF. A membrane-based process was also used for RIF removal and was successful. However, MBBR biofilm has not been a successful process for RIF removal, and the application of disinfection and AOPs to remove antibiotics, ARGs and ARB from marine culture wastewater was suggested by researchers.

As a result, it can be said that AOPs and adsorption process can be the most suitable processes for RIF removal. Although these processes are effective, the necessity of minimizing or eliminating some of their disadvantages is critical. Furthermore, since the matrix of real wastewater samples is more complex compared to synthetic wastewater samples, further researches should be performed using real wastewater samples for successful RIF removal. In addition, more research on the toxicity of RIF should be

performed. The number of studies on the removal of RIF can be increased and different removal methods can be tried. From this review, it can be concluded that RIF removal has recently attracted the attention of many researchers and is an important for the environment and human health.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

"There is no need to obtain permission from the ethics committee for the article prepared"

"There is no conflict of interest with any person / institution in the article prepared"

## References

- [1] S.N. Oba, J. O. Ighalo, C.O. Aniagor, and C.A. Igwegbe, "Removal of ibuprofen from aqueous media by adsorption: A comprehensive review," *Science of The Total Environment*, Vol. 780, p. 146608, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146608>.
- [2] T. Deblonde, C. Cossu-Leguille, and P. Hartemann, "Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 214 (6), pp. 442-448, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.08.002>.
- [3] M. Patel, R. Kumar, K. Kishor, T. Mlsna, C. U. Pittman, and D. Mohan, "Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods," *Chemical Reviews*, Vol. 119 (6), pp. 3510-3673, 2019. [10.1021/acs.chemrev.8b00299](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299).
- [4] I. Michael, L. Rizzo, C.S. McArdell, C.M. Manaia, C. Merlin, T. Schwartz, C. Dagot, D. Fatta-Kassinos, "Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review,"

- Water Research*, Vol. 47 (3), pp. 957-995, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.027>.
- [5] K. Kümmerer, "Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I," *Chemosphere*, Vol. 75, no. 4, pp. 417-434, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>.
- [6] V. Homem and L. Santos, "Degradation and removal methods of antibiotics from aqueous matrices – A review," *Journal of Environmental Management*, Vol. 92 (10), pp. 2304-2347, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.023>.
- [7] E.A. Campbell, N. Korzheva, A. Mustaev, K. Murakami, S. Nair, A. Goldfarb, S.A. Darst, "Structural Mechanism for Rifampicin Inhibition of Bacterial RNA Polymerase," *Cell*, Vol. 104 (6), pp. 901-912, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(01\)00286-0](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(01)00286-0).
- [8] R. Shokri and M. Amjadi, "Boron and nitrogen co-doped carbon dots as a chemiluminescence probe for sensitive assay of rifampicin," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 425, p. 113694, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2021.113694>.
- [9] H. Soni and J. Malik, "Rifampicin as Potent Inhibitor of COVID -19 Main Protease: In-Silico Docking Approach," *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences*, Vol. 6, pp. 588-593, 2020. [10.36348/sjmps.2020.v06i09.001](https://doi.org/10.36348/sjmps.2020.v06i09.001).
- [10] M. Shafaati, M. Miralinaghi, R.H.S.M. Shirazi, and E. Moniri, "The use of chitosan/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> grafted graphene oxide for effective adsorption of rifampicin from water samples," *Research on Chemical Intermediates*, Vol. 46 (12), pp. 5231-5254, 2020. [10.1007/s11164-020-04259-9](https://doi.org/10.1007/s11164-020-04259-9).
- [11] S. Rastgar and S. Shahrokhian, "Nickel hydroxide nanoparticles-reduced graphene oxide nanosheets film: Layer-by-layer electrochemical preparation, characterization and rifampicin sensory application," *Talanta*, Vol. 119, pp. 156-163, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.10.047>.
- [12] A. Tupin, M. Gualtieri, F. Roquet-Banères, Z. Morichaud, K. Brodolin, and J.-P. Leonetti, "Resistance to rifampicin: at the crossroads between ecological, genomic and medical concerns," *International Journal of Antimicrobial Agents*, Vol. 35 (6), pp. 519-523, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2009.12.017>.
- [13] N. Forrest Graeme and K. Tamura, "Rifampin Combination Therapy for Nonmycobacterial Infections," *Clinical Microbiology Reviews*, Vol. 23 (1), pp. 14-34, 2010, [10.1128/CMR.00034-09](https://doi.org/10.1128/CMR.00034-09).
- [14] B. Gao, S. Dong, J. Liu, L. Liu, Q. Feng, N. Tan, T. Liu, L. Bo, L. Wang, "Identification of intermediates and transformation pathways derived from photocatalytic degradation of five antibiotics on ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 304, pp. 826-840, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.07.029>.
- [15] J.L.d.S. Duarte, A.M.S. Solano, M.L.P.M. Arguelho, J. Tonholo, C.A. Martínez-Huitle, and C.L.d.P.e.S. Zanta, "Evaluation of treatment of effluents contaminated with rifampicin by Fenton, electrochemical and associated processes," *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 22, pp. 250-257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.012>.
- [16] W. H. Organization, "World Health Organization model list of essential medicines: 21st list 2019," World Health Organization, 2019.
- [17] E. Grotz, E. Bernabeu, M. Pappalardo, D.A. Chiappetta, and M.A. Moretton, "Nanoscale Kolliphor® HS 15 micelles to minimize rifampicin self-aggregation in aqueous media," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Vol. 41, pp. 1-6, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.06.009>.
- [18] C. Becker, J.B. Dressman, H.E. Junginger, S. Kopp, K.K. Midha, V.P. Shah, S. Stavchansky, D.M. Barends, "Biowaiver monographs for immediate release solid oral dosage forms: Rifampicin," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 98 (7), pp. 2252-2267, 2009. <https://doi.org/10.1002/jps.21624>.
- [19] K. Hao, S. Suryoprabowo, S. Song, H. Kuang, and L. Liu, "Rapid detection of rifampicin in fish using immunochromatographic strips," *Food and Agricultural Immunology*, Vol. 31 (1), pp. 700-710, 2020. [10.1080/09540105.2020.1753017](https://doi.org/10.1080/09540105.2020.1753017).
- [20] A.U. Khan, F. Shah, R.A. Khan, B. Ismail, A.M. Khan, and H. Muhammad, "Preconcentration of rifampicin prior to its efficient spectroscopic determination in the wastewater samples based on a nonionic surfactant," *Turkish Journal of Chemistry*, Vol. 45 (4), pp. 1201-1209, 2021. [10.3906/kim-2102-28](https://doi.org/10.3906/kim-2102-28).
- [21] D.C. Henrique, D.U. Quintela, A.H. Ide, A. Erto, J.L.d.S. Duarte, and L. Meili, "Calcined Mytella falcata shells as alternative adsorbent for efficient removal of rifampicin antibiotic from aqueous solutions," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8 (3), p. 103782, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103782>.
- [22] L. Liu, Q. Xu, G. Owens, and Z. Chen, "Fenton-oxidation of rifampicin via a green synthesized rGO@nFe/Pd nanocomposite," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 402, p. 123544, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123544>.
- [23] X. Hu, K. He, and Q. Zhou, "Occurrence, accumulation, attenuation and priority of typical antibiotics in sediments based on long-term field and modeling studies," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 225-226, pp. 91-98, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.062>.



- [24] J. Du, H. Zhao, and J. Chen, "[Simultaneous determination of 23-antibiotics in mariculture water using solid-phase extraction and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry]," (in chi), *Se pu = Chinese journal of chromatography*, Vol. 33 (4), pp. 348-53, 2015. [10.3724/sp.j.1123.2014.09028](https://doi.org/10.3724/sp.j.1123.2014.09028).
- [25] H. Thuy and T. Loan, "Antibiotic residues from shrimp farming in coastal wetland," *Natural Resources and Environment*, Vol. 2 (2012), pp. 61-63, 2012.
- [26] A. Rico, R. Jacobs, P. J. Van den Brink, and A. Tello, "A probabilistic approach to assess antibiotic resistance development risks in environmental compartments and its application to an intensive aquaculture production scenario," *Environmental Pollution*, Vol. 231, pp. 918-928, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.079>.
- [27] W. Cai, X. Weng, and Z. Chen, "Highly efficient removal of antibiotic rifampicin from aqueous solution using green synthesis of recyclable nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>," *Environmental Pollution*, Vol. 247, pp. 839-846, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.108>.
- [28] J.-J. Huang, H.-Y. Hu, S.-Q. Lu, Y. Li, F. Tang, Y. Lu, B. Wei, "Monitoring and evaluation of antibiotic-resistant bacteria at a municipal wastewater treatment plant in China," *Environment International*, Vol. 42, pp. 31-36, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.03.001>.
- [29] J. Cao, Y. Mi, C. Shi, Y. Bian, C. Huang, Z. Ye, L. Liu, L. Miao, "First-line anti-tuberculosis drugs induce hepatotoxicity: A novel mechanism based on a urinary metabolomics platform," *Biochemical and Biophysical Research Communications*, Vol. 497 (2), pp. 485-491, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2018.02.030>.
- [30] M. Combrink, D.T. Loots, and I. du Preez, "Metabolomics describes previously unknown toxicity mechanisms of isoniazid and rifampicin," *Toxicology Letters*, Vol. 322, pp. 104-110, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.018>.
- [31] Y. Liao, S.Q. Peng, X.Z. Yan, H.B. Chen, and L.S. Zhang, "[Metabonomic profile of urine from rats administrated with different treatment period of rifampin]," (in chi), *Zhongguo yi xue ke xue yuan xue bao. Acta Academiae Medicinae Sinicae*, Vol. 30 (6), pp. 696-702, 2008.
- [32] R.M. Jasmer, J.J. Saukkonen, H.M. Blumberg, C.L. Daley, J. Bernardo, E. Vittinghoff, M.D. King, L.M. Kawamura, P.C. Hopewell, "Short-Course Rifampin and Pyrazinamide Compared with Isoniazid for Latent Tuberculosis Infection: A Multicenter Clinical Trial," *Annals of Internal Medicine*, Vol. 137 (8), pp. 640-647, 2002, [10.7326/0003-4819-137-8-200210150-00007](https://doi.org/10.7326/0003-4819-137-8-200210150-00007).
- [33] B.S. Rathi and P.S. Kumar, "Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater," *Environmental Pollution*, Vol. 280, p. 116995, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116995>.
- [34] C.P. Silva, G. Jaria, M. Otero, V.I. Esteves, and V. Calisto, "Waste-based alternative adsorbents for the remediation of pharmaceutical contaminated waters: Has a step forward already been taken?," *Bioresour Technology*, Vol. 250, pp. 888-901, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.102>.
- [35] J. Ouyang, L. Zhou, Z. Liu, J.Y.Y. Heng, and W. Chen, "Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: A review," *Separation and Purification Technology*, Vol. 253, p. 117536, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117536>.
- [36] M.J. Ahmed, "Adsorption of non-steroidal anti-inflammatory drugs from aqueous solution using activated carbons: Review," *Journal of Environmental Management*, Vol. 190, pp. 274-282, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.073>.
- [37] M. Erdem, R. Orhan, M. Şahin, and E. Aydın, "Preparation and Characterization of a Novel Activated Carbon from Vine Shoots by ZnCl<sub>2</sub> Activation and Investigation of Its Rifampicin Removal Capability," *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 227 (7), p. 226, 2016. [10.1007/s11270-016-2929-5](https://doi.org/10.1007/s11270-016-2929-5).
- [38] H. Kais, N. Yeddou Mezener, and M. Trari, "Biosorption of rifampicin from wastewater using cocoa shells product," *Separation Science and Technology*, Vol. 55 (11), pp. 1984-1993, 2020. [10.1080/01496395.2019.1623255](https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1623255).
- [39] L. Rusu, C-G. Grigoraş, E.M. Suceveanu, A-I. Simion, A.V. Dediu Botezatu, B. Istrate, I. Doroftei, "Eco-Friendly Biosorbents Based on Microbial Biomass and Natural Polymers: Synthesis, Characterization and Application for the Removal of Drugs and Dyes from Aqueous Solutions," *Materials*, Vol. 14 (17), 2021. [10.3390/ma14174810](https://doi.org/10.3390/ma14174810).
- [40] W.-x. Zhang, "Nanoscale Iron Particles for Environmental Remediation: An Overview," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5 (3), pp. 323-332, 2003, [10.1023/A:1025520116015](https://doi.org/10.1023/A:1025520116015).
- [41] Z. Lin, X. Weng, G. Owens, and Z. Chen, "Simultaneous removal of Pb(II) and rifampicin from wastewater by iron nanoparticles synthesized by a tea extract," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 242, p. 118476, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118476>.
- [42] Q. Xu, W. Li, X. Weng, G. Owens, and Z. Chen, "Mechanism and impact of synthesis conditions on the one-step green synthesis of hybrid RGO@Fe/Pd nanoparticles," *Science of The Total Environment*, Vol. 710, p. 136308, 2020/03/25/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136308>.
- [43] Q. Xu, G. Owens, and Z. Chen, "Adsorption and catalytic reduction of rifampicin in wastewaters using

- hybrid rGO@Fe/Pd nanoparticles," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 264, p. 121617, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121617>.
- [44] C. Xue, W. Cai, X. Weng, G. Owens, and Z. Chen, "A one step synthesis of hybrid Fe/Ni-rGO using green tea extract for the removal of mixed contaminants," *Chemosphere*, Vol. 284, p. 131369, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131369>.
- [45] A.R. Abbasi and M. Rizvandi, "Influence of the ultrasound-assisted synthesis of Cu–BTC metal–organic frameworks nanoparticles on uptake and release properties of rifampicin," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 40, pp. 465-471, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.07.041>.
- [46] A.F.d. Silva, J.L.d.S. Duarte, and L. Meili, "Different routes for MgFe/LDH synthesis and application to remove pollutants of emerging concern," *Separation and Purification Technology*, Vol. 264, p. 118353, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118353>.
- [47] A. Hussain, W.A. Mahdi, S. Alshehri, S.I. Bukhari, and M.A. Almanea, "Application of Green Nanoemulsion for Elimination of Rifampicin from a Bulk Aqueous Solution," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18 (11), 2021. [10.3390/ijerph18115835](https://doi.org/10.3390/ijerph18115835).
- [48] Y. Deng and R. Zhao, "Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment," *Current Pollution Reports*, Vol. 1 (3), pp. 167-176, 2015. [10.1007/s40726-015-0015-z](https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z).
- [49] J.L. Wang and L.J. Xu, "Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 42 (3), pp. 251-325, 2012. [10.1080/10643389.2010.507698](https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698).
- [50] K. Ikehata, N. Jodeiri Naghashkar, and M. Gamal El-Din, "Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review," *Ozone: Science & Engineering*, Vol. 28 (6), pp. 353-414, 2006. [10.1080/01919510600985937](https://doi.org/10.1080/01919510600985937).
- [51] C. Amor, L. Marchão, M.S. Lucas, and J.A. Peres, "Application of Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Recalcitrant Agro-Industrial Wastewater: A Review," *Water*, Vol. 11 (2), 2019. [10.3390/w11020205](https://doi.org/10.3390/w11020205).
- [52] M. Trojanowicz, A. Bojanowska-Czajka, I. Bartosiewicz, and K. Kulisa, "Advanced Oxidation/Reduction Processes treatment for aqueous perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctanesulfonate (PFOS) – A review of recent advances," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 336, pp. 170-199, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.153>.
- [53] Y. Gao, P. Champagne, D. Blair, O. He, and T. Song, "Activated persulfate by iron-based materials used for refractory organics degradation: a review," *Water Science and Technology*, Vol. 81 (5), pp. 853-875, 2020. [10.2166/wst.2020.190](https://doi.org/10.2166/wst.2020.190).
- [54] S. Guerra-Rodríguez, E. Rodríguez, D.N. Singh, and J. Rodríguez-Chueca, "Assessment of Sulfate Radical-Based Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment: A Review," *Water*, Vol. 10 (12), 2018. [10.3390/w10121828](https://doi.org/10.3390/w10121828).
- [55] J.O. Ighalo, C.A. Igwegbe, C.O. Aniagor, and S.N. Oba, "A review of methods for the removal of penicillins from water," *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 39, p. 101886, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101886>.
- [56] K. Tahvildari and T. Bigdeli, "Treatment of pharmaceutical wastewater containing antibiotic with oxidation processes by metallic catalysts," *Biointerface Research in Applied Chemistry*, Vol. 9 (2), pp. 3853 - 3859, 2019. [10.33263/BRIAC92.853859](https://doi.org/10.33263/BRIAC92.853859).
- [57] E.S. Madivoli, P. G. Kareru, D.S. Makhanu, K. S. Wandera, E.G. Maina, S.I. Wanakai, P.K. Kimani, "Synthesis of spherical titanium dioxide microspheres and its application to degrade rifampicin," *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, Vol. 14, p. 100327, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100327>.
- [58] P. Liu, Z. Wu, A.V. Abramova, and G. Cravotto, "Sonochemical processes for the degradation of antibiotics in aqueous solutions: A review," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 74, p. 105566, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105566>.
- [59] Ā. Afrozān Bāzghale and A. Mohammad-Khāh, "Improvement of Ultrasound-Assisted Removal of Rifampin in the Presence of N: ZnO/GO Nanocomposite as Sonocatalyst," *Chemistryselect*, Vol. 5 (15), pp. 4413-4421, 2020. <https://doi.org/10.1002/slct.202000068>.
- [60] A. Khataee, P. Gholami, B. Kayan, D. Kalderis, L. Dinpazhoh, and S. Akay, "Synthesis of ZrO<sub>2</sub> nanoparticles on pumice and tuff for sonocatalytic degradation of rifampin," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 48, pp. 349-361, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.008>.
- [61] D. Kanakaraju, B.D. Glass, and M. Oelgemöller, "Titanium dioxide photocatalysis for pharmaceutical wastewater treatment," *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 12 (1), pp. 27-47, 2014. [10.1007/s10311-013-0428-0](https://doi.org/10.1007/s10311-013-0428-0).
- [62] S.O. Akpotu, E.O. Oseghe, O.S. Ayanda, A.A. Skelton, T.A.M. Msagati, and A.E. Ofomaja, "Photocatalysis and biodegradation of pharmaceuticals in wastewater: effect of abiotic and biotic factors," *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 21 (9), pp. 1701-1721, 2019. [10.1007/s10098-019-01747-4](https://doi.org/10.1007/s10098-019-01747-4).
- [63] H. Wang, X. Li, X. Zhao, C. Li, X. Song, P. Zhang, P. Huo, X. Li, "A review on heterogeneous

- photocatalysis for environmental remediation: From semiconductors to modification strategies," *Chinese Journal of Catalysis*, Vol. 43 (2), pp. 178-214, 2022. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(21\)63910-4](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(21)63910-4).
- [64] H. Kais, N.Y. Mezenner, M. Trari, and F. Madjene, "Photocatalytic Degradation of Rifampicin: Influencing Parameters and Mechanism," *Russian Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 93 (13), pp. 2834-2841, 2019. [10.1134/S0036024419130119](https://doi.org/10.1134/S0036024419130119).
- [65] F. Soleimani and A. Nezamzadeh-Ejhieh, "Study of the photocatalytic activity of CdS–ZnS nano-composite in the photodegradation of rifampin in aqueous solution," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9 (6), pp. 16237-16251, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.091>.
- [66] R. Zou, T. Xu, X. Lei, Q. Wu, and S. Xue, "Novel and efficient red phosphorus/hollow hydroxyapatite microsphere photocatalyst for fast removal of antibiotic pollutants," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 139, p. 109353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109353>.
- [67] N. Thuy Dang Thi, T. Ha Nguyen, V. Anh Ngo, T. Sen Nguyen, D. Dung Nguyen, and H. Nam Nguyen, "Preparation and photocatalytic characterization of modified TiO<sub>2</sub>/Nd/rice husk ash nanomaterial for Rifampicin removal in aqueous solution," *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. [10.21203/rs.3.rs-581621/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-581621/v1).
- [68] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment," *Separation and Purification Technology*, Vol. 38 (1), pp. 11-41, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.
- [69] J. Wang and R. Zhuang, "Degradation of antibiotics by advanced oxidation processes: An overview," *Science of The Total Environment*, Vol. 701 (135023), 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135023>.
- [70] I. Sirés and E. Brillas, "Remediation of water pollution caused by pharmaceutical residues based on electrochemical separation and degradation technologies: A review," *Environment International*, Vol. 40, pp. 212-229, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.07.012>.
- [71] L.R.D. Brito, S.O. Ganiyu, E.V. dos Santos, M.A. Oturan, and C.A. Martínez-Huitle, "Removal of antibiotic rifampicin from aqueous media by advanced electrochemical oxidation: Role of electrode materials, electrolytes and real water matrices," *Electrochimica Acta*, Vol. 396, p. 139254, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.139254>.
- [72] M. Klavarioti, D. Mantzavinos, and D. Kassinos, "Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes," *Environment International*, Vol. 35 (2), pp. 402-417, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.009>.
- [73] D.P. Mohapatra, S.K. Brar, R.D. Tyagi, P. Picard, and R.Y. Surampalli, "Analysis and advanced oxidation treatment of a persistent pharmaceutical compound in wastewater and wastewater sludge-carbamazepine," *Science of The Total Environment*, Vol. 470-471, pp. 58-75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.034>.
- [74] M.E.T. Sillanpää, T. Agustiono Kurniawan, and W.-h. Lo, "Degradation of chelating agents in aqueous solution using advanced oxidation process (AOP)," *Chemosphere*, Vol. 83 (11), pp. 1443-1460, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.007>.
- [75] D. Kanakaraju, B.D. Glass, and M. Oelgemöller, "Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review," *Journal of Environmental Management*, Vol. 219, pp. 189-207, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103>.
- [76] S. Stets, B. do Amaral, J.T. Schneider, I.R. de Barros, M.V. de Liz, R.R. Ribeiro, N. Nagata, P. Peralta-Zamora, "Antituberculosis drugs degradation by UV-based advanced oxidation processes," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 353, pp. 26-33, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.11.006>.
- [77] A. Mukimin, H. Vistanty, and N. Zen, "Hybrid advanced oxidation process (HAOP) as highly efficient and powerful treatment for complete demineralization of antibiotics," *Separation and Purification Technology*, Vol. 241, p. 116728, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116728>.
- [78] Y. Orooji, A. Movahedi, Z. Liu, M. Asadnia, E. Ghasali, Y. Ganjkhanlou, A. Razmjou, H. Karimi-Maleh, N.T.H. Kiadeh, "Luminescent film: Biofouling investigation of tetraphenylethylene blended polyethersulfone ultrafiltration membrane," *Chemosphere*, Vol. 267, p. 128871, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128871>.
- [79] S. Arefi-Oskoui et al., "Development of MoS<sub>2</sub>/O-MWCNTs/PES blended membrane for efficient removal of dyes, antibiotic, and protein," *Separation and Purification Technology*, Vol. 280, p. 119822, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119822>.
- [80] M.E. Casas, R.K. Chhetri, G. Ooi, K.M.S. Hansen, K. Litty, M. Christensson, C. Kragelund, H.R. Andersen, K. Bester, "Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR)," *Water Research*, Vol. 83, pp. 293-302, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.042>.
- [81] S. Li, S. Zhang, C. Ye, W. Lin, M. Zhang, L. Chen, J. Li, X. Yu, "Biofilm processes in treating mariculture wastewater may be a reservoir of antibiotic resistance genes," *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 118 (1), pp. 289-296, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.003>.



# The size of portlandite crystals in ITZ and its relation with ratios of ingredients and properties of LWAC

İsmail Ağa GÖNÜL<sup>1\*</sup>, Hatice ÇİÇEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dicle University, Department of Architecture, ismail@dicle.edu.tr, Orcid No 0000-0002-9833-7140

<sup>2</sup> Dicle University, Department of Architecture, hatice@dicle.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-3271-1854

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 7 July 2022  
Received in revised form 28  
December 2022  
Accepted 28 December 2022  
Available online 23 March 2023

### Keywords:

Lightweight aggregate concrete,  
scoria, interfacial transition zone,  
portlandite, compressive strength,  
oven-dry density

Doi: 10.24012/dumf.1142093

\* Corresponding author

## ABSTRACT

In this experimental study, nine different lightweight aggregate concrete (LWAC) specimens - in which natural lightweight scoria aggregate was used as coarse aggregate - were prepared for investigating the size of portlandite crystals in their interfacial transition zone (ITZ). Scanning Electron Microscope (SEM) was used to determine the size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens. The size of portlandite crystals in ITZ of these LWAC specimens was determined quantitatively in order to identify its relation with ratios of ingredients and properties of LWAC that were investigated. It was determined that the size of portlandite crystals in ITZ of nine LWAC specimens is in the range of (0.91-2.047)  $\mu\text{m}$ . The size of portlandite crystals in ITZ is found to be increased when the water/cement (W/C) and coarse aggregate/total aggregate (Ac/A) ratios of LWAC get increased. On the other hand, the compressive strength and the oven-dry density of LWAC are found to be decreased when the size of portlandite crystals in ITZ gets increased. The best way to make portlandite beneficial from mechanical, physical and durability points of view is to transform it into so-called secondary hydration products by making it react with materials that have proper chemical properties for this transformation. In this case, the small portlandite crystals dissolve entirely, and the large portlandite crystals become smaller. Lightweight scoria aggregate used in this study is thought to have chemical properties to assist such a transformation in ITZ.

## Introduction

Concrete can contain a wide variety of different materials. In basic, it can be regarded as a material that has the filler and the binder components. Aggregate particles are the filler, cement paste is the binder component of concrete. Cement paste holds the aggregate particles together. It can be regarded as a glue [1].

The cement paste is affected by the presence of the aggregate. In the close vicinity of aggregate particles, the cement particles can't pack together efficiently. This narrow cement paste region, typically 10 to 50  $\mu\text{m}$  thick around the aggregate particles, differs from the bulk cement paste [1]. In concrete, this region between cement paste and aggregate is mostly defined as interfacial transition zone (ITZ) among other definitions [2-6].

The components of the hydrated cement paste are some unhydrated clinker grains, pores, and hydration products. Portlandite, calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium sulfoaluminates hydrates are the main hydration products. The volume occupied by these hydration products varies from 20% to 25% for portlandite, 50% to 60% for C-S-H, and 15% to 20% for calcium sulfoaluminates hydrates of

total volumes of solids in a completely hydrated cement paste [2].

Although extensive work has been done on the hydrated cement paste, the studies related with portlandite [7-21] have been very limited. The tendency of portlandite is to form large crystals that have hexagonal-prism morphology [2]. During the drying process of cement paste shrinkage occurs. It is believed that portlandite limits the amount of shrinkage [1]. Further, it provides protection to the reinforcing steel that takes place in concrete to avoid from carbonation-induced corrosion via maintaining a high pH in the interstitial water [22].

However, portlandite is the most soluble hydration product. According to numerical simulations, portlandite dissolution increases the porosity of the hydrated cement paste. The material transport properties are negatively affected by this increase in porosity [14]. Also, portlandite has considerably lower surface area compared with C-S-H that limits its strength-contributing potential [2]. And also, its orientation in cement paste provides space for potential crack propagation and therefore a reduction in strength of concrete. In this aspect, portlandite is the weakest point of the hardened high-density systems and restrains their mechanical properties [23].

According to Li and Xu, the lower content of portlandite, the higher content of C-S-H, and the lower porosity in both ITZ and the bulk cement paste have positive effects on transport and mechanical properties of highly resistant concrete [23].

There are larger portlandite crystals in ITZ, than are found in the bulk cement paste [1]. However, there are few studies on the nucleation and growth of these crystals in ITZ [9]. ITZ of around 40  $\mu\text{m}$  covers 20% to 40% volume of cement paste. It has a major role in identifying concrete properties [5]. Size and morphology of the crystals formed within this zone as a result of hydration affect the properties of ITZ. In this regard, the quantitative studies of the features of portlandite crystals in ITZ are essential for the modification of ITZ microstructure.

In this experimental study, nine different lightweight aggregate concrete (LWAC) specimens were prepared for investigating the size of portlandite crystals in their ITZ. Scoria, a natural lightweight aggregate, was used as coarse aggregate in LWAC specimens. The size of portlandite crystals in ITZ of these LWAC specimens was determined

quantitatively in order to identify its relation with ratios of ingredients and properties (compressive strength and oven-dry density) of LWAC.

## Material and methods

### Preparation of LWAC mixtures

Nine LWAC mixtures that were prepared and ratios and proportions of their ingredients are given in Table 1. Properties of cement, physical properties of aggregates and chemical content of scoria aggregate used in LWAC mixtures were given respectively in Table 2, Table 3 and Table 4.

Absolute volume method was used for proportioning the ingredients of LWAC mixtures. Each LWAC mixture was targeted to have high strength and a slump value of minimum 2.5 cm. The recent proportions of ingredients of LWAC mixtures were determined after testing the trial LWAC mixtures that were prepared in accordance with these targets. Polycarboxylate based hyper plasticizer admixture was used in three LWAC mixtures that have W/C ratio of 30%.

Table 1. LWAC mixtures that were prepared and ratios and proportions of their ingredients.

LWAC Mixtures That Were Prepared	Ratios and Proportions of Ingredients										
	Ratios of Ingredients			Proportions of Ingredients (in 1000 dm <sup>3</sup> concrete mixture)							
	Water / Cement (W/C) Ratio by Mass (%)	Coarse Aggregate / Total Aggregate (Ac/A) Ratio by Volume (%)	Cement Mass (kg)	Cement Volume (dm <sup>3</sup> )	Coarse Aggregate (Scoria) Mass (kg)	Coarse Aggregate (Scoria) Volume (dm <sup>3</sup> )	Fine Aggregate (River Sand) Mass (kg)	Fine Aggregate (River Sand) Volume (dm <sup>3</sup> )	Water + Hyper Plasticizer Mass (kg)	Saturation Water Mass of Coarse Aggregate (kg)	Saturation Water Mass of Fine Aggregate (kg)
LWAC 01	30	40	500	160.256	502.134	275.898	1051.169	413.846	143.75 + 6.25	37.310	15.768
LWAC 02	30	50	500	160.256	627.670	344.872	876	344.872	143.75 + 6.25	46.640	13.140
LWAC 03	30	60	500	160.256	753.20	413.846	700.780	275.898	143.75 + 6.25	55.960	10.510
LWAC 04	37.5	40	500	160.256	474.834	260.898	994.019	391.346	187.5 + 0	35.280	14.910
LWAC 05	37.5	50	500	160.256	593.542	326.122	828.350	326.122	187.5 + 0	44.100	12.425
LWAC 06	37.5	60	500	160.256	712.250	391.346	662.681	260.898	187.5 + 0	52.920	9.940
LWAC 07	45	40	500	160.256	447.534	245.898	936.869	368.846	225 + 0	33.256	14.053
LWAC 08	45	50	500	160.256	559.417	307.372	780.725	307.372	225 + 0	41.565	11.711
LWAC 09	45	60	500	160.256	671.300	368.846	624.580	245.898	225 + 0	49.880	9.370

Table 2. Properties of cement used in LWAC mixtures.

Properties of Cement Used in LWAC Mixtures (Normal Early Strength Portland Cement)					
Strength Properties		Physical Properties		Chemical Properties	
Compressive strength (2 days)	31.0 MPa	Specific weight (g/cm <sup>3</sup> )	3.12	Insoluble residue (%)	0.55
Compressive strength (7 days)	39.5 MPa	Volume constancy (mm)	1.2	SO <sub>3</sub> (%)	2.38
Compressive strength (28 days)	46.5 MPa	Specific surface area (cm <sup>2</sup> /g)	3395	Cl (%)	0.0085
		Setting start (hour)	2.15	Ignition loss (%)	2.65
		Setting ending (hour)	3.35		

Table 3. Physical properties of aggregates used in LWAC mixtures.

Aggregates Used in LWAC Mixtures	Physical Properties						
	Maximum Particle Size (mm)	Particle Size Distribution	Bulk Density (Mg/m <sup>3</sup> )	Particle Density (Mg/m <sup>3</sup> )	Shape Index	Water Absorption (24 h) (%)	Moisture Content (%)
River sand (fine aggregate)	4	Appropriate for	1.707	2.538	-	2.538	1.96
Scoria (coarse aggregate)	16	ASTM C 330	0.864	1.819	10	10.884	0.89

Table 4. Chemical content of scoria aggregate used in LWAC mixtures.

Chemical Content of Scoria Aggregate Used in LWAC Mixtures	Ratios (%)
SiO <sub>2</sub> (total)	45.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.80
CaO	12.05
MgO	7.41
SO <sub>3</sub>	0.36
Na <sub>2</sub> O	2.88
K <sub>2</sub> O	1.32

River sand aggregate was entirely dried in the oven before used in LWAC mixtures. It is suggested to keep lightweight aggregates in water during ten minutes before using them in concrete mixtures. However, it was thought that this period of time wouldn't be sufficient due to high cement content used in LWAC mixtures and ambient temperature of 30-35 °C at the time of LWAC production. Therefore, before used in LWAC mixtures, scoria aggregate was kept in water during thirty minutes after entirely dried in the oven. Saturation water of aggregates was added to LWAC mixtures subsequently.

#### Preparation of test specimens and determination of the compressive strength and oven-dry density

Test specimens were prepared in order to determine the compressive strength and oven-dry density of prepared LWAC mixtures in the hardened state. In this regard, moulds for test specimens were prepared, moulds were filled with LWAC mixtures that were prepared and then compacted (by vibrating table), surfaces of them were leveled and finally test specimens were cured. These operations carried out according to procedures given in TS EN 12390-1 [24] and TS EN 12390-2 [25].

In this study, 27 test specimens (three for each of the nine LWAC mixtures) were prepared in 150x300 mm sizes and in the form of cylinders for the compressive strength tests and also 27 test specimens in 100x100x100 mm sizes and in the form of cubes for the oven-dry density tests.

It was seen that there is no consensus in literature on the curing time and testing age of LWAC test specimens. In this study, LWAC test specimens were cured in lime-saturated water during 56 days. Later on, they were kept in the laboratory under environmental conditions at the end of 90th day.

The compressive strength of these test specimens was determined according to instructions given in TS EN 12390-3 [26] and TS EN 12390-4 [27], and the oven-dry density of test specimens was determined according to instructions given in TS EN 12390-7 [28].

#### Preparation of SEM specimens and determination of the size of portlandite crystals in ITZ

In this study, images obtained from Scanning Electron Microscope (SEM) were used to determine the size of portlandite crystals in ITZ. For this, 100x100x500 mm sized beam specimens were prepared at first. Considering the fact that ITZ and scoria aggregate may interact within time, the prepared beam specimens were kept in the laboratory under environmental conditions for one year. The 10x25x50 mm sized SEM specimens (Figure 1) were obtained from these beam specimens. SEM specimens were polished, wiped with methyl alcohol to obstruct further hydration, coated with gold for conductivity and dried in an oven.



Figure 1. Preparation of SEM specimens.

In able to determine the size of portlandite crystals in ITZ, 6 Secondary Electron Images (SEIs) were taken from each SEM specimen. Thus, 54 SEIs at 10000x magnification ratio were taken in total. Quantitative data related with the size of portlandite crystals was obtained from SEIs by direct measurement. The size of each portlandite crystal was measured in two perpendicular directions and was determined by taking average of these two sizes. The size of portlandite crystals in ITZ of each SEM specimen was

determined by taking the average of the measured sizes of the largest three portlandite crystals in ITZ.

## Results and discussion

### The size of portlandite crystals in ITZ of LWAC

The size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens is given in Figure 2, and the images of portlandite crystals in Figure 3.

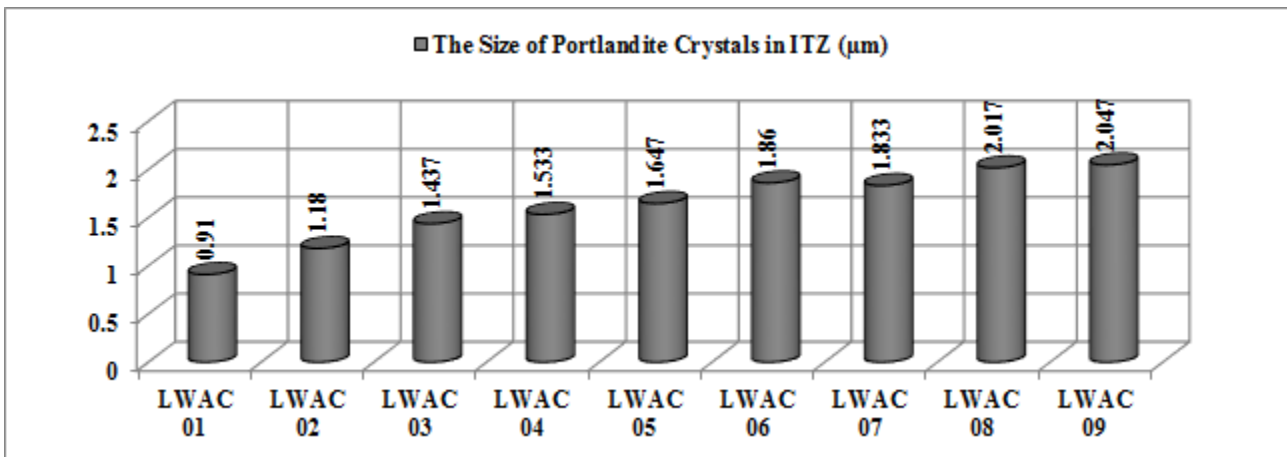


Figure 2. The size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens.

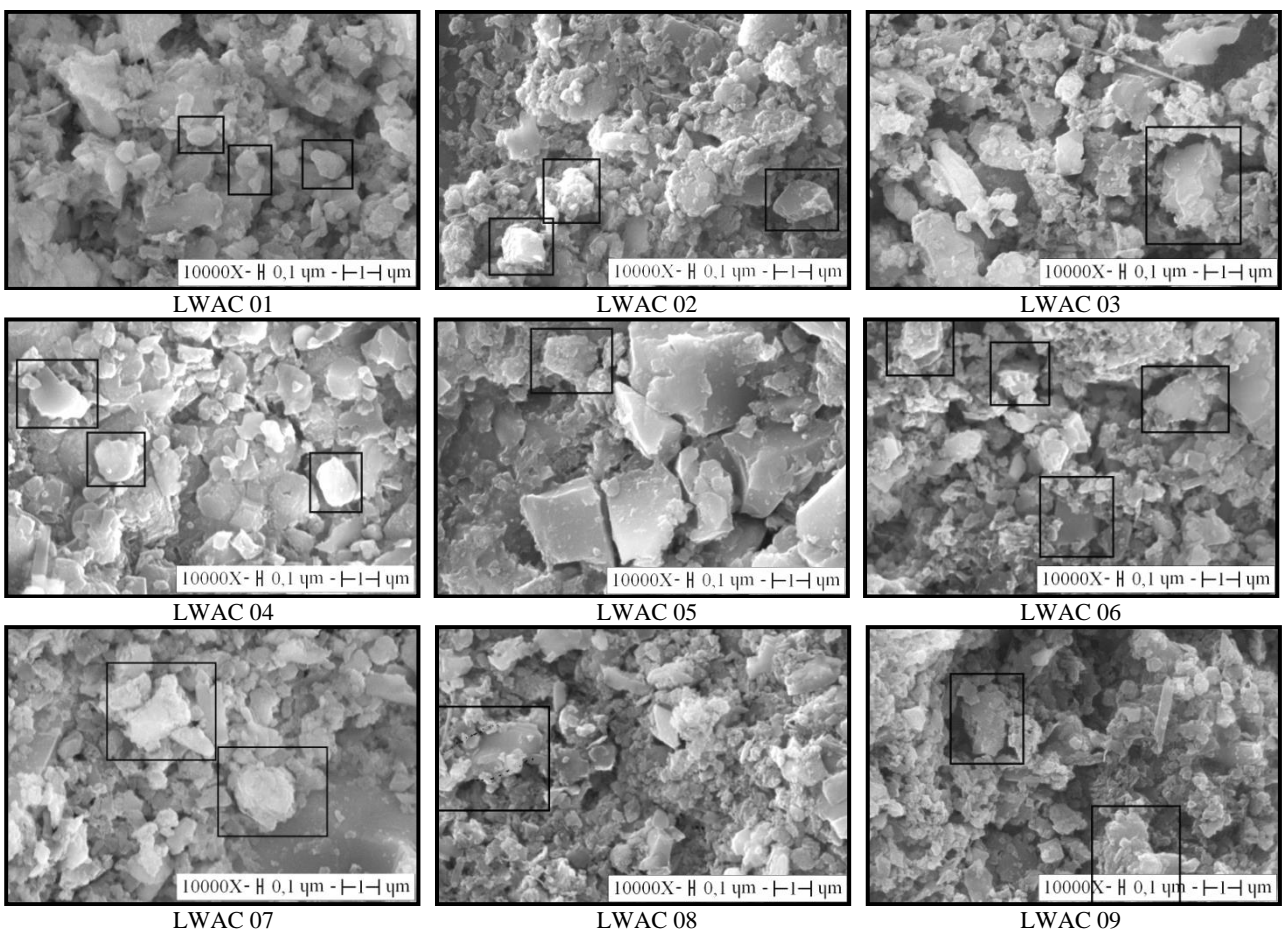


Figure 3. The images of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens.

The size of portlandite crystals is around 1  $\mu\text{m}$  in well-hydrated bulk cement paste. According to Jiang [29], the amount and size of portlandite crystals in ITZ is more than those of in bulk cement paste. Some admixtures that are used in concrete can decrease the size of portlandite crystals in ITZ. It has been stated the size of portlandite crystals to be (3-4)  $\mu\text{m}$  in ITZ of concrete containing ground granulated blast-furnace slag produced by Gao et al. [30], and to be 2  $\mu\text{m}$  in ITZ of concrete containing nanoparticles of  $\text{TiO}_2$  produced by Ren et al. [31].

In this study, it was determined that the size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens is in the range of (0.91-2.047)  $\mu\text{m}$ . There isn't any orientation of portlandite crystals in ITZ. Portlandite crystals, morphologically, is similar to a cube with rounded edges, and in the form of pebble stone.

In order to explain these satisfactory small values obtained in this study with respect to the size of portlandite crystals, the sequence of ITZ's hydration development must be followed from the time concrete is placed: At the beginning of the hydration, ettringite and portlandite are formed in ITZ, as in the bulk cement paste. These crystalline products in ITZ consist of relatively larger crystals. In the next stage of hydration, C-S-H and smaller crystals of ettringite and

portlandite are formed and the space between the large ettringite and portlandite crystals starts filling by them. In later process of hydration, chemical reactions between the aggregate (siliceous aggregate or limestone) and the cement paste may form new hydration products (C-S-H or carboaluminate hydrates) in the pores of ITZ. Such chemical reactions reduce the concentration of the portlandite in ITZ [2].

Scoria aggregate particles have a rich silica and alumina content. In this study, considering the fact that ITZ and scoria aggregate may interact within time, the prepared beam specimens that SEM specimens removed from were kept in the laboratory under environmental conditions for one year. In this long term, scoria aggregate particles must have reacted with portlandite crystals to form so-called secondary hydration products. In this case, small portlandite crystals dissolve entirely, and large portlandite crystals become smaller.

#### Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with the ratios of LWAC ingredients

Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with the ratios of LWAC ingredients is given in Figure 4.

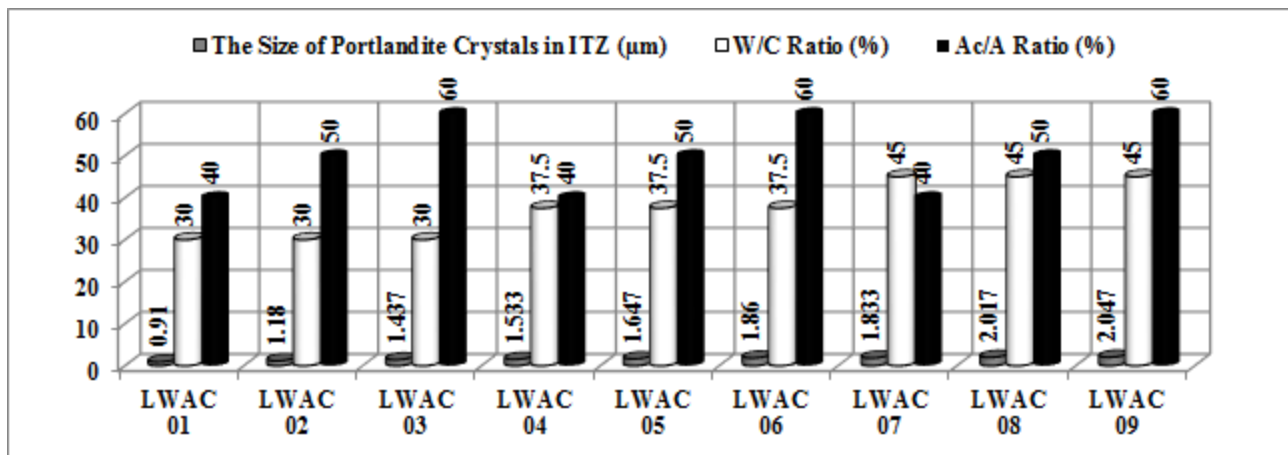


Figure 4. Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with the ratios of LWAC ingredients

The size of portlandite crystals in ITZ is found to be increased when the W/C ratio of LWAC gets increased. Increase in W/C ratio of LWAC from 30% to 45%, increased the size of portlandite crystals in ITZ by 71% on average. The increase in the size of portlandite crystals comes true as follows: During cement hydration, hydration products grow outward from the surface of cement particles. When hydration products from two close cement particles contact, they stop growing in that particular direction. Portlandite forms as crystals with a wide range of shapes and sizes, depending primarily on the amount of space available for growth [1]. According to Richardson, there is a lot of space when the W/C is high (Figure 5). Thus, hydration products can grow unhindered and large crystals are formed. In contrast, in low W/C paste the

growth of hydration products is hindered and water availability for hydration becomes limited [22].

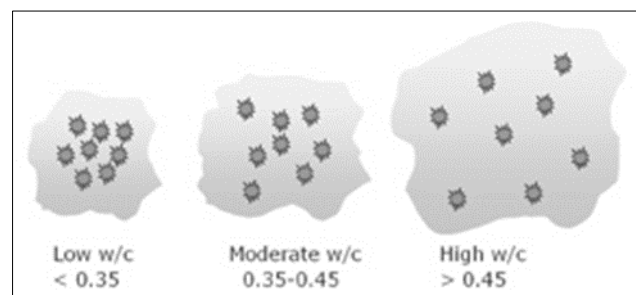


Figure 5. Schematic representation of water and cement particles for low, moderate and high W/C ratios [32].



In this study, hyper plasticizer made it possible to produce LWAC that has a low W/C ratio (30%). Hyper plasticizer increases the dispersion of cement particles by electro-steric repulsion. Electro-steric repulsion includes both electrostatic repulsion and steric hindrance (Figure 6). Surface tension is decreased when hyper plasticizer

adsorbed by particles. Thus, it is possible to reduce W/C ratio, enhance workability, improve segregation resistance, and increase homogeneity of concrete with hyper plasticizer. The size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens produced with hyper plasticizer is seen to be considerably small due to low W/C ratio.

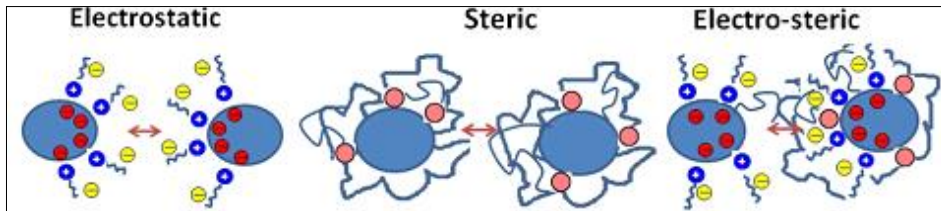


Figure 6. Schematic representation of electrostatic, steric, and electro-steric repulsion [33].

Furthermore, the size of portlandite crystals in ITZ is found to be increased when the Ac/A ratio of LWAC gets increased. Increase in Ac/A ratio of LWAC from 40% to 60%, increased the size of portlandite crystals in ITZ by 30% on average. The increase in the size of portlandite crystals comes true as follows: In the production of LWAC, sand was used in dry state and scoria aggregate was used after kept in water for 0.5 hour. Saturation water of aggregates was added to LWAC mixtures subsequently. The amount of saturation water of scoria aggregate is much more than the amount of saturation water of sand. When the Ac/A ratio of LWAC gets increased, the increased mixture water was accumulated around (especially beneath) the scoria aggregate that had substantially saturated due to being kept in water for 0.5 hour (Figure 7). Thus, the W/C ratio of ITZ was increased. Increase in W/C ratio of ITZ, must have increased the size of portlandite crystals in ITZ at the beginning of hydration.

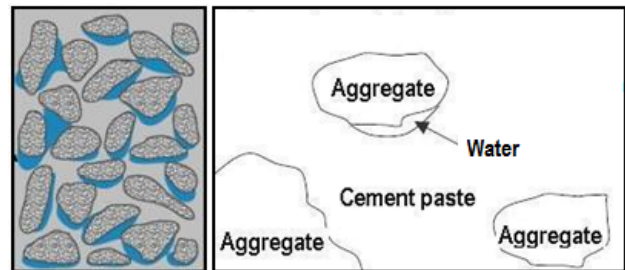


Figure 7. Schematic representation of water accumulation around the aggregate particles [2, 34].

**Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with LWAC properties**

Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with LWAC properties is given in Figure 8.

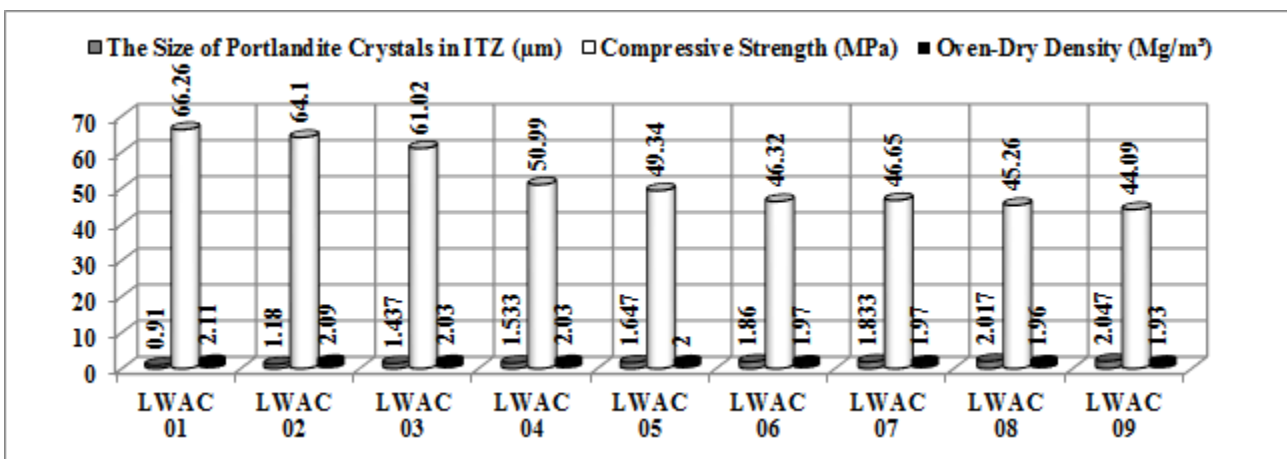


Figure 8. Relation of the size of portlandite crystals in ITZ with LWAC properties.

The compressive strength and the oven-dry density of LWAC are found to be decreased when the size of portlandite crystals in ITZ gets increased. In this context,

there are inversely proportional relations between the size of portlandite crystals in ITZ and LWAC properties that were investigated.

ITZ behaves as the “weak link in the chain” beside the bulk cement paste and the aggregate particles in concrete. The strength and density of ITZ have direct effects on the strength and density of concrete [1]. The van der Waals forces of attraction are the principal source of strength in the solid products of ITZ (Figure 9). The degree of the adhesion between two solid surfaces depends on the extent and nature of the surfaces. Larger solid products of ITZ

have lower surface area and weaker van der Waals forces of attraction accordingly. Thus, they possess less adhesion capacity. Besides, larger solid products of ITZ form a more porous framework [2]. For these reasons, the compressive strength and oven-dry density of concrete are found to be decreased when the size of solid products of ITZ gets increased.

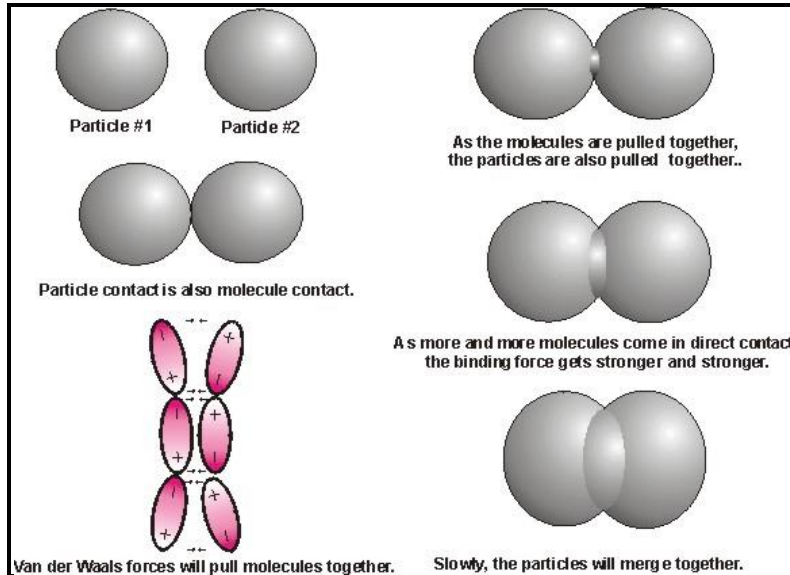


Figure 9. Van der Waals forces of attraction [35].

## Conclusions

In this experimental study, it was determined that the size of portlandite crystals in ITZ of nine LWAC specimens is in the range of (0.91-2.047)  $\mu\text{m}$ . There isn't any orientation of portlandite crystals in ITZ of concrete specimens. Portlandite crystals, morphologically, is similar to a cube with rounded edges, and in the form of pebble stone.

The size of portlandite crystals in ITZ is found to be increased when the W/C and Ac/A ratios of LWAC get increased. Increase in W/C ratio of LWAC from 30% to 45%, increased the size of portlandite crystals in ITZ by 71% on average. Hyper plasticizer made it possible to produce LWAC that has a low W/C ratio (30%). Thus, the size of portlandite crystals in ITZ of LWAC specimens produced with hyper plasticizer decreased considerably. Similarly, increase in Ac/A ratio of LWAC from 40% to 60%, increased the size of portlandite crystals in ITZ by 30% on average.

On the other hand, the compressive strength and the oven-dry density of LWAC are found to be decreased when the size of portlandite crystals in ITZ gets increased. In this context, inversely proportional relations have determined between the size of portlandite crystals in ITZ and LWAC properties that were investigated.

Portlandite tends to form as large crystals amongst the other hydration products. Larger crystals have lower

surface area and weaker van der Waals forces of attraction accordingly. Thus, they possess less adhesion capacity and form a more porous framework. Also, portlandite is the most soluble hydration product. The best way to make portlandite beneficial from mechanical, physical and durability points of view is to transform it into so-called secondary hydration products by making it react with materials that have proper chemical properties for this transformation. In this case, the small portlandite crystals dissolve entirely, and the large portlandite crystals become smaller. Lightweight scoria aggregate used in this study is thought to have chemical properties to assist such a transformation in ITZ. The small values related with the size of portlandite crystals obtained from this experimental study support this judgment.

According to the researchers, any further research should include quantitative examination of ITZ chemically and in terms of other morphological issues in order to better understand ITZ microstructure.

## Ethics committee approval and conflict of interest statement

There is no need to obtain permission from the ethics committee for this article prepared.

There is no conflict of interest with any person in this article prepared. All authors declare that they have no conflict of interest.

## Authors' Contributions

All authors contributed equally.

## References

- [1] J. J. Thomas and H. Jennings, "Materials of cement science primer: The science of concrete," Northwestern University Infrastructure Technology Institute, USA, Rep. Project A474, 2009.
- [2] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*. Third ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [3] K. M. Nemati, P. J. M. Monteiro, and K. L. Scrivener, "Analysis of compressive stress-induced cracks in concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 95, no. 5, pp. 617-631, 1998.
- [4] L. Basheer, P. A. M. Basheer, and A. E. Long, "Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, pp. 682-690, 2005.
- [5] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and C. M. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1195-1203, 2005.
- [6] A. Cwirzen and V. Penttala, "Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 671-679, 2005.
- [7] H. Gönül, "Bazalt skoriasının taşıyıcı yarı hafif beton üretiminde kullanımı / Use of basaltic scoria for produce of semi lightweight concrete," Ph.D. dissertation, Dept. of Architecture, Gazi Univ., Ankara, 2008.
- [8] M. Ayhan, H. Gönül, İ. A. Gönül, and A. Karakuş, "Effect of basic pumice on morphologic properties of interfacial transition zone in load-bearing lightweight / semi-lightweight concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, pp. 2507-2518, 2011.
- [9] E. Gallucci and K. Scrivener, "Crystallisation of calcium hydroxide in early age model and ordinary cementitious systems," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 492-501, 2007.
- [10] J. Skalny, J. Gebauer, and I. Odler, eds., *Materials Science of Concrete: Calcium Hydroxide in Concrete*. Westerville, USA: The American Ceramic Society, 2001.
- [11] C. Carde and R. François, "Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on the mechanical and physical properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, pp. 539-550, 1997.
- [12] N. Hernandez, J. Lizarazo-Marriaga, and M. A. Rivas, "Petrographic characterization of Portlandite crystal sizes in cement pastes affected by different hydration environments," *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 541-549, 2018.
- [13] T. Sacki and P. J. M. Monteiro, "A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1914-1921, 2005.
- [14] J. Marchand, D. P. Bentz, E. Samson, and Y. Maltais, "Influence of calcium hydroxide dissolution on the transport properties of hydrated cement systems," in *Materials Science of Concrete: Calcium Hydroxide in Concrete*, J. Skalny, J. Gebauer, and I. Odler, eds., Westerville, USA: The American Ceramic Society, 2001, pp. 113-129.
- [15] Z. Yan-Rong, K. Xiang-Ming, L. Zi-Chen, L. Zhen-Bao, Z. Qing, D. Bi-Qin, and X. Feng, "Influence of triethanolamine on the hydration product of portlandite in cement paste and the mechanism," *Cem. Concr. Res.*, vol. 87, pp. 64-76, 2016.
- [16] T. Müller, C. Krämer, C. Pritzel, R. Bornemann, T. L. Kowald, R. H. F. Trettin, and P. H. Bolívar, "Influence of cocamidopropyl betaine on the formation and carbonation of portlandite – A microscopy study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 163, pp. 793-797, 2018.
- [17] W. Kunther, S. Ferreira, and J. Skibsted, "Influence of the Ca/Si ratio on the compressive strength of cementitious calcium-silicate-hydrate binders," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, pp. 17401-17412, 2017.
- [18] S. Diamond, "The microstructure of cement paste and concrete—a visual primer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 919-933, 2004.
- [19] K. Wu, H. Shi, L. Xu, G. Ye, and D. G. Schutter, "Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 243-256, 2016.
- [20] J. S. Belkowitz and D. Armentrout, "An investigation of nano silica in the cement hydration process," presented at the *Concrete Sustainability Conference*, USA, 2010.
- [21] Q. Ye, Z. Zhang, D. Kong, and R. Chen, "Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, pp. 539-545, 2007.
- [22] P. C. Aitcin, "Portland cement," in *Science and Technology of Concrete Admixtures*, P. C. Aitcin and R. J. Flatt, eds., UK: Woodhead Publishing, 2016, pp. 27-53.
- [23] T. Slamečka and F. Škvára, "The effect of water ratio on microstructure and composition of the hydration products of Portland cement pastes," *Ceram. Silik.*, vol. 46, no. 4, pp. 152-158, 2002.
- [24] Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, TS EN 12390-1, 2002.

- [25] Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests, TS EN 12390-2, 2002.
- [26] Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, TS EN 12390-3, 2003.
- [27] Testing hardened concrete - Part 4: Compressive strength - Specification for testing machines, TS EN 12390-4, 2002.
- [28] Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete, TS EN 12390-7, 2002.
- [29] L. Jiang, "The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement pastes incorporating high volumes of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, pp. 313-316, 1999.
- [30] J. M. Gao, C. X. Qian, H. F. Liu, B. Wang, and L. Li, "ITZ microstructure of concrete containing GGBS," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1299-1304, 2005.
- [31] J. Ren, Y. Lai, and J. Gao, "Exploring the influence of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical properties of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 175, pp. 277-285, 2018.
- [32] The Concrete Countertop Institute, "The importance of water/cement ratio in concrete countertop mix design," 2019. [Online]. Available: <https://concretecountertopinstitute.com/free-training/the-importance-of-water-cement-ratio-in-concrete-countertop-mix-design/>, Accessed on: 6 October 2019.
- [33] M. Ivanov and O. Shenderova, "Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils," *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 21, pp. 17-24, 2017.
- [34] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and C. M. Tam, "Carbonation around near aggregate regions of old hardened concrete cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, pp. 1180-1186, 2005.
- [35] E. Lake, "Van Der Waals Forces & Static Electricity: How They Affect Bacillus Spores," 2008. [Online]. Available: <https://www.anthraxinvestigation.com/SporeInteraction.html>, Accessed on: 6 October 2019.



# Üniversite Yerleşkesi Çevresinde Trafik Durumunun İncelenmesi ve Alternatif Çözüm Önerileri: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü Örneği

## Investigation of Traffic Conditions Around the University Campus and Suggestions for Alternative Solutions: The Case Study of Istanbul University Cerrahpaşa Avcılar

Ahmet Sertaç Karakaş<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi Rektörlüğü, [skarakas@istanbul.edu.tr](mailto:skarakas@istanbul.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0840-2878>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 28 Kasım 2022  
Revizyon 25 Ocak 2023  
Kabul 19 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Ufuk yılı,  
Trafik etüdü,  
Ulaşım ağı,  
Simülasyon,  
Baz senaryo,

### ÖZ

Büyükşehirlerde artan nüfus beraberinde barınma, eğitim, ulaşım vs. birçok ihtiyaç parametrelerini doğurmaktadır. Yerleşik düzende olan alanların üniversite ihtiyaçlarını karşılamak için 24 saat aktif yaşamın sürdüğü kampüs alanlarında ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle kampüs ihtiyacının karşılandığı alanlarda kentsel ulaşım ağı koşullarında da gerekli iyileştirmelerin yapılması ve ilerideki nüfus ve eğitim kapasite koşulları dikkate alınarak senaryoların geliştirilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla eğitim alanlarına kolay ulaşılabilirliğin sağlandığı konforlu ve güvenilir yol ağlarının oluşturulması önemlidir. Yol güzergahlarında aşırı trafik yoğunluğu daha fazla yakıt tüketimi, karbondioksit salınımı ve çevresel gürültü düzeyinde artış gibi problemlere yol açmaktadır. Geliştirilen modeller ile kentsel ölçekte kampüs ve yerleşim alanlarında yol ağları oluşturularak trafik problemlerine çözüm önerileri getirilmesi, otopark ihtiyaçlarının karşılanması, trafik akışının sağlanması, yayaların güvenli bir şekilde ulaşım imkanının sağlanması gerekir. Bu çalışmada İstanbul Avcılar İlçesi üniversite kampüsü alanı ve çevre bağlantı yollarında meydana gelen trafik yoğunluğu dikkate alınarak geliştirilen senaryolarla, ileriye yönelik tahminlerde trafik sorunlarının ortadan kaldırılmasına yönelik alternatif çözüm önerileri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada önceden belirlenen bir ufuk yılına göre gelecekteki potansiyel trafik akışını ölçmek için karmaşık trafik yöntemleri tasarlanmıştır. Sonuç olarak farklı ulaşım planlaması ve araç modellerinin trafiğe olumlu katkı sunacağı düşünülmektedir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 28 November 2022  
Received in revised form 25 January 2023  
Accepted 19 March 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

Horizon year,  
Traffic study,  
Transportation network,  
Simulation,  
Base scenario,

### ABSTRACT

The increasing population in metropolises brings together with it housing, education, transportation etc. gives rise to many need parameters. In order to meet the university needs in settled regions, there is a need for campus areas where active life is maintained 24 hours a day. Especially in areas where campus needs are met, necessary improvements should be made in urban transportation network conditions and scenarios should be developed considering future population and education capacity conditions. Therefore, it is essential to create comfortable and reliable road networks that provide easy access to training areas. Excessive traffic density on highway routes causes problems such as higher fuel consumption, carbon dioxide emissions and increased environmental noise levels. With the models developed, it is necessary that road networks should be created in campus and residential areas on an urban scale, offering solutions to traffic problems, meeting parking needs, ensuring traffic flow, and safe transportation for pedestrians. In this study, alternative solutions have been proposed for the elimination of traffic problems in future predictions with scenarios developed by taking into account the traffic density occurring in the university campus area and peripheral connection roads outside the historical peninsula of Istanbul. In the study, complex traffic methods are designed to measure the potential future traffic flow according to a predetermined horizon year. As a result, it is thought that different transportation planning and vehicle models will contribute positively to traffic.

Doi: 10.24012/dumf.1210882

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Dünyada büyük kentlerin en büyük sorunlarından biri artan nüfus paralelinde gelişen barınma ve ulaşım altyapı eksikliğidir. Şehirlerin her geçen gün nüfusla birlikte artan yapı stoğu ve ulaşım ağı ihtiyacı, talepleri karşılayacak şekilde planlanmalı ve ileride ortaya çıkabilecek sorunların bertaraf edilmesi gerekmektedir. Yeni yerleşim alanlarının oluşması, kent ölçeği planlamasında sağlık ve eğitim tesislerinin de plan çerçevesinde değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle büyük kentlerde eğitim amaçlı kampüs alanlarının planlanmasında yapı stoğu ile birlikte mevcut trafik ağının iyileştirilmesi ve kolay ulaşılabilirliğin sağlanması için mevcut yollar, trafik, nüfus potansiyeli ve ilçe merkezleriyle kampüs alanlarının birbirine entegre olabilecek şekilde değerlendirilmesi esastır. Bu bağlamda ufuk yılı ve mevcut alanlardaki trafik etüdüleri dikkate alınarak baz senaryolar geliştirilip ileriye yönelik senaryolar oluşturularak ulaşım ağı belirlenmelidir. İleriye yönelik tahminlerde, çevresel faktörler göz önünde bulundurularak trafik kaynaklı gürültü kirliliği ve kısıtlı hammadde imkanları nedeniyle trafik sıkışıklığının yol açtığı enerji kayıplarının önüne geçilmesi, sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmelidir. Çalışma kapsamında İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Avcılar yerleşkesi durum çalışması olarak dikkate alınmış, ulaşım ve trafik analizlerine yönelik değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. İstanbul nüfus potansiyeli yoğunluğu ile Avrupa'nın en büyük şehirlerinden biridir. Dünya ölçeğinde ise 21. sırada yer almaktadır. Dolayısıyla kent ölçeğinde ihtiyaçlar her geçen gün artmaktadır. Artan ihtiyaçlar beraberinde birtakım sorunları da getirmektedir. En büyük sorunlardan biride trafikte artan taşıt sayılarının yol açtığı trafik sıkışıklığıdır. Bu duruma kısıtlı otopark imkanlarının eklenmesiyle, kentsel planlama ölçeğinde trafikte ciddi sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Trafik sıkışıklığı beraberinde çevresel gürültü, fosil yakıtların neden olduğu çevre kirliliği, kısıtlı hammadde kaybı ve enerji kayıplarına neden olmaktadır. Anılan sorunların oluşmaması için sürdürülebilirlik esastır. Planlamalar yapılırken çevresel problemlere yol açacak faktörlerin ortadan kaldırılarak enerji tüketiminin asgari düzeyde tutulması, sürdürülebilirliğin sağlanması gerekmektedir. Bu bakımdan mevcut durumun ve geleceğe yönelik planlanmasında mevcut ulaşım ve trafik analizlerinin gerçeği yansıtacak şekilde yapılması önem arz etmektedir.

Günümüzde birçok sanayileşmiş ülke; güvenlik, sürdürülebilirlik, çevresel etki, trafik tıkanıklıkları ve altyapı sorunları gibi problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Sonuç olarak, karayolları genellikle sağladıkları faydaya karşıt olarak sundukları birçok zorluk açısından ele alınır. Karayolları daima medeniyetin gelişmesine önemli katkı sunmaktadır [1].

Mevcut trafik analiz mekanizmalarının önündeki en büyük zorluk, günümüzün artan trafik ağı hacimlerine çözüm önerileri getirmektir. Sıkıştırılmalı trafik analizinin temel fikri, trafik özelliklerini sıkıştırmak ve trafik analizi

işlemlerini ham trafik özellikleri yerine bu tür sıkıştırılmış özellikler üzerinde gerçekleştirmektir [2].

Liu vd. [3] yaptıkları çalışmada, görsel ve analitik yaklaşımların birleşimine dayalı olarak şehir çapında trafik analizi için bir yöntem tanıtmıştır. Bu çalışmada kentsel araçlardan toplanan büyük hacimli GPS verileri kullanılmaktadır. Yöntemde sırasıyla trafik durumu, yol bağlantısı, seyahat örüntüleri, tıkanıklık bölgeleri ve trafik akışlarını içeren beş farklı katmandan oluşan bir trafik durum haritası oluşturulmuştur. Haritaya dayalı olarak, sıkışık alanları çevreleyen belirli ulaşım durumları incelenmekte ve tıkanıklığı azaltmanın yolları önerilmektedir. Yöntem, Yunanistan'daki Atina ve Pire'nin toplu metropol bölgesinde değerlendirilmekte ve bu tekniğin trafiği analiz etmedeki potansiyeli ve etkinliği gösterilmektedir. Giderek daha fazla kentsel aracın GPS cihazları ile donatılmasıyla, yöntemin diğer bölgelere kolayca aktarılabilmesi, trafik için güncel, mekansal-zamansal duyarlı, görsel ve analitik bir yaklaşımın benimsenmesinin önünü açmaktadır [3].

Tran vd.[4] çalışmalarında döner kavşak trafik akış koşullarını analiz etmek için deneysel verileri Sint-Truiden (Belçika) şehrinde elde etmişlerdir. Sonuçlar, UAV videolarının sağladığı esnekliğin ve kuş bakışı görünümünün değerini yansıtmaktadır. Bu durum İHA tabanlı trafik analiz sisteminin genel uygulanabilirliğini tasvir etmektedir. İHA kullanımında önümüzdeki yıllarda beklenen önemli artışla birlikte, bu tür çalışmalar hem uygulayıcılar hem de gelecekteki araştırmacılar için faydalı bir kaynak olabilir. Gelecekteki araştırmalar, esas olarak İHA tabanlı trafik uygulamalarının daha fazla uzantılarına odaklanacaktır [4].

Sony & Rao [5] yaptıkları çalışmada özellikle heterojen trafik koşullarında şehir içi yollar için karayolu kazalarının tahmin edilmesi üzerine yapılan araştırmaları incelemiştir. Ayrıca araştırmacılar tarafından mevcut çalışmalarda karşılaşılan sorunları araştırmıştır. Çalışma, şehir içi trafik kazası tahmini söz konusu olduğunda, araştırmacıların heterojen trafik koşullarının karşı karşıya kaldığı mevcut sorunlara daha iyi bir çözüm bulmalarına yardımcı olmaktadır. Bulgular; çalışma hızının ve hız kısıtlamaları ile çalışma hızı arasındaki farklılıkların, kaza sıklık oranını etkileyen temel faktörler olduğunu göstermektedir [5].

Günümüzde, büyük metropol alanlarında karşılaşılan ana zorluklardan biri trafik sıkışıklığıdır. Bu sorunu çözmek için yeterli trafik kontrolü, azaltılmış kirletici emisyonları ve azaltılmış seyahat süreleri dahil olmak üzere birçok çözüm yolları ile fayda sağlanabilir. Otomatikleştirilmiş araçların rotasını optimize etmek için gelecekteki trafik koşullarını tahmin ederek trafiğin durumunu karakterize etmek mümkün olsaydı ve bu önlemler, ilgili problemlerle birlikte tıkanıklığın etkilerini önleyici olarak azaltmak için alınabilseydi, genel trafik akışı iyileştirilebilirdi [6]. Zambrano vd. [6] çalışmalarında, yoğun trafik koşullarında seyahat süresine göre araç yükü açısından şehrin farklı caddelerini karakterize eden İspanya'nın Valencia kentindeki trafik dağılımının deneysel bir çalışmasını gerçekleştirerek çözüm yolları aramıştır [6].

Carli ve ekibi [7] yaptıkları araştırmada kentsel alanlardaki trafik sıkışıklığını değerlendirmek için bir sonda araçları yaklaşımı sunmuştur. Yöntem, İtalya'nın Bari kentinde gerçek bir vaka çalışması ile gösterilmiştir. Otobüsler tarafından üretilen Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) verileri, Genel Paket Radyo Hizmeti (GPRS) aracılığıyla trafik koşullarını analiz etmek için kullanıldığı bir kontrol istasyonuna iletilir. Trafik endeksleri, yollardaki tıkanıklıkların kapsamlı bir görünümünü sağlamak ve uygun kontrol stratejilerini uygulamak için değerlendirilir. Böylece trafik yöneticileri şehirlerde sürdürülebilir hareketliliği verimli bir şekilde yönetebilir ve insanlar trafik ve toplu taşıma performansı konusunda farkındalık kazanabilirler [7].

Trafiğin yoğun olduğu saatlerde, heterojenlik derecesi o kadar yüksektir ki, karayolu tesisinin uygunsuz kullanımına yol açarak, trafik akışının işlevsel ve operasyonel özelliklerini etkiler. Singe vd. [8] çalışmalarında, makroskopik temel diyagramları (MFD'ler) kullanarak Hindistan'ın Tiruchirappalli şehrinde heterojen trafik koşullarına sahip kentsel arter yollarının trafik akış özelliklerini analiz etmeyi önermektedir. Üç temel trafik değişkeni, bir tarafta hız-akış-alan-doluluk ve diğer tarafta hız-akış-yoğunluğu içerir. Bu çalışma, geleneksel olarak takip edilen yoğunluk kavramı yerine bir konsantrasyon performans ölçüsü olarak alan-doluluk dikkate alınarak heterojen trafiği analiz etmek için sistematik bir genel fikir vermektedir. Çalışma, hız-akış-alan-doluluk yöntemi kullanılarak analiz edilen trafik akış özelliklerinin, hız-akış-yoğunluk ile karşılaştırıldığında en yüksek uygunluk parametresi belirleme katsayısı ( $R^2$ ) değerleriyle güvenilir ve tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, bir performans ölçüsü olarak alan doluluk kullanılarak, araç etkileşimleri açısından trafik özelliklerindeki değişiklikler ölçülebilir. Çalışma sonuçları, heterojen trafik koşullarında kentsel ana yollar için makroskopik kapasite modelleri geliştirmek için araştırmacılar, trafik mühendisleri ve uygulayıcılar için faydalı olabilir [8].

Bari ve çalışma arkadaşları [9] araştırmalarında çeşitli trafik sıkışıklığı endekslerini, hız performans endeksi, hacim/kapasite oranı ve trafik yoğunluğu endeksi açısından, 5.7 km uzunluğundaki kentsel karayolu ağında seyahat süresine dayalı olarak değerlendirmektedir. Azaltıcı önlemler, kontrolsüz kavşağı kısmen kontrollü veya sinyal kontrollü bir kavşağa dönüştürerek mevcut trafik talebini karşılamak için önerilmiştir. Bu tür etki azaltma önlemlerinin etkinliğini kontrol etmek için, geliştirilmiş ve iyi kalibre edilmiş bir simülasyon modelinde çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Nokta elemanlarından birinde kanalize kavşak sağlanırken hız performans indeksinin %8.88, iki noktalı elemanlar kanalize kavşağa dönüştüğünde ise %11.52 oranında iyileştiği gözlemlenmiştir [9].

Mikro simülasyon trafik modellemesinin en yaygın uygulamalarından biri, trafik tesislerinin, altyapısının, inşaatının veya yeniden inşasının etkisinin ve ayrıca trafik düzenlemesindeki değişikliklerin gözlemlenen trafik ağına etkisinin analizidir ve henüz planlama aşamasındadır. Ulaştırma sisteminin işleyişinin, diğer

şeylerin yanı sıra, bölgesel ve kültürel olarak koşullandırılan değişken insan davranışından etkilendiği akılda tutularak, mikro simülasyon modeli, ulaşım ağının ve kullanıcılarının yerel özelliklerine göre ayarlanmalıdır. Otković vd. [10] çalışmalarında, Rijeka şehrinin yeni ulaşım ağı üzerindeki kalibrasyon prosedürünün doğrulamasının sonuçlarını, ulaşım ağının önemli ölçüde farklı özellikleri ve sürücülerin farklı davranışları ile sunmaktadır. Bu çalışmada, VISSIM mikro simülasyon modeli, sinir ağları kullanılarak kalibre edilmiş ve Rijeka'nın kentsel trafik ağında belirli bir zamanda seçilen yolun, yaya bölgesine değişimini simüle etmek için uygulanmıştır. Çalışmalarında, Rijeka şehrinin yeni ulaşım ağı üzerindeki kalibrasyon prosedürünün doğrulamasının sonuçlarını, ulaşım ağının önemli ölçüde farklı özellikleri ve sürücülerin farklı davranışları ile değerlendirmiştir [10].

Kent planlamasıyla ilgili birçok faktörün trafik hacmi, araç dağılımı, trafik koşulları vb. üzerinde önemli bir etkisi vardır. Zamansal ve mekansal açıdan şehirlerdeki en önemli gürültü kaynağı yollardır. Bunun için kentsel planlama ile kentsel yoğunluk, kentsel morfoloji, kentsel arazi kullanımı, sokak dağılımı, sokak çevresi ve yeşil alanlar gibi farklı faktörler arasında iyi ilişkiler kurulmaktadır. Bu sayede sürdürülebilir bir şehir bulma gerçeği, en azından gürültü kirliliği açısından daha yakın olabilir. Bu ilişkilerin iyi bir şekilde bilinmesi, kentsel çevrelerin etkili bir şekilde tasarlanması yoluyla bu tür kirliliğin daha iyi tahmin edilmesini, analiz edilmesini ve önlenmesini sağlayacaktır [10].

Dünyadaki her şehirde gürültü kirliliği dağılımı mutlaka kendi tasarımından etkilenir. Ancak, 21. yüzyılın ilk yıllarında bu ilişkiler bazı eserlerde ele alınsa da, bu sorunların sadece bazı yönleri ele alınmış, esas olarak sokak işlevselliğine odaklanılmıştır. Son yıllarda bu konu daha önemli bir gelişmeye ulaşmış ve daha fazla çalışma, kirlilik dağılımları ile şehircilik arasındaki ilişkilerin analizine odaklanmıştır. Bu çalışma, kentsel planlama ile ilişkili olarak gürültü kirliliği değerlendirmesi için mekansal örnekleme metodolojilerinin bir revizyonunu ve kentsel gürültü ile kentsel tasarımın farklı özellikleri arasındaki ilişkileri analiz eden çalışmaların gözden geçirilmesini sağlamaktadır [11].

Bir yol ağındaki insanların seyahat davranışı genellikle sabit değildir ve zamanla değişir. Sürekli olarak belirli bir yol ağını kullanan sürücüler, hedeflerine ulaşmak için en az seyahat süresine sahip daha konforlu, sıkışıklıktan uzak rotalar bulma eğilimindedir. Sürücülerin kısa süreler içinde değişen trafik düzenlerine bağlı olarak hedeflerine ulaşmak için yolları kullanma konusunda daha fazla alternatiflere sahip olduğu, sıkışık ve yüksek yoğunluklu bir kentsel yol ağı bağlamında görülmektedir [12].

Bozkurt ve Karakas [15] çalışmalarında, gözenekli asfalt kaplamaları değişik kalınlıklarda sonlu elemanlar metodu kullanılarak modellenmiş, kaplama kalınlığı artışının Von Mises gerilmelerinde azalmaya, deformasyonda ise artışa yol açtığı, gözenekli asfalt kaplamaların, gürültü seviyesinin düşürülmesine önemli katkısı olabileceğini tespit etmişlerdir [15].

Bozkurt ve Karakas [16] yaptıkları çalışmada, asfalt kaplama karışımında bazik oksijen cürufu kullanımının, düşük ve yüksek frekans değerlerinde ses yutma performansını arttırabileceğini, gözenekli asfalt kaplamalarda kalınlık artışının ise ses yutma performansını düşük frekanslarda iyileştirmesine katkı sunabileceğini belirtmişlerdir [16].

Trafikte aşırı gürültü maruziyeti işitme kaybına, kardiyovasküler problemlere, uyku problemine, fizyolojik ve psikolojik problemlere sebep olabilmektedir.

Literatürde birçok trafik analiz yöntemleri bulunmakla birlikte, en yaygın kullanılan analiz yöntemlerinden biride trafik mikro simülasyonu için kullanılan yazılım S-Paramics yazılımıdır. Çalışma kapsamında S-Paramics yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Önceden belirlenen bir ufuk yılına göre gelecekteki potansiyel trafik akışını ölçmek için farklı trafik yöntemleri incelenmiştir. Sonuç olarak yenileme alanlarında oluşturulan ileriye yönelik trafik modelleme ve simülasyon amaçlı baz senaryolarının, ileride oluşabilecek trafik sorunlarının çözümüne önemli katkı sunduğu görülmüştür.

Çalışmada, İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Avcılar yerleşkesi çevresinde trafik durumu göz önüne alınarak, sabah ve akşam saatlerinde yoğun trafikten kaynaklı sıkışıklık problemlerin önüne geçmek için alternatif ulaşım güzergahları ve yolcu taşımacılığını kolaylaştıracak ulaşım tipleri göz önüne alınarak senaryolar oluşturulmuş ve ileriye yönelik çözüm önerileri dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda 2023 ufuk yılı baz alınarak, artan taşıt ve dolayısıyla ortaya çıkabilecek trafik sorunları önceden belirlenerek, çözüm önerileri getirilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında Üniversite yerleşkesi çevresindeki yer alan mevcut trafiğin yıllara göre dağılımı ve nüfus potansiyeli dikkate alınmıştır. Yerleşke ve çevre bağlantı yollarındaki sabah ve akşam saatlerindeki eşik trafik sayımları gerçekleştirilmiş ve S-Paramics yazılımı kullanılarak trafik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda 2 farklı senaryoyla alternatif güzergahlar ve yolcu taşımacılığında kullanılacak taşıt tipleri belirlenmiş, ileriye yönelik tahminler gerçekleştirilmiştir.

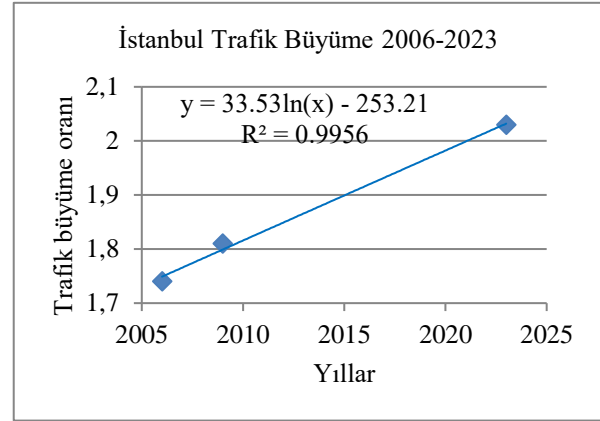
Çalışmada mevcut ve gelecekteki üniversite yerleşkesi ve çevre bağlantı yollarındaki mevcut ve gelecekteki trafikler değerlendirilmiştir. S-Paramics yazılımı kullanılarak araç hareketleri, araç takip ve şerit değiştirme modelleri yoluyla simüle edilmiştir. Özellikle trafiğin yoğun olduğu sabah ve akşam pik trafik sayımları yapılmıştır. En yoğun trafiğin olduğu saatler dikkate alınarak sayımlar yapılmış, trafik analizlerinde en elverişsiz durumlara göre değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.

## Geniş Alan Genel Görünümü Mobilite eğilimleri

Genel mobilite eğilimleri esas olarak kullanıcı davranışından, tarife sistemlerinden, alternatif ulaşım

hizmetlerinin mevcudiyeti kapsamından ve şehirleri karakterize eden ayırıştırıcı diğer bazı faktörlerden etkilenir. Trafik talep artışı ve türel pay ile ilgili birçok varsayım “İstanbul Metropolitan alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı” raporuna dayanmaktadır. Tüm Büyükşehir içinde özel alanlar konusundaki verilerin yetersiz olması nedeniyle söz konusu yerleşke için de yukarıda belirtilen raporda sunulan ortalama veriler kullanılmıştır.

Başvurulan raporun bulgularına ve sonuçlarına dayanarak, 2023 yılında genel mobilite talebinde yaklaşık artış olacağı tahmin edilmektedir. Şekil 1’de İstanbul trafik büyüme modeli verilmiştir.



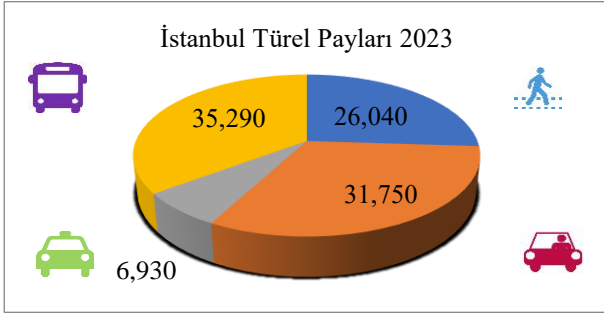
Şekil 1. İstanbul trafik büyüme modeli [13]

Şekil 1’de 2006 ile 2023 yılları arasındaki trafik büyüme oranları gösterilmiştir. Şekil 1’den anlaşılacağı üzere yıllara göre trafik büyüme oranında doğrusal artış görülmektedir. Fonksiyon denkleminde bağımsız x değişkeni yılları, bağımlı y değişkeni trafik büyüme oranlarını temsil etmektedir. R<sup>2</sup> değeri 0.9956 olduğundan yıl ve trafik büyüme oranında kuvvetli bir ilişki vardır. 2006 yılında trafik büyüme oranı 1.74 iken 2023 yılında 2.03 olmuştur. İstanbul’un trafiği yılda yaklaşık % 1.7 artış göstermektedir. 2023 yılında trafik % 16.7 kadar artmış olacaktır.

İstanbul’daki toplu taşıma ağındaki tüm gelişmeler, özellikle sabah ve akşam gerçekleşen yoğun trafik saatlerini karakterize eden sistematik hareketlerde (ev-ofis -ev veya ev- okul- ev) özel ulaşım türlerine olan bağımlılığı azaltma eğiliminde olan ulaşım türü seçimini etkileyecektir.

Şekil 2’de 2023 yılına ait İstanbul türel payları gösterilmiştir. Şekil 2’de gösterildiği gibi türel payın gelecek tahminleri, diğer türler ile karşılaştırıldığında toplu taşıma türüne geçişte yaklaşık % 36 ‘ya ulaşan önemli bir artış olacağını ortaya koymaktadır. Bu artışın başlıca nedenleri iki metro hattının uzatılması (M1 ve M2) ve Yeni Kapı ve diğerleri gibi intermodal (birden çok ulaşım türünün etkin olduğu ya da katıldığı ulaşım ilişkin eylemler bütünü) merkezlerin geliştirilmesidir.





Şekil 2. İstanbul türel payları [13]

Şekil 2'ye göre 2023 yılında, günlük yolculukların yaklaşık % 35'i toplu taşıma ve % 32'si özel araçlar ile sağlanacak.

## Karayolu ağı

İstanbul Metropolitan Alanı, ulusal, kıtasal düzeydeki ekonomik refahı ve önemli coğrafi konumu göz önüne alındığında, halen sürekli olarak büyümektedir. İstanbul'un kentsel alanı, doğuya ve batıya doğru hala genişlemektedir. Bu durum, karayolu ağına da bir "merdiven modeli" içinde benzer bir büyümeye neden olmaktadır. 2007'de yapılan araştırmaya göre toplam ağ uzunluğu yaklaşık 26850 km'dir. Bu uzunluk, Avrupa ve Asya yakası arasında eşit olmayan bir şekilde dağılmıştır. Sırasıyla % 63 (16800 km) ve % 37 (10050 km) şeklindedir.

## Trafik Modelleme ve Simülasyon

### Yazılım

Trafik mikro simülasyonu için kullanılan yazılım S-Paramics yazılımıdır. Bu yazılım, trafik olaylarının mikro dinamik simülasyonu için en gelişkin yazılımdır ve sıkışık ağ koşullarında bile gerçek zamanlı araç davranışını simüle edebilir. Bu yazılım, bağlantılı sinyallere ve operasyonel Kentsel Trafik Kontrol (UTC) sahip durumlar için doğru trafik akışı modellemesi amacıyla dinamik geri bildirim ile birlikte, alan genelinde bir araç yönlendirmesini sunmaktadır. Mikro-simülasyon modelleri münferit araçların hareketlerini resmeder ve ağa girdikleri zamandan, ağdan çıktıkları zamana kadar onları takip eder. Çeşitli modeller ile kontrol edilen münferit araçların davranışı ve genel trafik performansı, modelin sonuçlarını etkileyen sürücü ve araç yeteneklerine bağlıdır. Belirli bir senaryonun işlenebilirliğini ve etkinliğini bir dizi genel ağ performansı sonucu vasıtasıyla belirlemek artık mümkün olur [14].

### Model yapısı

"PARAMICS", PARAllel MICROscopic Simulation (Paralel Mikroskopik Simülasyon) kelimelerinin kısaltmasıdır. Ana model yelpazesi üç modülden oluşmaktadır. Üç bileşen şunlardır:

- Modelleyici: Temel animasyon ve simülasyon aracı
- İşlemci: Birden çok senaryo için toplu analiz aracı
- Analizör: Post- simülasyon veri analiz aracı

## Simülasyon algoritması

S-Paramics yazılımında araç hareketleri, araç takip ve şerit değiştirme modelleri yoluyla simüle edilir. Bu modeller, sürücü- araç-birimin hedef ilerlemeye ve hızlara ulaşma arzusuna dayalıdır. S-Paramics yazılımında münferit araç hareketleri araç takip, aralık kabul ve şerit değiştirmeyi temsil eden üç adet interaktif model tarafından yönetilir. Taşıt dinamikleri nispeten basittir ve bir sürücünün davranışı karışımı ile aracın fiziksel ve kinematik (örneğin boyut, hızlanma/yavaşlama) özelliklerine dayalı bazı sınırlamaları birleştirir [14].

## Yükletim yöntemleri

Modelde, araçların başlangıç noktasından varış bölgelerine en az maliyetli güzergahları kullanarak seyahat ettiği dinamik bir yükletim yaklaşımı kullanılır. Yükletim tekniği, her bağlantı genelleştirilmiş bir maliyet fonksiyonu ile ilişkilendirilerek elde edilir. Bu fonksiyon, otoparka (eğer modelde mevcut ise) geliş/ gidiş yürüyüşü, başlangıç noktası ile varış noktası arasındaki mesafe ve yolda karşılaşılabilecek tüm geçiş ücretleri dahil olmak üzere yolculuğu tamamlamak için harcanan zamanı hesaba katar. Maliyetler her bağlantı için belirtilir ve Formül 1'deki biçimi alır:

$$\text{Maliyet} = a * T + b * D + c * P \quad (1)$$

Burada:

a: dakika cinsinden zaman katsayısıdır, bu çalışmada 1'e eşittir.

b: 'km başına dakika' cinsinden mesafe katsayısıdır, bu çalışmada 0.34'e eşittir

c: 'parasal maliyeti başına dakika' cinsinden ücret katsayısıdır, 0'a eşittir [14].

## Baz Senaryo Model Ağı

Baz model senaryosu mevcut koşullardaki çalışma alanını temsil eder. Baz modeli, gözlenen trafik sayımlarına karşı trafik- simülasyon modelinin trafik akışı çıktısını kalibre etmek için yapılmış ve çalıştırılmıştır. Başka bir deyişle modeldeki simüle edilmiş trafik akışlarının, trafik etüdünde toplananlara uyduğundan emin olmak içindir. Söz konusu uyum bir kez oluşturulduğunda, model daha sonraki senaryolar için güvenle kullanılabilir.

Trafik simülasyon ağının yapımı içinde yer alan ilk adım, gerçek fiziksel yol sisteminin idealize edilmesini işaret eder. Bu sistem; bağlantılar, düğümler ve bir bölge sisteminden oluşan ideal bir bilgisayar ağına dönüştürülmüştür. Prosedür, modellenmiş ağ içindeki

araç yolculuklarının, incelenmiş bağlantı hacimleri ve kavşaklardaki dönüş hareketi sayımları temelinde başlangıç noktası / varış noktası tahminini içerir [14].

## Analiz Sonuçları ve Tartışma

### Talep analizi

Talep analizine göre düşünülen kampüs alanı etrafında, efektif olarak günlük 15.400 kullanıcı hareket halindedir. Toplam günlük seyahat miktarı 38.500'dür. Her bir kullanıcı başına 2.5 dahili seyahat görülmektedir. Pik saatleri süresince 1750 kullanıcı yer almaktadır. TPL kullananların günlük 11.550 olup, % 30'u kampüs içi kullanımdır. Kampüs ve bağlantı yolları arasındaki kullanıcıların kampüse en kısa sürede ve herhangi bir trafik engeliyle karşılaşmadan en kolay şekilde ulaşım sağlanması, hedef olarak belirlenmiştir. Özellikle kampüsün Küçükçekmece gölü ve E-5 (D100) karayolu arasında kalması nedeniyle erişim ağları kısıtlıdır. Dolayısıyla kullanıcıların kampüse ulaşımının en asgari trafik düzeyinde kısa zaman zarfında ulaşımını temin etmek önem arz etmektedir. Bu durumun sağlanması için mevcut trafik durumu dikkate alınarak, farklı senaryo modelleri geliştirilerek, kayıp zamanın önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda taşıt ve yaya yolları birbirinden ayrılarak, D100 karayoluyla kesilen yaya hareketinin sağlanması için yaya üst geçit modeli alternatifleri kullanılmıştır [14].

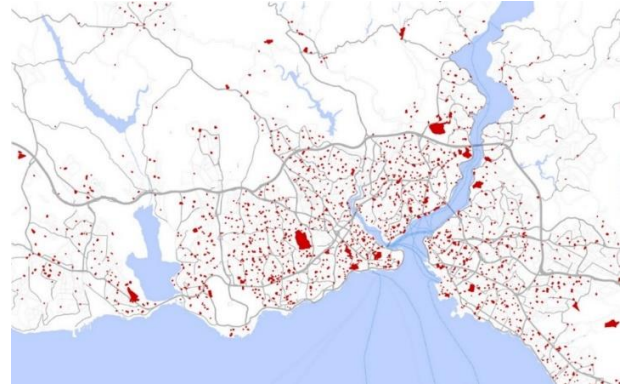
### Talep analizleri

- % 30 Çağdaş günlük faktör (hastalık / devamsızlık)
- 15.400 Efektif günlük kullanıcılar
- 2.5 Kullanıcı başına dahili seyahat
- 38.500 toplam günlük yolculuk
- % 30 iç kullanım TPL
- 11.550 TPL için günlük kullanıcı
- 1750 pik saat kullanımı

### Geniş alan analizi

İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı'na göre, 2023 yılında genel mobilite talebinde artış olacağı tahmin edilmektedir. Trafik artış oranı yıllara göre lineer artış göstermektedir. Özellikle eğitim alanlarının bulunduğu bölgelerde eğitim yılı boyunca, sabah ve akşam pik saatlerinde ciddi trafik artışları görülmektedir. Eğitim alanlarının yoğun olduğu bölgelerde trafik kendini daha fazla hissettirmektedir.

Şekil 3'te İstanbul'da yer alan eğitim alanlarının konumları belirtilmiştir.



Şekil 3. İstanbul eğitim bölgeleri geniş alan analizi [13]

Şekil 3'te İstanbul'daki eğitim hizmetleri haritasına göre, Suriçi bölgesinde yoğun bir eğitim alanı yer almasına rağmen daha sonra doğu ve batı doğrultusunda yatayda eğitim alanlarında artışlar olduğu görülmektedir.

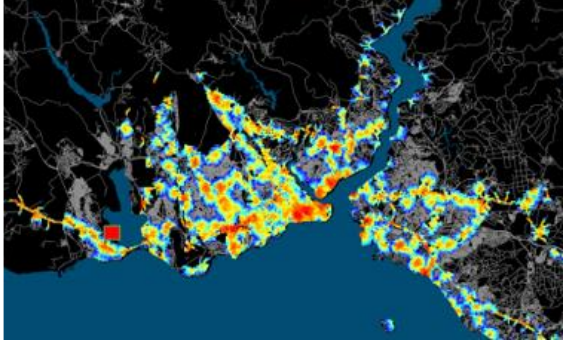
Şekil 4'te toplu ulaşım araçlarıyla 120 dakikalık seyahat süresi boyunca ulaşılacak eğitim bölgeleri güzergahı yer almaktadır.



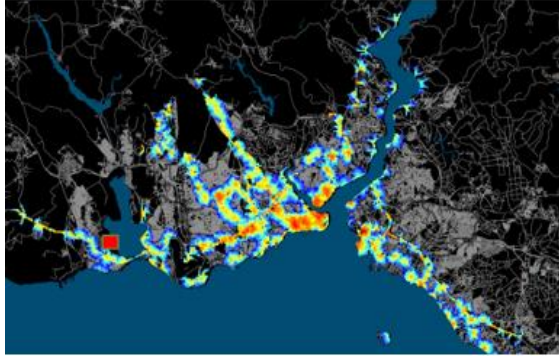
Şekil 4. Planlanan durum izokronal analiz (120 dakika toplu taşıma) [14]

Şekil 4'te 120 dakikada toplu ulaşım araçları ile planlanmış yerler için ulaşılacak alanlar gösterilmiştir. Avcılar yerleşkesi Marmara Denizi ve Küçükçekmece Gölü arasında yer alan bir yerleşke olduğundan, ana yollar açısından yoğun geçiş güzergahı kısmında yer almaktadır.

Şekil 5'te mevcut durum ve planlanmış duruma göre toplu taşıma erişilebilirlik düzeyi (PTAL) analizi sonuçları gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5. PTAL analizi mevcut durum (a), planlanmış durum (b), [14]

Şekil 5'te PTAL trafik durum analizine göre; mevcut durum bakımından en yoğun alanların suriçi bölgesi ve kıyı şeridi boyunca trafik artış bölgelerinin olduğu görülmektedir. Avcılar yerleşkesi sahil ve D100 karayolunun birleştiği yol güzergahı kenarında yer almasından dolayı bu bölgelerde sabah ve akşam saatlerinde trafik yoğunluğu olması kaçınılmazdır.

### Proje alanı analizleri

Kentsel fonksiyonların dağılımı bakımından eğitim kampüs alanının Marmara Denizi ve Küçükçekmece Gölü arasında, D100 karayoluna paralel bir durumda yer aldığı görülmektedir. Kampüse toplu ulaşım imkanı D100 karayolu üzerinde metrobüs, yan yollarda ise otobüs, araba ve dolmuşlarla sağlanmaktadır. Yayaaların dönüş yolunda toplu ulaşım araçlarına ulaşması, yaya yolu ve yaya köprüleri ile temin edilecektir. Oluşturulan senaryoda yonca tipi yol seçilerek, otoyolun yan yollara kolay bağlantısı sağlanacaktır. Senaryoda anayollar otoyolu altgeçitle keserek, kampüsten Avcılar ilçe merkezine kolay ulaşım temin edilecektir. Ayrıca yaya yolu ve köprüleri oluşturularak otoyol üzerinden yayalarında ilçe merkezine kolay ulaşımı sağlanacaktır.

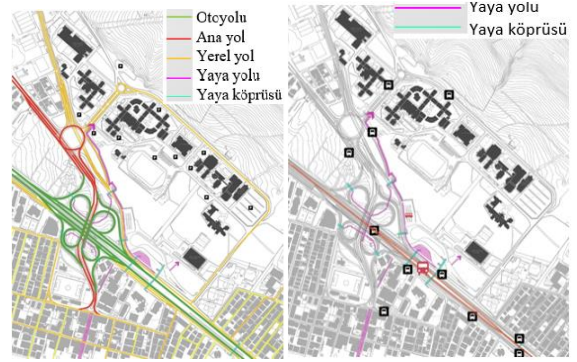
Şekil 6'da proje alan analizleri dikkate alınarak ilgili kampüsteki kentsel fonksiyon dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 6. Fonksiyon dağılım analizi [13].

Şekil 6'da yeşil alanlar park, kırmızı alanlar eğitim, sarı alanlar sağlık ve siyah alanlar ibadet merkezleri olarak gösterilmiştir. Avcılar yerleşkesi Küçükçekmece Gölüne paralel bir şekilde yer almaktadır. Yola cephe üst ada parseller eğitim binaları olarak kullanılmaktadır.

Şekil 7a'da üniversite kampüsü ve bağlantı yollarıyla ilgili taşıt ve yaya yolları dikkate alınarak yol ağı ve erişim sistemleri ile Şekil 7b'de üniversite kampüsü ve bağlantı alanlardaki yaya ağı gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 7. Yol ağı ve erişim sistemi (a) ve yaya yolu şebekesi (b), [14]

Şekil 7'de ilgili yerleşke çevresinde yer alan yol şebekeleri ve mahallere erişim sistemine göre; yerleşke çevresinde otoyol, anayol ve yerel yolun bulunduğu farklı güzergahlar yer almaktadır. Ayrıca yayaların ilgili yerleşkeye ulaşması için yaya köprüsü ve yaya yolları bulunmaktadır. Yol ağları ve yerleşke arasındaki yolcu trafiğinin ulaşımında, yaya köprüleri ve yaya yolları ulaşım ağı açısından önemli bir yere sahiptir. Şekil 7'ye göre yerleşkeye paralel D100 karayolu üzerinde toplu ulaşım aracı olarak kullanılan metrobüs hattında, yolcuları yaya olarak metrobüsten yaya kapısına kadar olan yolculuk süresi için 750 m'lik yayayolu güzergahı boyunca 10 dakikadan fazla bir zaman harcanmaktadır.

### Trafik Analizleri

Çalışma kapsamında trafik analizleri kampüs ve çevresini üç bölgeye ayırarak gerçekleştirilmiştir. Grup 1, D100 karayolundaki trafik sayımlarını kapsamaktadır. Grup 2, üniversite kampüsünde yer aldığı ilçenin Firuzköy

kısmını, Grup 3 ise ilçenin merkez kısmını baz alarak gerçekleştirilmiştir.

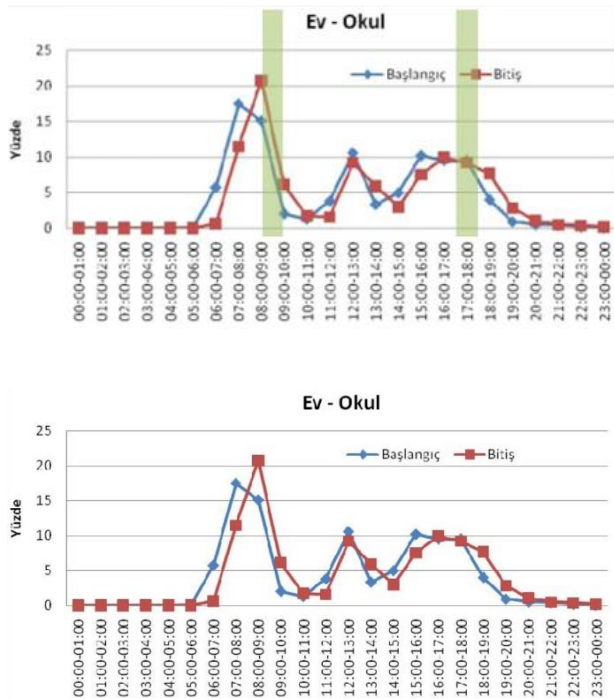
Şekil 8’de trafik sayım bölgeleri gösterilmiştir.



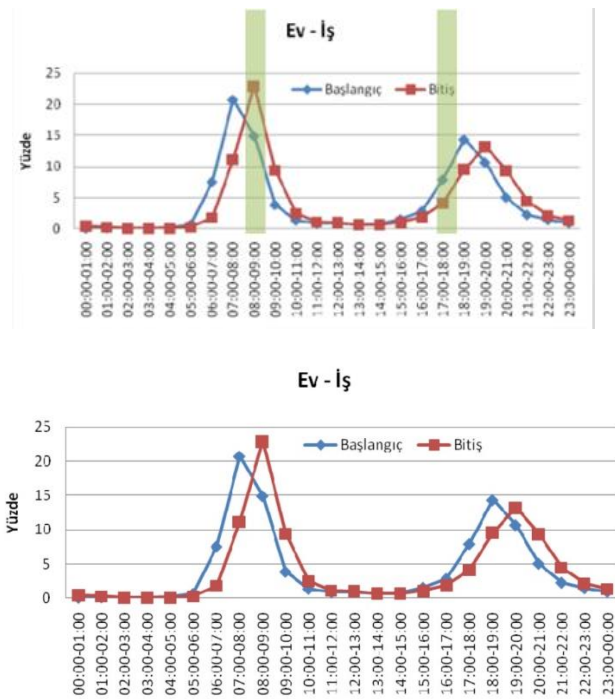
Şekil 8. Trafik analizi sayım bölgeleri [14]

Şekil 8’de ilgili Avcılar kampüs yerleşkesinde trafik sayımı için 3 grupta yapılarak sayımlar gerçekleştirilmiştir. Grup 1 D100 karayolu, grup 2 Fıruzköy güzergahı, grup 3 ise Avcılar Kvs-Namık Kemal Caddesindeki trafik durumu baz olarak dikkate alınmıştır. Genel hareketlilik eğilimleri bakımından ev-okul ve ev-iş ile ilgili gidiş geliş saatleri dikkate alınarak en yoğun hareketliliğin yaşandığı pik durumundaki saatler belirlenmiştir.

Genel hareketlilik eğilimlerine göre ilgili İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı (İUAP) genel zirve saatleri ve aralıkları Şekil 9’da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 9. Genel hareketlilik eğilimlerine göre genel zirve saatleri ve aralıkları (ev-okul (a), ev-iş (b), [14]

Şekil 9’daki genel hareketlilik eğilimlerine göre zirve saatleri ve aralıkları dikkate alındığında aşağıdaki hususlar görülmektedir.

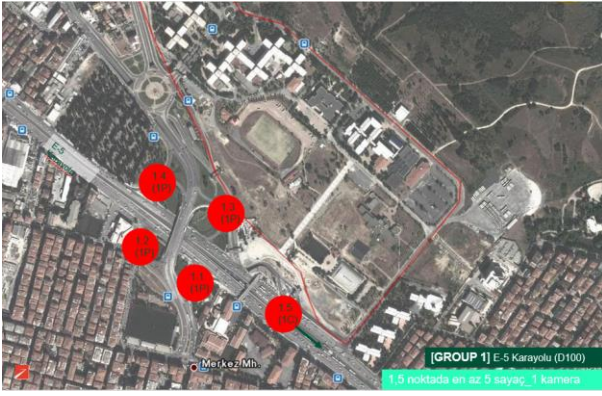
- Ev-iş / ev-okul seyahati amaçlı sabah zirveleri tamamen örtüşmektedir.
- Gün ortası zirveleri, esas olarak ev-okul seyahat amaçlı hareketlerle karakterize edilmiştir.
- Ev-okul seyahati amaçlı akşam zirveleri (16.00-18.00), ev-iş seyahati amacına (18.00-20.00) kıyasla biraz gecikmelidir.

Şekil 9’a göre; yeşil renkli sütunlar trafiğin zirve yoğunlukta olduğu saatleri ifade etmektedir. Trafik eğilimin en yoğun olduğu ev-iş, ev-okul arasındaki ulaşımı içeren sabah saatlerindeki sırasıyla 8.00-9.00 ile 08.00-10.00 saatleri arasında görülmektedir. Akşam saatlerinde ise pik değerlerin öğrenciler için okuldan eve gidişlerde 16.00-18.00 saatleri arasında, çalışanların işten eve dönüşlerinde ise 18.00-20.00 saatleri arasında olduğu görülmektedir.

## Trafik sayımı

D100 karayolu grup 1 olarak ele alınmıştır. Grup 1’de; 1,5 noktada en az 5 sayaç, 1 kamera yerleştirilmek üzere gözlemler yapılmış ve sayımlar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 10’da, D100 karayolu etrafında yer alan sayaç ve gözlem noktaları gösterilmiştir.



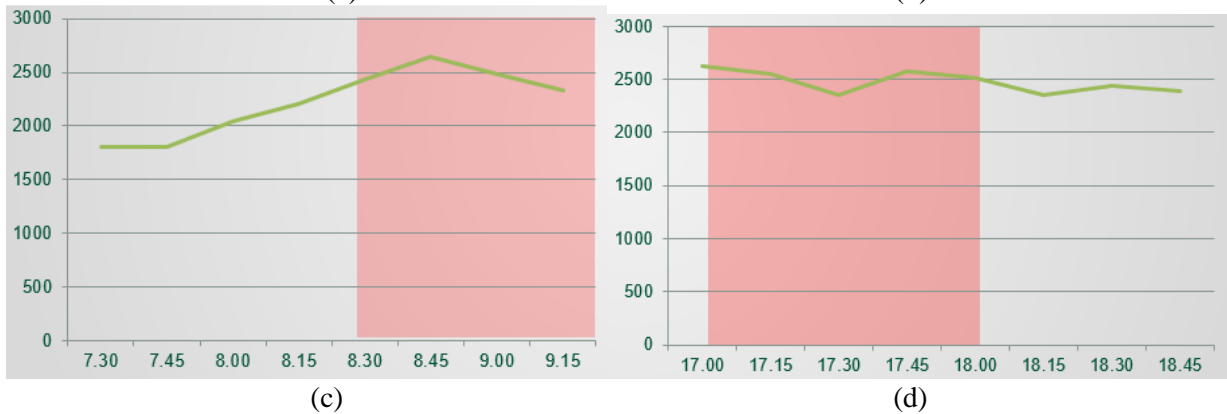
Şekil 10. D100 karayolu sayaç ve gözlem noktaları [14]

### Zirve saatleri analizleri

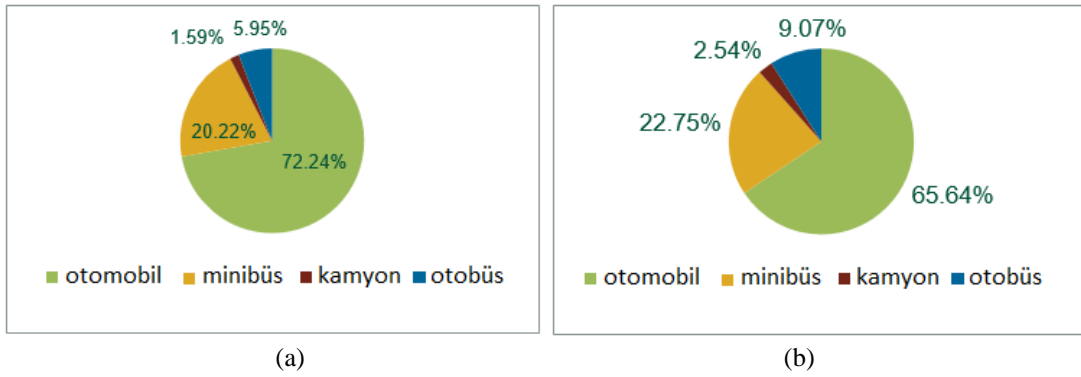
Trafiğin yoğun olduğu üniversite yakınında yer alan D100 karayolu etrafındaki trafik dikkate alınarak, hangi zaman periyotlarında zirve saat değerlerine ulaşılmasıyla ilgili sayımlar gerçekleştirilmiş ve analizler yapılmıştır. Özellikle üniversite güney cephesinde yer alan yol güzergahının D100 karayolu ile olan etkileşimi göz önünde bulundurulmuştur. Bu bölgede yer alan yonca kavşaktaki trafik değerleri ile D100 karayolu yan çıkış tali yol kavşaklardaki trafiğin yoğun olduğu alanlardaki zirve taşıt trafik analizleri yapılmıştır.

Şekil 11'de sabah-aşam trafik zirve saatleri ve sabah-aşam saatlerindeki araç sayım grafikleri sunulmuştur. Şekil 11'e göre, sabah trafiğin en yoğun olduğu saat 8.45 olarak tespit edilmiştir. Akşam saatlerinde ise 17.00-17.45 saatlerinde zirve saat trafik yoğunluğu görülmektedir. Zirve saatlerinde 2500'ün üzerinde taşıt sayımı gerçekleştirilmiştir.

Sabah ve akşam saatlerindeki araç cinsleri ve sayıları Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12'ye göre sabah ve akşam saatlerinde araç sayısı ve tipi bakımından en büyük payı otomobiller oluşturmaktadır, kamyonlar ise en az paya sahip araçlar olarak yer almaktadır. Yapılan taşıt sayımları dikkate alındığında sabah toplam taşıt sayısını 13123, akşam ise 13507 olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümü yapılan taşıt sayımına göre, sabah ve akşam saatlerindeki otomobil oranları sırasıyla % 72.24 ve % 65.64 olarak tespit edilmiştir. En düşük orana sahip kamyon sayıları ise sabah % 1.59, akşam saatlerinde ise % 2.54 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla trafik yoğunluğuna ve sıkışıklığına neden olan taşıt trafiğinde otomobiller sayıca diğer taşıt tiplerine göre oldukça fazla bir yer tutmaktadır.



Şekil 11. Trafik yükü sabah-aşam zirve saatleri (a,b) ve sabah-aşam saatleri araç sayımı (c,d), [14]



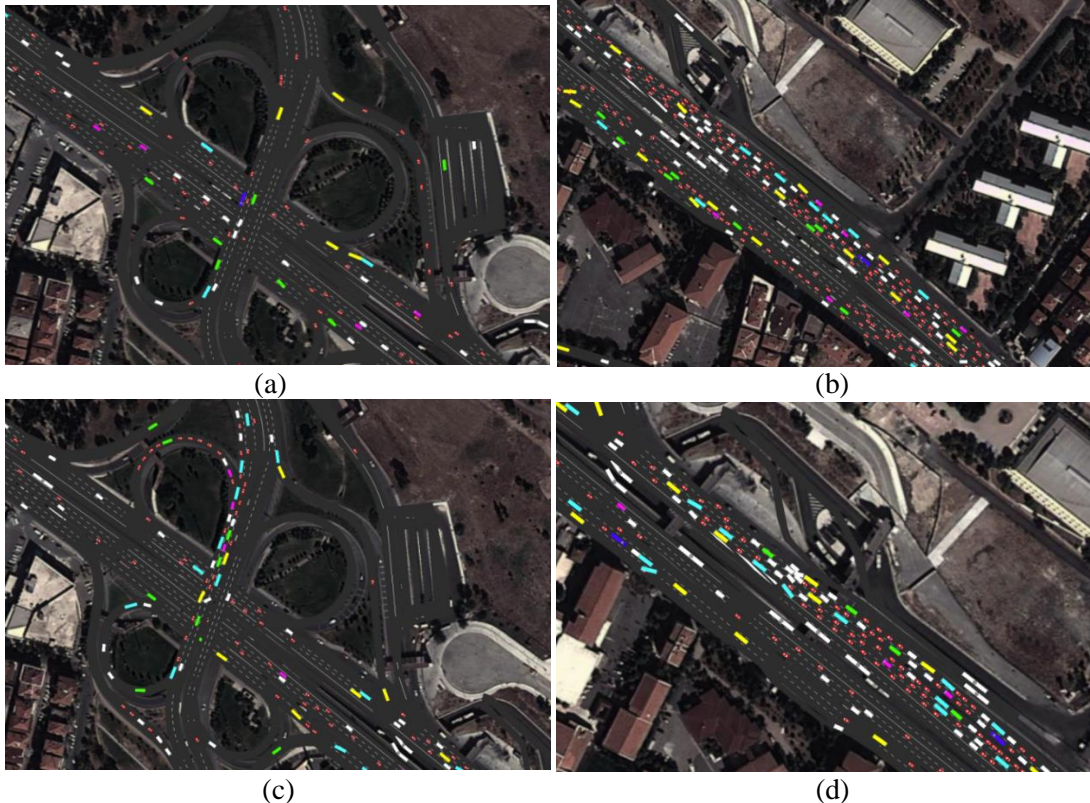
Şekil 12. Sabah (a)-akşam (b) saatleri araç türü dağılımı, [14]

## Trafik Modellemesi

### Temel model şebeke senaryosu

Üniversite çevresi ve D100 karayoluna bakan kısımların şimdiki durum sabah ve akşam saatleri dikkate alınarak trafik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Modeller, sabah ve akşam zirve saatleri taşıt dağılımı ele alınarak yapılmıştır. Sabah zirve saat trafik yoğunluğunun yaşandığı 8.30-9.45 saatleri arasındaki trafik akışı gözlemlenmiştir. Modelleme uygulanırken saat 8.30-9.10 sabah zirve saat trafik yoğunluğu 2 ile 5384 arasındaki veri yerleşimi dikkate alınarak modellemede kullanılmıştır. Temel model şebeke senaryosunda ise akşam iş ve öğrenci çıkışlarının yoğun yaşandığı saat 17.00'den sonraki zaman dilimi dikkate alınmıştır.

Şekil 13'te temel model şebeke senaryosu sabah ve akşam zirve saat taşıt trafik yoğunlukları görülmektedir. Şekil 13a ve Şekil 13b'den anlaşılacağı üzere sabah okul-iş gidiş zirve saatlerinde kampüs çevresi ve D100 karayolu ile tali yollarda yoğun bir trafik akışı gözlenmektedir. Aynı şekilde Şekil 13c ve Şekil 13d'de akşam okul-iş çıkış zirve saatlerine denk gelen zaman aralıklarında kampüs çevresi ve D100 karayolu ile tali yollarda yoğun bir trafik potansiyeli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 13. Temel model şebeke senaryosu sabah zirve saatleri (a,b), akşam zirve saatleri (c,d), [14]

## Şebeke parametre sonuçları

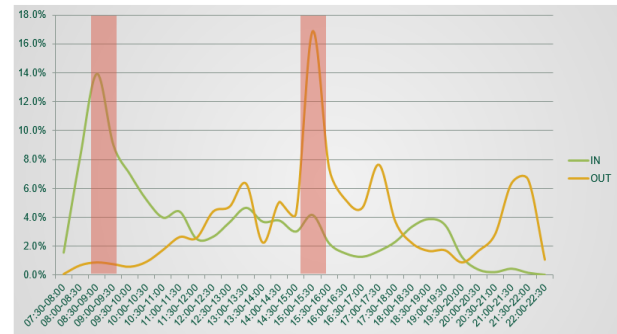
Sabah ve akşam mevcut durum senaryolarında, ağ parametreleri dikkate alınmıştır. Sabah ve akşam trafiğiyle ilgili şimdiki durumlar senaryo edilmiştir. Ağ parametrelerinde toplam simule edilen taşıt sayıları, ağ boyunca toplam taşıt seyahat süreleri, taşıt başına ortalama seyahat süreleri, seyahat eden her bir taşıtın ortalama mesafe aralıkları ve ortalama hızları tespit edilmiştir. Tablo 1’de sabah ve akşam şimdiki durum senaryolarına göre şebeke parametreleri verilmiştir. Tablo 1’den anlaşılacağı üzere simule edilen taşıt sayısı sabah saatlerinde 13378, akşam saatlerinde ise 14310 olarak belirlenmiştir. Ortalama taşıt hızları trafik yoğunluğundan dolayı sabah yaklaşık 23.5 km/sa., akşam ise 17.5 km/sa. olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2 ve Tablo 3’te sırasıyla sabah ve akşam saatlerindeki trafik üretimlerine ait bilgilere yer verilmiştir. Tablo 2 verilerine göre; kısa vadeli senaryo (2023 yılı; metro yapılmadan) sabah 1724 araç/saat, uzun vadeli senaryoda (2028 yılı; metro yapılırca) sabah 1379 araç/saat taşıt trafiği olacağı beklenmektedir. Tablo 3’e göre 2023 yılı kısa dönem akşam zirve saatleri trafik üretiminin metrosuz durumda 1204 olduğu, 2028 yılında metro uygulaması sonrasında ise 963 olacağı dolayısıyla yaklaşık % 20 oranında bir azalma görüleceği tahmin edilmektedir.

## Gelecek Senaryoları Trafik Modellemesi

Gelecek senaryoları belirlenirken üniversitenin mevcut ve gelecekteki öğrenci ve çalışan personel sayılarında dikkate alınmıştır. Ayrıca üniversite yerleşkesinin bulunduğu bölge, İstanbul tarihi yarımada dışında kalan bir alanda ve gelişime açık bir bölgede yer almaktadır. 2014 yılında 15648 öğrenci ve 1565 çalışan personel hacmine sahip kampüste, 2023 yılı sonrası bu oranlarda %37.2 bir artış beklenmektedir. Öğrenci potansiyelinin 25.000-30.000 bandında olacağı tahmin edilmektedir. Söz konusu durumun taşıt trafiğinin yoğun olmasına etkileri olacaktır.

Şekil 14’te sabah-akşam zirve saat faktörüne göre araç giriş ve çıkış saatleri verilmiştir.



Şekil 14. Günlük profil [14]

Şekil 14’e göre; sabah zirve saati faktörü % 11 (1276 araç giriş – 448 araç çıkış), akşam zirve saati faktörü ise % 8 (391 araç giriş-813 araç çıkış) olarak görülmektedir.

Tablo 1. Şimdiki durum sabah ve akşam senaryo ağ şebeke parametreleri [14]

Senaryo	Simule edilen taşıt sayısı (taşıt)	Ağ boyunca toplam seyahat süresi (taşıt*saat)	Taşıt başına ort. seyahat süresi (sn.)	Ağ boyunca toplam seyahat mesafesi (taşıt*km)	Taşıt başına ortalama seyahat mesafesi (m)	Ortalama taşıt hızı (km/saat)
Şimdiki durum (sabah)	13378	637	171	14936	1116	23,46
Şimdiki durum (akşam)	14310	920	231	16043	1121	17,44

Tablo 2. Sabah zirve saatleri araç trafik üretimi [14]

Kısa dönem	Günlük yolculuk	Model paylaşımı	Sabah zirve saat faktörü	Sabah taşıt üretimi	Giriş	Çıkış	Araç giriş	Araç çıkış
Kısa dönem (metrosuz)	62625	%25	%11	1724	%74	%26	1276	448
Uzun önem (metrolu)	62625	%20	%11	1379	%74	%26	1021	359

Tablo 3. Akşam zirve saatleri araç trafik üretimi [14]

Kısa dönem	Günlük yolculuk	Model paylaşımı	Akşam zirve saat faktörü	Akşam taşıt üretimi	Giriş	Çıkış	Araç giriş	Araç çıkış
Kısa dönem (metro öncesi)	62625	%25	% 8	1204	% 33	% 68	391	813
Uzun dönem (metro sonrası)	62625	%20	% 8	963	% 33	% 68	313	650

Mevcut erişim sistemine göre D100 mevcut yol şebekesine bağlantı, üniversite ana giriş kapısından sağlanmaktadır.

Şekil 15'te oluşturulan senaryoya göre 2023 yılı mevcut erişim sistemi, mevcut yol ağı şebekesi ve mevcut trafiğin yeni bypass yoluna olan bağlantıları ile gösterilmiştir. Şekil 15'te; % 5 otoyoldan, % 15 Firuzköy yolundan ve % 30 Bağlar içi yolundan yeni bypass yoluna bağlantılar sağlanarak, trafik yoğunluğunun hafiflemesine önemli katkı sunulacaktır. Şekil 15'ten anlaşılacağı üzere tek güzergahtan (D100 karayoluna cephe yan yol) üniversiteye sağlanan bağlantı nedeniyle oluşan trafik sıkışıklıkları, senaryoya göre alternatif bypass yolların oluşturulması ile azalacaktır. Özellikle üç farklı güzergahtan sağlanan bağlantı bypass yolların, D100 karayoluna paralel kampüs içi arka cephedeki yol güzergahına bağlanması ve bu güzergahın aktif kullanılması ile mevcut duruma göre % 50 oranında trafikte bir rahatlama sağlanacaktır.

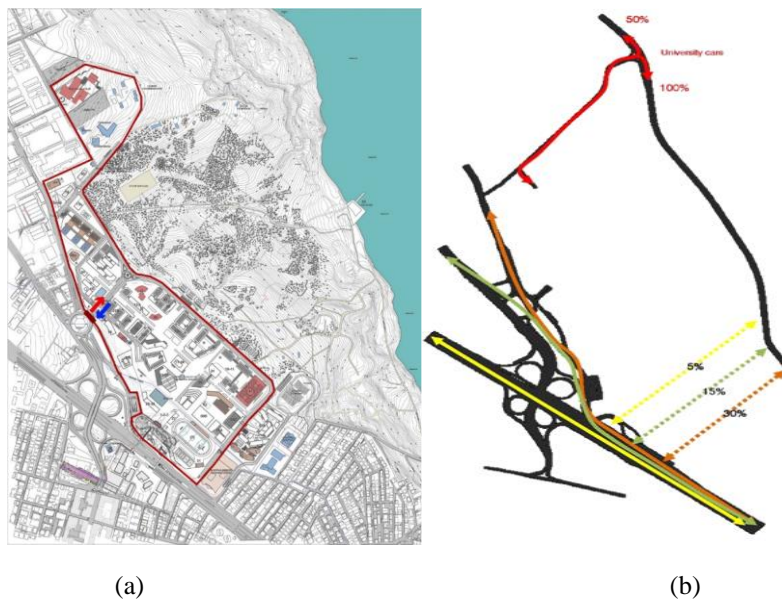
Proje senaryo çalışmaları, ileriye yönelik tahminler ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 2023 yılı ve 2028 yılı taşıt ve nüfus yoğunlukları tahminleri yapılarak, üniversite ve ana yol güzergahları trafik yoğunlukları tahminleri yürütülmüştür. 2023 yılı metro faaliyetlerinin yürütülmediği durum dikkate alınarak üniversite yeni

giriş kapıları ve bypass yolları düşünülerek, trafik akış yoğunluğunun düşürülmesi hedeflenmektedir.

Üniversite kampüs yaya ve taşıt hareket kabiliyetlerinin azaltılmamasına yönelik alternatif üniversite kampüs giriş alan sayıları artırılarak, nüfus ve bunun paralelinde artacak taşıt trafiği yoğunluğunun azaltılmasına yönelik çözüm yolları aranmaktadır.

Şekil 16'da 2023 yılı metro çalışmaları öncesi üniversite alternatif kampüs yeni giriş kapısı ve bağlantısı yaya-taşıtlar ve trafik yoğunluk alanları gösterilmiştir. Şekil 16'ya göre; üniversite ve çevresi kısa dönemdeki yeni erişim sistemi kesintisiz trafik ile talep üniversite trafik yoğunluğunun azalacağı tahmin edilmektedir. Şekil 16'daki senaryodan anlaşılacağı üzere kampüse erişim noktalarının ikisinin D100 karayoluna paralel yan yol ve diğerinin ise arka bağlantı yan yoldan sağlanması ile kampüste tek bir yerden sağlanan erişim noktası nedeniyle meydana gelen trafik yoğunluğunun önüne geçilecektir.

Şekil 17'de ise 2028 yılı metro çalışma faaliyetlerinin tamamlandığı varsayılarak, D100 karayolu ve üniversite kampüsü alternatif giriş kapıları alanlarındaki trafik yoğunlukları gösterilmiştir.



Şekil 15. Mevcut trafiğin bir değişiklik yapmadan (a) ve yeni bypass üzerinde yeniden dağılımı (b), [14]



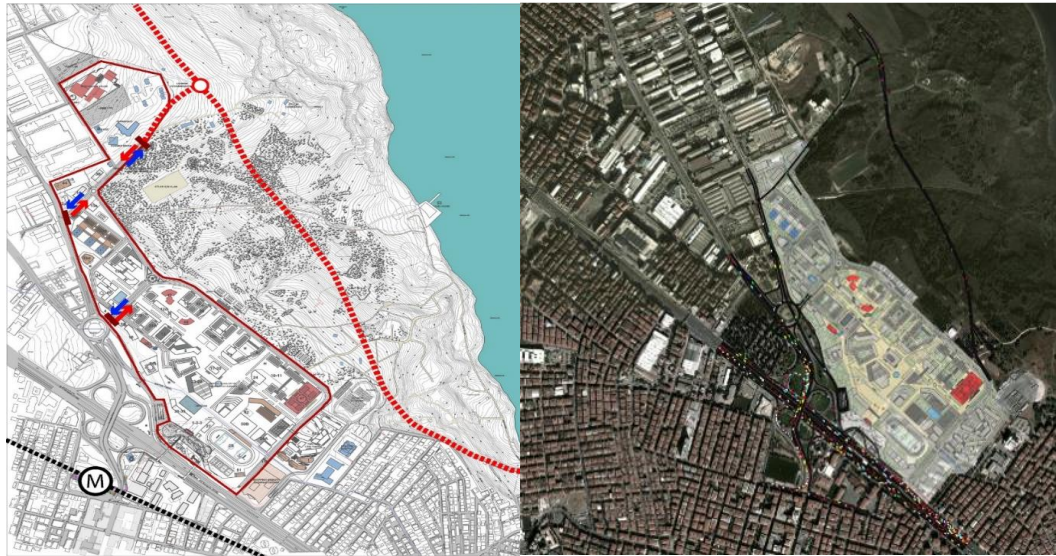
Şekil 17'ye göre üniversite ve çevresi yeni erişim noktaları ve metro sonrası kesintisiz trafik ile talep üniversite yoğunluğunun azalacağı tahmin edilmektedir.



(a)

(b)

Şekil 16. 2023 yılı yeni giriş-çıkış kapısı ve bypass noktaları ile trafik proje senaryosu 1 (metro öncesi), [14]



(a)

(b)

Şekil 17. 2028 yılı yeni giriş-çıkış kapısı ve bypass noktaları ile trafik proje senaryosu 2 (metro sonrası), [14]

Şekil 16a ile Şekil 17a birlikte karşılaştırmalı olarak analiz edildiğinde, Şekil 16a'da üç farklı kampüs girişi ile trafik yoğunluğunun yayılarak azaltılması hedeflenmiştir. Şekil 17a'da ise ilave olarak 2028 yılı metro çalışmaları faaliyetlerinin tamamlanacağı, metro durağının kampüse yakın bir noktada olmasından ötürü, öğrencilerin toplu taşıma ağında metroyu kullanabileceği ve bu durumun trafik yoğunluğunun azalmasına önemli katkı sunacağı düşünülmektedir. Ayrıca metrobüs ana merkez ve park alanları Avcılar yerleşkesi içinde bulunmaktadır. Metrobüs toplu ulaşım ana durağının Avcılar yerleşkesi ana girişi yakınında yer almasından dolayı trafik

yoğunluğu yaşanmaktadır. 2028 yılında metronun aktif hale getirilmesi ve öğrencilerin toplu ulaşım aracı olarak metroyu kullanması ile birlikte hem metrobüs yoğunluğunda hem de trafik yoğunluğunda azalma olacağı öngörülmektedir.

Akşam zirve saatlerine ait modelleme parametreleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Modelleme parametreleri (akşam zirve saatleri), [14]

Senaryo	Simule araç (taşıt sayısı)	Yol ağı toplam seyahat zamanı (taşıt/sa.)	Taşıt başına ortalama seyahat zamanı (sn.)	Yol ağı üzerindeki toplam seyahat mesafesi (taşıt*km)	Taşıt başına ortalama seyahat mesafesi (m.)	Ortalama hız (km/sa.)
Temel model	13740	1126	295	15861	1154	14,08
Faaliyetsiz 2023 yılı	14019	1737	446	15500	1106	8,93
Referans 2023 yılı	13868	1533	398	15466	1115	10,09
Proje senaryosu 2023 yılı	16728	950	204	19386	1159	20,40
Proje senaryosu 2028 yılı	16912	954	203	19447	1150	20

Tablo 4'e göre simule taşıt sayısında 2023 yılı proje senaryosuna göre yaklaşık % 21,7, 2028 yılı proje senaryosuna göre ise yaklaşık % 23 artış olacağı varsayımı ve buna bağlı olarak alternatif yol güzergahları senaryoları dikkate alındığında, yol ağı toplam seyahat zamanında sırasıyla % 16 ve % 15 azalma görülecektir. Bu durum taşıt başına ortalama seyahat zamanında yaklaşık % 31 daha az bir zaman harcanmasına neden olacaktır. Trafikte harcanan sürenin azalması ile yakıt tüketiminden tasarruf sağlanarak daha az gürültü kirliliği ve egzoz gazından kaynaklı çevresel kirliliğinin önüne geçilecektir.

### Tartışma ve Sonuç

Üniversite kampüsünün bulunduğu saha, İstanbul İli sınırları içinde bulunmaktadır. İstanbul İli 2021 yılı nüfus sayımına göre 15.840.900 nüfusa sahip olup, önceki yıllara göre nüfus artış hızı % 2,45'tir. Nüfus yoğunluğu 2982 /km<sup>2</sup>'dir. TÜİK verilerine göre toplam taşıt sayısı 2022 yılında 4.688.022'ye ulaşmıştır. Üniversite kampüs sahası Avcılar İlçesinde yer alıp, nüfus yoğunluğunun en fazla olduğu Esenyurt ve Küçükçekmece ilçeleri arasında yer almaktadır. Yerleşkenin D100 karayoluna cephe olmasından dolayı konum itibarıyla en fazla taşıt yoğunluğunun bulunduğu güzergah alanı içinde kalmaktadır. Nüfus yoğunluğu ve dolayısıyla taşıt sayısının artması, mevcut yol güzergahı üzerinde trafik yoğunluğuna neden olmakta ve erişim ağlarına ulaşımı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum ulaşımında hem zaman kaybı hem de enerji sarfiyatındaki artışla birlikte çevre kirliliğinin oluşmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla maddi yönden de ülke ekonomisine olumsuz etkilerinin olması kaçınılmazdır. Özellikle trafik yoğunluğunun azaltılmasına yönelik çözüm önerileri ile karbondioksit salınımı ve trafik gürültüsünün azaltılması sağlanarak, çevresel kirliliğin yol açtığı problemlerin önüne geçilecektir. Bu bakımdan ileriye yönelik tahminlerde

oluşturulan senaryolar, problemlerin etkilerinin ortadan kaldırılmasına yardımcı olacaktır.

Çalışmada model olarak Avcılar yerleşkesinde yer alan en eski üniversite kampüslerinden biri baz olarak alınmıştır. Mevcut durum, trafik gözlemsel verileri ve gelecekte olması düşünülen trafik yoğunluk parametreleri tahminleri yapılmıştır. Senaryolar oluşturulurken toplu ulaşımın etkileride göz önünde bulundurulmuştur. Şebeke ağının daha iyi hizmet sunabilmesi artan nüfus ve taşıt trafiği etkilerinin azaltılarak daha problemsiz bir seyahat ve üniversiteye erişimin kolaylaştırılması için aşağıda verilen hususların dikkate alınması gerekmektedir.

- 1- Üniversite kampüs girişinde yer alan trafik yoğunluğunu azaltmak için alternatif giriş kapı noktaları düzenlenmelidir.
- 2- Kampüs kullanıcılarının giriş ve çıkış yaya ulaşım erişebilirliğinin sağlanması için üst ve alt yaya geçiş köprülerinin oluşturulmasına olanak sağlanmalıdır.
- 3- Trafik sıkışıklığının etkilerini azaltmak için alternatif yol güzergahlarının oluşturulması elzemdir.
- 4- Trafik yoğunluğunun etkilerini azaltmaya yönelik özel taşıt kullanımını minimize etmek için metro çalışmalarının yapılarak, kullanılmasının cazip hale getirilmesi gerekmektedir.
- 5- Kampüs sahası içinde kullanıcıların zaman kaybı yaşamaması için ring servislerin oluşturulması önem arz etmektedir.
- 6- Çevre dostu elektrikli toplu ulaşım araçları ile bisiklet kullanımının yaygınlaştırılması, çevre kirliliğinin azaltılması yönünde katkı sunacaktır.
- 7- Trafik akışında sürdürülebilirliğin sağlanması ve sıkışıklığın önlenmesi için toplu ulaşım araçlarının özel taşıt kullanımına göre daha fazla yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Proje senaryolarında 2023 ve 2028 yılları dikkate alınarak kampüs içi nüfus ve trafik yoğunlukları tahminleri yürütülmüştür. Trafik yoğunluğu artışı ve üniversite ile çevre yolu ağı şebekesinde kesintisiz ulaşımın sağlanması için çözüm yolları araştırılmıştır. Kampüs içinde ilave iki yeni giriş-çıkış noktaları oluşturulması, yol ağı şebekesinde yeni bypass yol yapılarak yoğunluğun azaltılması ve yeni metro çalışmalarının tamamlanması ile bölgedeki ulaşım da trafik problemlerinin asgari düzeye indirileceği tahmin edilmektedir.

### Teşekkür

Yazar ilgili çalışmada katkılarından dolayı Proger engineering&management firması ile İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı'na teşekkürlerini sunmaktadır.

### Kaynakça

- [1] Mannering, F. L., & Washburn, S. S., Principles of highway engineering and traffic analysis. John Wiley & Sons. (2020).
- [2] Bachechi, C., & Po, L., Traffic analysis in a smart city. In IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence-Companion Volume, 275-282 (2019).
- [3] Liu, F., Andrienko, G., Andrienko, N., Chen, S., Janssens, D., Wets, G., & Theodoridis, Y., Citywide traffic analysis based on the combination of visual and analytic approaches. Journal of Geovisualization and Spatial Analysis, 4(2), 1-17 (2020).
- [4] Tran, M. T., Nguyen, T. V., Hoang, T. H., Le, T. N., Nguyen, K. T., Dinh, D. T., ... & Do, M. N., iTASK-Intelligent traffic analysis software kit. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 612-613 (2020).
- [5] Sony, B., & Rao, C. H., Review and analysis of roadway crash prediction studies on urban roads under heterogeneous traffic conditions. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1197, 1, . 012035 (2021), IOP Publishing.
- [6] Zambrano-Martinez, J. L., Calafate, C. T., Soler, D., Cano, J. C., & Manzoni, P. Modeling and characterization of traffic flows in urban environments. Sensors, 18,7 (2020).
- [7] Carli, R., Dotoli, M., & Epicoco, N., Monitoring traffic congestion in urban areas through probe vehicles: A case study analysis. Internet Technology Letters, 1, 4, e5 (2018).
- [8] Singh, S., Vidya, R., Shukla, B. K., & Moses Santhakumar, S., Analysis of traffic flow characteristics based on area-occupancy concept on urban arterial roads under heterogeneous traffic scenario—A case study of Tiruchirappalli city. In Advances in Water Resources and Transportation Engineering, 69-84 (2021), Springer, Singapore.
- [9] Bari, C. S., Gunjal, T. V., & Dhamaniya, A., A Simulation Approach for Evaluating Congestion and Its Mitigation Measures on Urban Arterials Operating with Mixed Traffic Conditions (2022).
- [10] Otković, I. I., Deluka-Tibljaš, A., & Šurdonja, S. (2020). Validation of the calibration methodology of the micro-simulation traffic model. Transportation Research Procedia, 45, 684-691 (2020).
- [11] Morillas, J. M. B., Gozalo, G. R., González, D. M., Moraga, P. A., & Vilchez-Gómez, R. Noise pollution and urban planning. Current Pollution Reports, 4, 3, 208-219 (2018).
- [12] Prasanga, H. N., & Fernando, P. R. D. Application of dynamic traffic assignment and determine model parameters for urban traffic conditions in Sri Lanka. (2020).
- [13] İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı (İUAP), İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Daire Başkanlığı, Ulaşım Planlama Müdürlüğü, (2011).
- [14] İstanbul Üniversitesi - Avcılar Yerleşkesi Master Plan, Avan ve 1. Etap Uygulama Projeleri Ulaşım ve Trafik Etki Analizi Raporu, (2016).
- [15] Bozkurt, T.S. & Karakas, A.S., Investigation of asphalt pavement to improve environmental noise and water sustainability, Sustainability 2022-11-11, (2022). DOI: 10.3390/su142214901
- [16] Bozkurt, T.S. & Karakas, A.S., Gözenekli asfalt kaplamalarda ses yutma katsayısının modellenmesi: kalınlık ve karışım oranı örneği, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 2022-08-29, (2022). DOI: 10.29109/gujsc.1101133



## Yumuşak Kil zeminlerde Basıncılı ve Basıncısız Gömülü Çelik Boruların Davranışının Karşılaştırılması

### *Comparison of the mechanical behavior of the buried steel pipelines in soft clayey soils under pressurized and non-pressurized conditions*

Hadi Khanbabazadeh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [hk.babazadeh@gtu.edu.tr](mailto:hk.babazadeh@gtu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-7799>

#### MAKALE BİLGİLERİ

##### Makale Geçmişi:

Geliş 11 Aralık 2022  
Revizyon 31 Aralık 2022  
Kabul 6 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

##### Anahtar Kelimeler:

*Gömülü Çelik Borular, Zemin-boru etkileşimi, Yanal atımlı fay, Doğrusal olmayan zemin davranışı.*

#### ÖZ

Deprem sonrası can damarı sistemlerinde oluşan hasarlara bağlı ortaya çıkan maddi ve manevi kayıplar toplumun yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli durumlardan biri olarak bilinir. Deprem kaynaklı fay hareketleri gömülü boru hatları için önemli tehlikelerden biridir. Bu çalışmada, yumuşak kil zeminde gömülü basınçlı ve basınçsız çelik boru hattının doğrusal olmayan sayısal modellenmesi yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, gömülü boru hatlarının uygulamasında yaygın olarak kullanılan X80 çelik sınıfından olan ve tipik çap-kalınlık oranı (D/t) 57,6 olan boru çeşidi ele alınmaktadır. Çalışmada, 90°, 70°, 45° ve 30° olmak üzere dört farklı fay boru hattı kesişme açısı modellenmiştir. Analiz aracı olarak sonlu farklar yöntemini kullanan FLAC3D yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modellemelerden elde edilen sonuçlar, kesişme açısının 90° olduğu durumda hem basınçlı hem de basınçsız borularda yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğunu göstermektedir. Basınçlı borunun yerel burkulması basınçsız boruya göre yaklaşık %20 daha büyük fay hareketinde meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca, sonuçlar, basınç altına olan boru hattının sınır durumları basınçsız duruma göre daha büyük fay hareketlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Fayla 30° açıyla kesişen basınçlı boru %3 sınır durumuna ulaşamamış iken, 70° ve 45° kesişme açılarında fay hareketinde basınçsız boruya göre sırasıyla yaklaşık %8 ve %33 artış meydana geldiği görülmüştür. Sunulan sonuçlar, kalıcı zemin kaynaklı yer değiştirmeye maruz gömülü boru hatlarının performansa dayalı tasarım çerçevesi geliştirilmesinde önemli olacağı düşünülmektedir.

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 11 December 2022  
Received in revised form 31 December 2022  
Accepted 6 March 2023  
Available online 23 March 2023

##### Keywords:

*Soil-pipe interaction, Buried Steel Pipes, Continuous Pipelines, Fault Crossings, Strick-slip fault, Non-linear soil behavior.*

#### ABSTRACT

Loss of life and property because of Earthquake related damages to the lifelines is considered as one the most important conditions affecting the living quality of the societies. Fault movement during the earthquakes is one of the important hazards for the buried pipelines. In this study, the nonlinear numerical analysis of the pressurized and non-pressurized buried steel pipeline in soft clayey soils is applied. To this end, soil-pipeline interaction behavior of the pipeline with D/t ratio of 57.6 and X80 steel grade is investigated. To study the effect of the fault-pipeline crossing conditions, four different crossing angles including 90°, 70°, 45° and 30° has been considered. The applied nonlinear analyses have been performed by a fully nonlinear analysis method based on an explicit finite difference scheme is performed using FLAC3D code. The results show the dominant failure mode for both pressurized and non-pressurized conditions at crossing angle of 90° is local buckling. There is a 20% increase in the fault movement causing local buckling for pipeline under pressurized condition. While the 3% tensile strain limit has not been reached for non-pressurized pipeline at crossing angle of 30°, there is 8% and 33% increase in the fault movement causing this failure limit at crossing angles of 45° and of 30° respectively for pressurized condition. The presented results will play important role in the development of the design methods of the buried steel pipelines under permanent ground deformation condition.

Doi: 10.24012/dumf.1217395

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Türkiye dünyanın en aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya deprem kuşağı üzerinde yer almakta ve ülke topraklarımızın %90'ı deprem tehlikesi altında bulunmaktadır. Deprem sonrası alt yapılarda oluşan hasarlarla bağlı ortaya çıkan maddi ve manevi kayıplar toplumun yaşam kalitesini olumsuz etkileyen önemli durumlardan biri olarak bilinir. Can damarı sistemleri olarak bilinen enerji hatlarında (doğalgaz, petrol, elektrik, su, yol vb.) meydana gelecek hasarlar depremin doğrudan etkilemediği ancak bu sistemlerin devam ettiği bölgelerde ekonomik ve iş-sürekliliği kayıplarına sebep olacaktır.

Araştırmalar, sürekli petrol ve gaz çelik boru hatlarındaki sismik hasarların çoğunun fay hareketleri, heyelanlar, sıvılaşmaya bağlı yanal yayılma gibi kalıcı zemin deformasyonlarından kaynaklandığını göstermiştir [1]. Bu deformasyonlar boru hattı üzerinde yarı statik bir şekilde uygulanır. Bu tür boru hattı hasarları, 1971 San Fernando depremi ve daha yakın zamanda 1995 Kobe depremi, 1999 Kocaeli depremi ve 1999 Chi-Chi depremi gibi birçok depremde gözlemlenmiştir [2]. Kennedy ve diğ. [3-4] boru hattı ve toprak arasındaki düzgün olmayan sürtünme arayüzüne dayalı bir analitik model geliştirdi. Wang ve Yeh [5], yaptıkları çalışmada ile modellemede kullanılan boru elemanına eğilme rijitliği de ekleyerek uygulanan yöntemi geliştirdi. Vougioukas ve diğ. [6] fayların yatay ve düşey hareketlerini de gözönüne alarak boruları elastik kirişler olarak inceledi. Daha sonra McCaffrey ve O'Rourke [7] ve Desmod ve diğ. [8], San Fernando depreminden sonra su ve gaz borularının performansına dayalı olarak fayla kesişen gömülü boruların davranışını incelemek için bir araştırma yaptı. Wang ve Wang [9] boruyu elastik temel üzerinde bir kiriş olarak ele alırken, Takada ve diğ. [10] fayla kesişen çelik boruların kritik gerilmesini değerlendirmek için yeni bir yöntem kullandı. Lillig ve diğ. [11], boru hattının fay bölgesine yakın olması durumunda fay hareketinin boru hattı tepkisi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabileceğini gösterdiler. Kokavessis ve Anagnostidis [12], toprak-boru etkileşimini incelemek için ara yüzey elemanlarını kullanarak bir sonlu eleman analizi uygulamıştır. Karamitros ve diğ. [13] elastik zemine oturan temek kiriş ve elastisite teorisini birleştirerek analitik bir çözüm yöntemi sundu. Liu ve diğ. [14] kabuk sonlu elemanlar kullanarak aktif faylardan geçen boru hatlarının davranışını inceledi. Ayrıca, Ha ve diğ. [15-16] ve Abdoun ve diğ. [17] doğrultu atımlı fayların gömülü yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) boru hatlarının üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için önemli deneysel çalışmalar yaptılar. Çelik boru hattının elastik olmayan malzeme davranışını da hesaba katabilmek amacıyla, Trifonov ve Cherniy [18-19] tarafından fay hareketi altında gömülü boru hatlarının davranışının yarı analitik bir yöntemle incelenmesi sunulmuştur. İleri sayısal yöntemlerle boru hatlarının zeminle etkileşiminin araştırılması günümüzde sıcak araştırma konularından biri olarak devam etmektedir [20-22].

Konu üzerinde literatürde yapılan çalışmaların yanı sıra, fay-boru etkileşiminin daha detaylı şekilde incelenmesi amacıyla, bu çalışmada, gömülü boru hatların uygulamasında yaygın olarak kullanılan X80 çelik sınıfından olan ve tipik çap-kalınlık oranı (D/t) 57,6 olan boru çeşidi ele alınmaktadır.

Elde edilen sonuçlardan, basınçlı ve basınçsız boruların davranışı boru hatlarının performans kriterlerine göre karşılaştırılacaktır. Analiz aracı olarak sonlu farklar yöntemini kullanan FLAC3D yazılım kullanılacaktır. Sayısal sonuçlar, her zemin çeşidi için tipik D/t oranı değerleri ve fay-boru kesişme açılarına göre (30°,45°,70°,90°) belirli performans kriterlerine karşı fay hareketini gösteren diyagramlar şeklinde sunulmaktadır. Sunulan sonuçlar, kalıcı zemin kaynaklı yer değiştirmeye maruz gömülü boru hatlarının performansa dayalı tasarım çerçevesi geliştirilmesinde önemli olacağı düşünülmektedir.

## Gömülü çelik boru hatları için sınır durumları

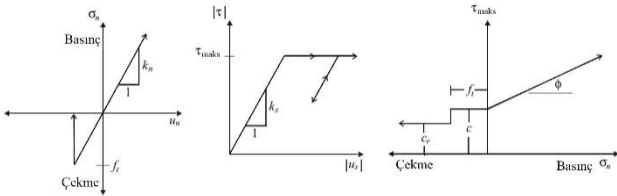
Limit durum tasarım konseptine göre (Limit state design concept) sınır durum koşulu, bir boru hattı sisteminin işlevsel yönlerini olumsuz şekilde etkileyen bir durum olarak tanımlanır. Boru hattı sınır durumlarının genel bir listesi olarak patlama, eksenel çekme göçmesi, aşırı eğilme, aşırı titreşim, aşırı korozyon, ovalleşme ve yerel burkulma (local buckling), buruşma, hidrostatik göçme, burkulma ve kontrolsüz çatlak yayılması gibi durumlardan oluşmaktadır [23]. Limit durum tasarım yönteminin geleneksel emniyet gerilmesine göre tasarım yöntemine göre önemli avantajlarından biri boru hattının gerçek davranışı ve güvenliği hakkında daha iyi bilgi sağlamasıdır. Böylece, daha ekonomik bir tasarımın yapılmasını mümkün kılmaktadır. Genel olarak, çekme şekil değiştirmesi borunun yerel burkulmaya maruz kaldığı bölgede basınç şekil değiştirmesine göre daha düşük hızla artar. Ayrıca, limit durumu şekil değiştirmenin odaklanması sürecinin başlangıcı ve nihai burkulmanın oluşması ile de ilişkilendirilebilir. Ek olarak, fay-boru hattının küçük pozitif açılarla kesiştiği durumda, bükülme noktalarında meydana gelen büyük eğilme momenti daha büyük eğilme şekil değiştirmesi ve kesit ovalleşmesine neden olur. Bu durumların göz önüne alındığında, boru hattı için baskın performans sınır durumu, %15 kesit ovalleşmesi [24] ve %3 çekme gerilmesi sınır durumu olarak tanımlanmaktadır [25]. Özellikle daha büyük çap-kalınlık oranına sahip boruların bükülme noktalarında eğilme momentinin daha büyük olması nedeniyle, bu iki sınır durumuna ulaşılır. Boru cidarının yırtılması ve aşırı deformasyonların meydana gelmesi, boru hattının önemli iki hasar modunu teşkil etmektedir.

## Model özellikleri ve analiz yöntemi

Deterministik çalışmaların temel amacı, gerçek saha davranışına en yakın sonuçları sunabilmesidir. Bu amaçla, sahadaki koşulların daha ayrıntılı bir şekilde sayısal modele yansıtılması ve kullanılacak analiz yönteminin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmadaki analizlerde, zeminin büyük şekil değiştirme seviyesinde göstereceği doğrusal olmayan davranışın fay-boru hattının tepkisi üzerinde önemli etkisi olduğundan ve zemin-boru etkileşimini de daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için sonlu farklar yöntemi esaslı FLAC3D yazılımı kullanılmaktadır. Zemin davranışı birleşmiş akma kuralı içeren elstoplastik Mohr-Coulomb bünye modeliyle modellenmektedir. Modelleme yönteminin kapasitesini büyük şekil değiştirme seviyesine yükseltmek için, sabit şekil değiştirme oranlı dört yüzlü meş elemanları (constant strain-rate tetrahedra mesh elements) kullanılmaktadır. Yarı uzayın

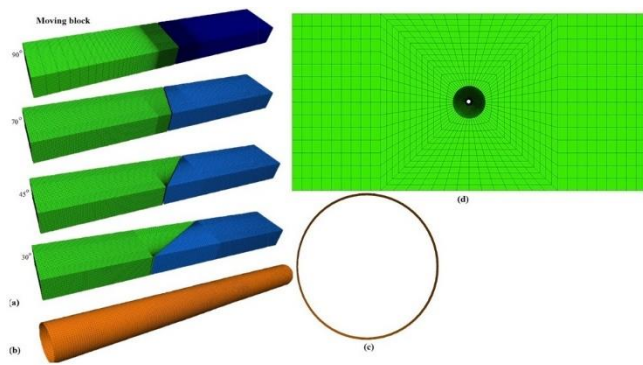
ayrıklaştırılması için birleşmiş ayrıklaştırma (mixed discretization) tekniği uygulanmaktadır.

Bu tekniğin uygulanma amacı birleşmiş ayrıklaştırmayla oluşan meşlere daha fazla hacimsel esnekliğin tanımlanmasıdır. Böylece, özellikle daha büyük kayma şekil değiştirme seviyesinde, daha dikkatli sonuçların elde edilmesi sağlanmaktadır. Yapısal eleman ile zemin arasındaki etkileşimin modellenmesi de önemli faktörlerden biridir. Boru hattının yapısal eleman olarak modellenmesinde Cook ve diğerleri (1989) tarafından tanımlanan DKT-CST (Discrete Kirchhoff Theory-Constant Stress Triangle) kabuk elemanı kullanılmıştır. Bu eleman, düğüm başına beş serbestlik derecesine sahip üç düğümlü, yassı ve ince bir kabuklu sonlu elemandır. Kullanılan yapısal eleman, çevresindeki sürekli ortam ile hem elemanın düzlem dışı yönünde sıkışma/çekme hem de düzlem içi yönünde sürtünme etkileşimini algılayan doğrusal olmayan yayları içerir. Şekil 1'de bir yapısal elemanın ara yüzündeki etkileşim yaylarının düzlem içi ve düzlem dışı yönündeki davranış modeli verilmektedir.



Şekil 1. Yapısal elemanın arayüzünde (a) düzlem dışı ve (b) düzlem içi yönündeki davranış modeli.

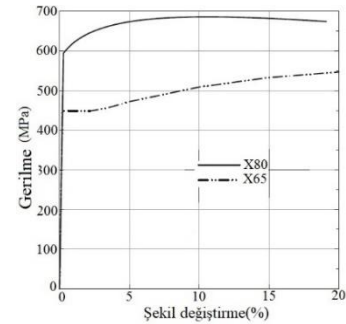
Bu çalışmada incelenen fay-boru hattı modelleri, toplam 60m uzunluğunda, 10m genişliğinde ve 5m yüksekliğinde iki zemin bloğundan oluşmaktadır. Şekil 2'de de gösterildiği gibi, sol blok fayın hareket eden bloğunu temsil etmektedir. Doğrultu atımlı fayın boruyla olan kesişme açısının etkisini araştırmak için boru hattı eksenine göre 30°, 45°, 70° ve 90° olmak üzere dört farklı kesişme açısı dikkate alınmaktadır.



Şekil 2. Fayı farklı açılarda kesen boru hattının sayısal modelleri: a) zemin için boyuna sonlu fark ağı; b) sonlu eleman (boru hattı) ağı c) boru kesiti ve d) zemin için enine kesit sonlu fark ağı.

Ayrıca, doğal gaz ve petrol hatlarının uygulamasında kullanılan tipik çelik sınıfının (API 5L X80) etkisi araştırılmaktadır. İncelenen boruların dış çapı (D) ve boru et kalınlığı (t) sırasıyla 914.4 mm ve 9.525 mm seçilerek, incelenen boru hattının çap kalınlık oranı (D/t) 57,6 olarak alınmıştır. Kullanılan çelik tipinin gerilme-şekil değiştirme

eğrisi Şekil 3'te gösterilmektedir. Boru hattının gömüldüğü zemine göre tepkisini incelemek için, yumuşak kilden oluşan zemin çeşidi kullanılmıştır. Tablo 1'de de, çelik boru hattının gömüldüğü yumuşak kil zeminin geoteknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3. API 5L X80 çelik borunun gerilme-şekil değiştirme davranışı.

Tablo 1. Kullanılan kil zeminin geoteknik özellikleri

Zemin	c (kPa)	φ (°)	V <sub>s</sub> (m/s)	G (kPa)	K (kPa)	γ (kN/m <sup>3</sup> )	PI (%)
Yumuşak	34-45	10	75-175	10.1e3-61.2e3	26.4e3-159.7e3	18-20	10

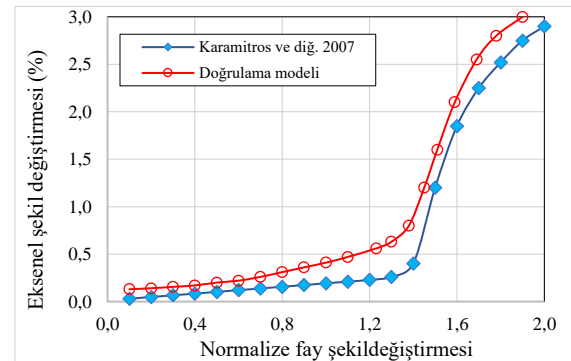
φ: içsel sürtünme açısı; c: kohezyon; V<sub>s</sub>: Kayma dalgası hızı; G: kayma modülü; K: balk modülü; γ: birim hacim ağırlığı

Uygulanan sayısal modellemenin doğrulaması için Karamitros ve diğ. (2007) ve Wang ve Yeh(1985) 'in analitik çözümleri kullanılmıştır. Doğrulama modelinde kullanılan çelik ve zemin-boru etkileşimi özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Verifikasyon modelinin kil zemininin özellikleri

API5L-X65 çelik özellikleri		
Akma gerilmesi (σ <sub>1</sub> )	490 Mpa	
Kırılma gerilmesi (σ <sub>2</sub> )	531 Mpa	
Kırılma şekildeğiştirme (ε <sub>2</sub> )	0.040	
Elastisite modülü (E <sub>1</sub> )	210 Gpa	
Akma şekildeğiştirme (ε <sub>1</sub> = σ <sub>1</sub> /E <sub>1</sub> )	0.002	
Plastisite modülü (E <sub>2</sub> =(σ <sub>2</sub> - σ <sub>1</sub> )/(ε <sub>2</sub> - ε <sub>1</sub> ))	1.088 Gpa	
Zemin-yay özellikleri		
	Akma kuvveti (kN/m)	Akma şekildeğiştirme (mm)
Eksenel (sürtünme) yay	40.5	3.0
Düzlem içi yatay yay	318.6	11.4
Düzlem dışı yay (dışarı yönde)	52.0	2.2
Düzlem dışı yay (içeri yönde)	1360.0	100.0

Bu çalışma kapsamında yapılmış olan doğrulama modelinin sonuçları Karamitros ve diğ. (2007) tarafından yayınlanan sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Wang ve Yeh'in (1985) 45° fay geçiş açısı için analitik tahmini Şekil 4'te sunulmuştur. Sonuçların yakınlığının makul olduğu görülmektedir.

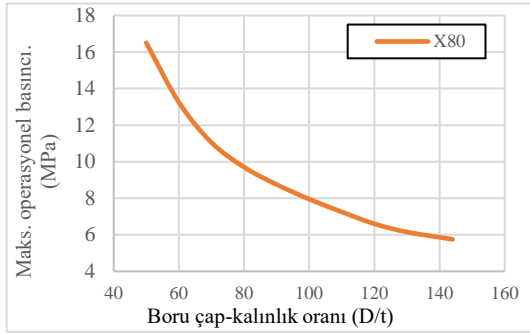


Şekil 4. 45° fay kesişmesi açısı için analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

## Sonuçlar ve tartışma

Bu bölümde yumuşak kil zeminde gömülü basınçlı ve basınçsız çelik boru hattının doğrusal olmayan sayısal modellemesinden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Sonuçlar, X80 çelik sınıfından olan ve fay ile 30°, 45°, 70° ve 90° gibi farklı açılarla kesişen boruların yerel burkulma, çekme şekil değiştirmesi ve kesit ovalleşmesi gibi performans sınır kriterlerine karşılık gelen fay yer değiştirmesine göre verilecektir. Boru hatlarının maksimum operasyonel basıncı D/t oranı ve kullanılan çeliğin akma gerilmesine bağlıdır. Maksimum operasyonel basıncı aşağıdaki bağıntıda ve X80 çelik sınıfı için maksimum basıncın D/t oranıyla değişimi Şekil 5'te verilmektedir.

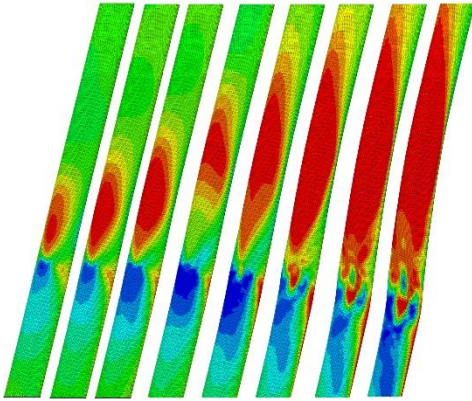
$$p_{max} = 0.72 \times (2\sigma_y t/D) \quad (1)$$



Şekil 5. X80 çelik sınıfı için maksimum basıncın D/t oranıyla değişimi

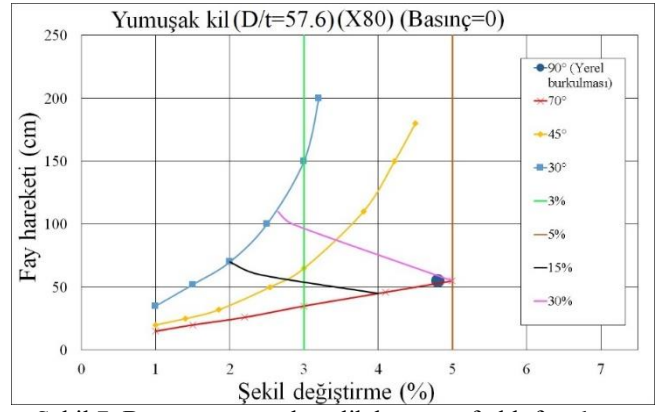
## Yumuşak killi zeminde gömülü çelik boru hattının davranışı

Şekil 6'da, borunun kritik zonunda fayın şekil değiştirmesiyle oluşan çekme ve basınç gerilmesinin değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi, çekme gerilmesi fayın hareketsiz bloğunda borunun daha uzun kısmını etkilemektedir.



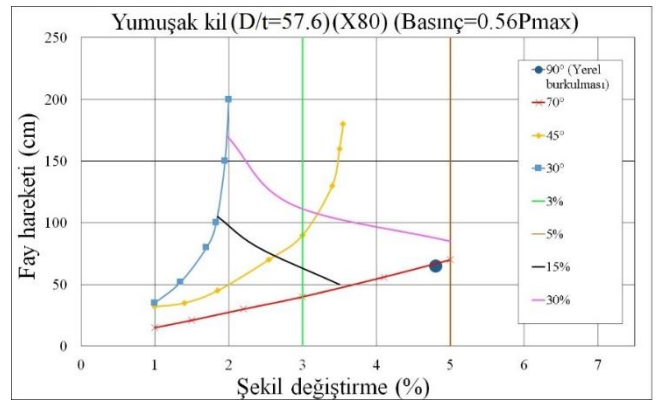
Şekil 6. Borunun kritik zonunda fayın şekil değiştirmesiyle oluşan çekme ve basınç gerilmesinin değişimi (X80, Yumuşak kil, D/t=57,6, basınç=0).

Şekil 7'de, yumuşak kil zeminde gömülü basınçsız D/t oranı 57,6 ve X80 sınıfından olan çelik boru hattının farklı kesişme açılarda gösterdiği davranışı verilmektedir.



Şekil 7. Basınçsız gömülü çelik borunun farklı fay- boru kesişme açılarında performans sınırları (X80 boru, Yumuşak kil, D/t=57,6, sıfır basınç).

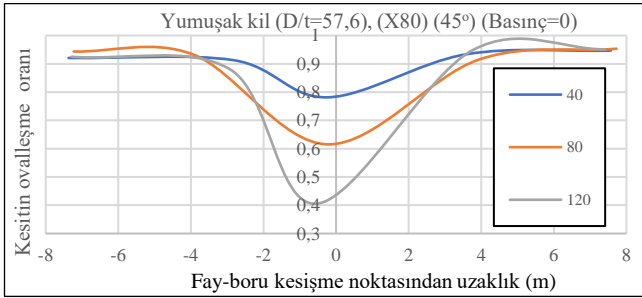
Kesişme açısının 90° olduğu durumda, borunun sadece bir tarafında sınırlı bölgede meydana gelen büzüşmeden dolayı yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğu görülmektedir. Sonuçlar bu durum için yerel burkulmanın fayın 55 cm hareket ettiğinde gerçekleştiğini göstermektedir. Fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların %3 ve %5 çekme gerilmesi ve %15 ile %30 kesit ovalleşme performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Görüldüğü gibi, fay-boru kesişme açısı 70° olan borunun %3 ve %5 çekme şekil değiştirmesi sırasıyla yaklaşık 40 cm ve 55 cm'lik fay hareketinde ulaşmış iken, kesişme açısı 45° olan boru hattı %3 sınır koşuluna 65 cm'de ulaşmaktadır. Bu durum için, %5 sınır koşuluna varılmamaktadır. Ancak, kesişme açısı 45° olan boru hattında %5 çekme şekil değiştirmesine gelmeden önce %30 kesit ovalleşme sınır performansı aşıldığından, bu durum için baskın sınır durumu kesit ovalleşmesi olmaktadır. Kesişme açısı 30° olan boru hattına bakıldığında, %3 çekme şekil değiştirme sınır durumuna varmadan yaklaşık 115 cm'lik bir fay hareketinde %30 ovalleşme sınır durumu aşılmaktadır.



Şekil 8. Basınçlı gömülü çelik borunun farklı fay- boru kesişme açılarında performans sınırları (X80, Yumuşak kil, D/t=57,6, Basınç=0,56 Pmaks).

Şekil 8'de, basınçlı gömülü çelik borunun farklı fay boru kesişme açılarında performans sınırlarına karşılık fay hareketleri verilmektedir. Bu çalışmada, basınçlı ve basınçsız boruların davranışının karşılaştırılması amacıyla doğal gaz ve petrol aktarma operasyonunda uygulanan tipik basınç değerlerinden olan 0,56Pmaks basıncın boru hattının davranışına etkisi incelenmektedir. Şekilde görüldüğü gibi,

basıncılı durumda fay ve boru hattının 90° açıyla kesiştiğinde, yerel burkulma 65 cm'lik bir fay hareketinde meydana gelmektedir. Bu da, yerel burkulmanın baskın olduğu durumlarda borunun iç basıncının davranış üzerinde 10 cm'lik bir artışla etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Daha önce basınçsız boru hattında da görüldüğü gibi, fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Sonuçlar, 90° den farklı açılarda, basınçlı boruların sınır durumlarının basınçsız duruma göre daha da iyileştiğini göstermektedir. Örneğin, fayla 70° açıyla kesişen basınçsız borunun %5 çekme şekil değiştirmesi yaklaşık 55m cm'lik bir fay hareketinde gerçekleşmişken, bu değer basınçlı boru için yaklaşık 71cm'de meydana gelmektedir. Kesişme açısı 45° ve 30° olan boruların basınçlı durumdaki tepki eğrileri basınçsız duruma göre farklılıklar göstermektedir. Bu da, basınçlı borunun fay hareketine maruz iken meydana gelen dengesizlikten kaynaklanmış olabilir. 45° kesişme açısında, basınçsız boruda sırasıyla yaklaşık 65 cm ve 80 cm fay hareketiyle %3 çekme şekil değiştirmesi ve %30 kesit ovalleşmesi sınır durumuna ulaşmış iken, basınçlı boruda sırasıyla 90 cm ve 110 cm'de ulaşılmaktadır. 30° kesişme açısına bakıldığında, basınçsız durum için %3 kesme şekil değiştirme sınır durumu 150 cm de ulaşmış iken, basınçsız boruda bu sınır durumuna ulaşılmamaktadır. Ancak, %30 kesit ovalleşmesi sınır durumu basınçlı boruda basınçsız boruya göre 110 cm'den 165cm'ye yükselmiştir.

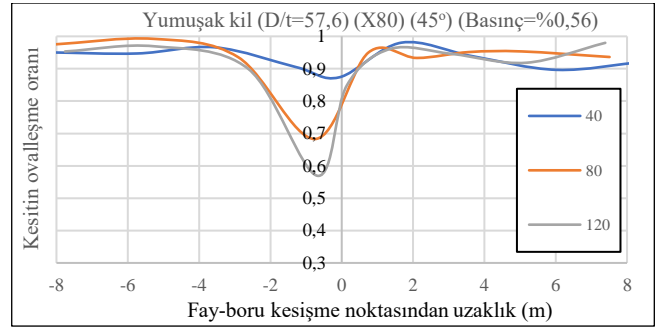


Şekil 9. Boru-fay kesişme bölgesinde (X80, Yumuşak kil, 45°, D/t=57,6, basınç sıfır) uzaklıkta farklı fay hareketleri için çap bozulma oranı.

Boru hattının fay ile kesiştiği durumlarda önemli konulardan biri de borunun fayla kesiştiği bölgede etkilendiği uzunluktur. Şekil 9'de yumuşak kil zeminde basınçsız D/t=57,6 ve X80 sınıfından olan çelik borunun fayla 45° açıyla kesiştiği durum için farklı fay şekil değiştirmesinde etkilendiği uzunluk verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, düşük fay şekil değiştirmesinde önce borunun fayın hareketli tarafında olan kısmı etkilenmeye başlar. Fay şekil değiştirmesinin artmasıyla borunun etkilenen uzunluğu artıyor ve şekilde incelenen durum için fayın hareketli tarafında (Şekil 9'in sol tarafı) yaklaşık 4 m ve fayın sabit tarafında 6 m'ye (toplamda 10 m) ulaşmaktadır. Ancak, borunun etkilendiği en kritik bölgesi fayın hareketli tarafından yaklaşık 4m uzunluğunda bir mesafede meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 10'da maksimum operasyonel basıncının %56 seviyesinde çalışan borunun farklı fay hareketinde etkilenen uzunluğunu vermektedir. Görüldüğü gibi, basınç etkisi altında olan boru hattını tepkisi, fayın hareketli tarafında

(Şekil 10'un sol tarafı) yaklaşık 4 m'ye ve fayın sabit tarafında 8 m'ye (toplamda 12 m) ulaşmaktadır.



Şekil 10. Boru-fay kesişmesinin (X80, Yumuşak kil, 45°, D/t=57,6, basınç Pmaks'ın %56'sı) farklı fay hareketleri için çap bozulma oranı.

## Sonuç

Doğalgaz ve altyapı sistemlerinde depremden ve deprem sonrası ikincil afetlerden dolayı olabilecek hasarlar ülkelerin ekonomik ve iş-sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı fay-boru hattının kesişme açısının yumuşak kil zeminlerde gömülü çelik borularının davranışına etkisinin araştırılması olduğundan, tipik petrol ve doğal gaz uygulamalarında kullanılan D/t oranı 57,6 olan X80 çelik sınıfından oluşan boruların basınçlı ve basınçsız durumdaki davranışlarının sayısal modellenmesinden elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıdır. Çalışmada, 90°, 70°, 45° ve 30° olmak üzere dört farklı fay boru hattı kesişme açısı modellenmiştir.

Sonuçlar, kesişme açısının 90° olduğu durumla şekil değiştirmenin sınırlı bölgede meydana geldiğini ve o bölgede büzüşmenin oluştuğunu göstermektedir. Kesişme açısının 90° olduğu durumda hem basınçlı hem de basınçsız borularda yerel bükülme sınır durumunun baskın olduğu görülmektedir. Ancak, basınçlı borunun yerel burkulması basınçsız boruya göre yaklaşık %20 daha büyük fay hareketinde meydana gelmektedir. Fay ve boru hattının kesişme açısı azaldığında, boruların %3 ve %5 çekme gerilmesi ve %15 ile %30 kesit ovalleşme performans sınırlarına ulaşmak için gerekli fay hareketinde artış meydana gelmektedir. Örneğin, basınçsız boru hattı için %3 çekme şekil değiştirmesi sınır durumu 70°, 45° ve 30° kesişme açıları için sırasıyla 40 cm, 60 cm ve 150 cm fay hareketinde meydana gelmiştir. Kesişme açısının azalmasının %15 ve %30 kesit ovalleşmesi sınır durumları üzerinde de benzer etkisinin olduğu görülmüştür. Sonuçlar, basınç altına olan boru hattının sınır durumları basınçsız duruma göre daha büyük fay hareketlerinde meydana geldiğini göstermektedir. Örneğin, basınç altında olan borunun %3 çekme şekil değiştirmesi sınır durumu için 70° ve 45° kesişme açıları fay hareketinde basınçsız boruya göre sırasıyla yaklaşık %8 ve %33 artış meydana gelmektedir. Basınçlı borunun fayla 30° açıyla kesiştiğinde ise, çekme şekil değiştirmesi sınır durumlarına ulaşılmamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada borunun fayla kesiştiği bölgede etkilendiği uzunluğu da incelenmiştir. Borunun fayla 45° açıyla kesiştiği durumda etkilendiği uzunluğu basınçsız durumda 10 m'den basınçlı durumda 12 m'ye çıkmaktadır.



**Kaynaklar**

- [1] Vazouras P, Karamanos SA. Structural behavior of buried pipe bends and their effect on pipeline response in fault crossing areas. *Bull Earthq Eng* 2017; 15:4999–5024. doi:10.1007/s10518-017-0148-0.
- [2] Takada S, Nakayama M, Ueno J, Tajima C. Report on Taiwan Earthquake. RCUSS, Earthquake Laboratory of Kobe University, 1999. p. 2–9.
- [3] Kennedy RP, Chow AW, Williamson RA. Fault movement effects on buried oil pipeline. *Journal of Transportation Engineering, ASCE* 1977;103:617–33.
- [4] Kennedy RP, Kincaid RH. Fault crossing design for buried gas oil pipelines. In: *Proceedings of the ASME, PVP conference*, vol. 77; 1983. p. 1–9.
- [5] Wang LRL, Yeh YA. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1985;13:75–96.
- [6] Vougioukas EA, Theodossis C, Carydis PG. Seismic analysis of buried pipelines subjected to vertical fault movement. *Journal of Technical Councils, ASCE* 1979;105(TCI):432–41.
- [7] MaCaffrey MA, O'Rourke TD. Buried pipeline response to reverse faulting during the 1971 San Fernando Earthquake. In: *Proceedings of the ASME, PVP conference*, vol. 77; 1983. p. 151–9.
- [8] Desmond TP, Power MS, Taylor CL, Lau RW. Behavior of large-diameter pipeline at fault crossings. *ASCE, TCLEE* 1995;1995(6):296–303.
- [9] Wang LLR, Wang LJ. Parametric study of buried pipelines due to large fault movement. *ASCE, TCLEE* 1995;1995(6):152–9.
- [10] Takada S, Hassani N, Fukuda K. A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2001;2001(30):1243–57.
- [11] Lillig DB, Newbury BD, Altstadt SA. The second ISOPE strain-based design symposium—a review. In: *Proceedings of the international society of offshore & polar engineering conference*, Osaka, Japan; 2009.
- [12] Kokavessis NK, Anagnostidis GS. Finite element modelling of buried pipelines subjected to seismic loads: soil structure interaction using contact elements. In: *Proceedings of ASME PVP conference*, Vancouver, BC, Canada; 2006.
- [13] Karamitros DK, Bouckovalas GD, Kouretzis GP. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings. *Soil Dyn Earthq Eng* 2007;27:200–11.
- [14] Liu M, Wang Y-Y, Yu Z. Response of pipelines under fault crossing. In: *Proceedings of the international offshore and polar engineering conference*, Vancouver, BC, Canada; 2008.
- [15] Ha D, Abdoun TH, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Buried high-density polyethylene pipelines subjected to normal and strike-slip faulting—a centrifuge investigation. *Canadian Geotechnical Journal* 2008;45: 1733–42.
- [16] Ha D, Abdoun TH, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2008;134(10):1501–15.
- [17] Abdoun TH, Ha D, O'Rourke MJ, Symans MD, O'Rourke TD, Palmer MC, et al. Factors influencing the behavior of buried pipelines subjected to earthquake faulting. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2009;29:415–27.
- [18] Trifonov OV, Cherniy VP. A semi-analytical approach to a nonlinear stress–strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults. *Soil Dyn Earthq Eng* 2010;30:1298–308.
- [19] Trifonov OV, Cherniy VP. Elastoplastic stress–strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads. *Soil Dyn Earthq Eng* 2012;33(1):54–62.
- [20] Morshed A, Roy K, and Hawlader B. Modeling of buried pipelines in dense sand for oblique movement in vertical - lateral plane. *J Pipeline Sys Eng and Practice* 2020; 11(4):04020050.
- [21] Dey S, Chakraborty S, Tesfamariam S. Structural performance of buried pipeline undergoing strike-slip fault rupture in 3D using a non-linear sand model. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2020; 135: 106180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106180>.
- [22] Melissianos V, Vamvatsikos D, Gantes C. Methodology for failure mode prediction of onshore buried steel pipelines subjected to reverse fault rupture. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2020; 135:101-116.
- [23] Polynikis Vazouras , Spyros A. Karamanos , Panos Dakoulas. Mechanical behavior of buried steel pipes crossing active strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 41, October 2012, Pages 164-180.
- [24] Gresnigt AM, Karamanos SA. Local buckling strength and deformation capacity of pipes. In: *Proceedings of the 19th international offshore and polar engineering conference*. Osaka, Japan; 2009. p. 212–23.
- [25] Canadian Standard Association. Oil and gas pipeline systems, CSA-Z662. Mississauga, Ontario, Canada; 2007.



## Convergence studies for static analysis of thin plates on Pasternak Foundations

Ülkü Hülya ÇALIK-KARAKÖSE\*

Istanbul Technical University, Civil Engineering Department, calikkarakose@itu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-2944-7434

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 2 January 2023  
Received in revised form 8 March 2023  
Accepted 9 March 2023  
Available online 23 March 2023

#### Keywords:

*Kirchhoff plate element, Reissner-Mindlin plate element, Pasternak foundation, shear locking, convergence*

### ABSTRACT

Convergence studies for the static analysis of thin plates resting on Pasternak foundations is performed. The plates are discretized using two different finite elements, the formulations of which are based on the Kirchhoff and Reissner-Mindlin plate theories. The shear locking problem which arises when full integration is used in the finite element implementation of Reissner-Mindlin plate theory is eliminated with selective integration. The Pasternak foundation is accounted for by adding the parameter matrices of an existing soil finite element to the stiffness matrix terms of the plate finite elements corresponding to deflections. Convergence rates for different boundary conditions, plate thicknesses and soil parameters are obtained and given comparatively through numerical examples.

Doi: 10.24012/dumf.1228192

\* Corresponding author

## Introduction

Bending analyses of plates are performed using the differential equations of appropriate plate theories. The well-known Kirchhoff plate theory (Kirchhoff PT) which is used in the analysis of thin plates and where the shear deformation effects are neglected is developed by Love [1] following the assumptions given by Kirchhoff [2]. According to the theory, the thickness of the plate does not change and straight lines orthogonal to the midplane of the undeformed plate remain straight and orthogonal after deformation and  $C^1$  continuous elements are required in the finite element implementation. The Reissner-Mindlin plate theory (R-M PT) [3,4] which is mostly used for the analysis of thick plates can also be used for the analysis of thin plates. In this theory, shear deformation and rotary inertia effects are taken into consideration and straight lines orthogonal to the midplane of the plate remain straight but not orthogonal to the midplane after deformation. In the finite element implementation,  $C^0$  continuous elements suffice.

Shear locking problem arises when R-M plate elements are used in the analysis of thin plates which is due to the excessive effect of the transverse shear deformation terms in the formulations. This problem can be alleviated using

several techniques like reduced or selective integration, non-conforming element method, assumed shear strain method, the discrete shear gap method, or the mixed interpolation of tensorial components method. In this paper, selective integration technique is utilized to eliminate the shear locking problem as done in [5].

The simplest model used for the analysis of plates resting on elastic foundations is the Winkler (one-parameter) model [6] where the interaction between the plate and the foundation is accounted for using independent linear elastic springs. In this model, shear interaction between the springs does not exist which leads to deflection discontinuity on the plate surface. This deficiency is avoided in Pasternak (two-parameter) model [7] where the shear interaction between the springs is defined via a second parameter. Static analyses of isotropic rectangular plates resting on Pasternak foundation are performed in many studies as in [8-9]. A semi-analytical solution for the static analysis of thin skew plates on Winkler and Pasternak foundations is presented by [10]. In a recent study, a computing method for bending analysis of thin plates resting on Pasternak foundation is developed, [11]. Vibration analyses of isotropic rectangular plates resting on Pasternak foundation are also performed in many studies, [12-14].

In this study, a MATLAB code is written for the convergence studies on static analysis of thin plates resting on Pasternak foundations using [15]. The plates are discretized using two different finite elements which are based on Kirchhoff and R-M plate theories. The Kirchhoff plate finite element is a popular four-noded twelve degree of freedom (DOF) rectangular plate element developed by [16] and [17,18] (also known as MZC plate element) and the R-M plate finite element is a bilinear four-noded twelve DOF quadrilateral plate element developed by [19,20].

Elastic bedding and shear parameter matrices of a soil finite element which are derived by [9] are added to the corresponding terms of the plate stiffness matrices to account for the Pasternak foundation. Midpoint deflections and convergence rates of thin plates discretized using Kirchhoff plate elements and R-M plate elements with full integration and selective integration, are obtained for different plate thicknesses, foundation parameters and boundary conditions.

**Kirchhoff Plate Element**

The thin plate bending finite element, the formulation of which is based on Kirchhoff plate theory is a four-noded rectangular finite element having three DOFs (one deflection and two rotations) at each node, Figure 1.

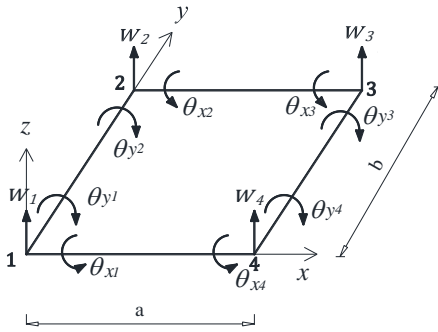


Figure 1. Plate finite element

The displacement vector of the finite element is

$$u = \{w \ \theta_x \ \theta_y\}^T \tag{1}$$

where the rotations are expressed in terms of deflections as

$$\theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} \quad , \quad \theta_y = -\frac{\partial w}{\partial x} \tag{2}$$

The stress-strain relation of classical elasticity is

$$[\sigma_b] = [C_b][\varepsilon] \tag{3}$$

where the strain vector is

$$[\varepsilon] = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

and the material matrix for the isotropic material is defined as

$$[C_b] = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{5}$$

where E is the modulus of elasticity, h is the thickness of the plate and ν is the Poisson’s ratio. The displacement function of the twelve DOF finite element consists of incomplete 3<sup>rd</sup> order polynomials only satisfying the deflection compatibility.

The continuum displacements u are obtained by solving the fourth-order partial differential equation (p.d.e.)

$$L^T C_b L u + b = 0 \tag{6}$$

where L is the derivative operator given as

$$[L] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

and b are the body forces. In the finite element discretization, the continuum displacements u are expressed in terms of nodal displacements u as u = N\_k u where N\_k are C<sup>1</sup> continuous shape functions used to obtain the unknown nodal displacements. The discretization gives

$$\int_A B^T C_b B dA \underline{u} = K \underline{u} = F \tag{8}$$

where K is the element stiffness matrix, B = LN\_k and F is the element nodal external force vector.

**Reissner-Mindlin Plate Element**

The Reissner-Mindlin plate finite element is a four-noded quadrilateral element having the same DOFs, Figure 1. The displacement components of the element are

$$w \quad , \quad \theta_x = \frac{\partial w}{\partial y} + \varphi_y \quad , \quad \theta_y = \frac{\partial w}{\partial x} + \varphi_x \tag{9}$$

where additional rotations (φ\_y and φ\_x) arise due to the shear deformation effects. Thus, the rotations θ\_x and θ\_y depend on both deflection and additional rotations and they are taken as independent variables.

For bending and shear, the stress-strain relations of classical elasticity are

$$[\sigma_b] = [C_b][\varepsilon_b] \quad , \quad [\sigma_s] = [C_s][\varepsilon_s] \tag{10}$$

and the isotropic material matrix for shear is

$$[C_s] = \frac{kEh}{2(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

where k is the shear correction factor. Strains for bending and shear are

$$\varepsilon_b = L_b u \quad , \quad \varepsilon_s = L_s u \tag{12}$$

respectively where the derivative operators are defined as

$$[L_b] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad , \quad [L_s] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & -1 & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

The finite element discretization gives

$$\int_A (B_b^T C_b B_b + B_s^T C_s B_s) dA \underline{u} = K \underline{u} = F \quad (14)$$

where,  $B_b = L_b N_i$ ,  $B_s = L_s N_i$  and  $\underline{u}$  indicates the nodal displacement components.

Note that  $C^0$  continuous bilinear shape functions ( $N_i$ ) are used for all of the nodal unknowns in the finite element discretization and the two stiffness matrix components in Eq. (14) are for bending and shear, respectively.

**Idealization of the Pasternak Foundation**

The Pasternak foundation under the Kirchhoff and Reissner-Mindlin plates is represented by the inclusion of elastic bedding and shear parameter matrices of a soil finite element derived by [9] in the plate finite element stiffness matrices. The elastic bedding and shear parameter matrix terms  $C_{ij}$  and  $C_{Tij}$  are obtained via

$$C_{ij} = k_w \int_A w_i w_j dA \quad (15)$$

$$C_{Tij} = k_p \int_A \frac{\partial w_i}{\partial x} \frac{\partial w_j}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial y} \frac{\partial w_j}{\partial y} dA \quad (16)$$

where  $k_w$  and  $k_p$  respectively indicate the coefficient of subgrade reaction and the shear modulus of the foundation. The elastic bedding and shear parameter matrices  $[C]$  and  $[C_T]$  are obtained as

$$[C] = \frac{k_w ab}{36} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

and

$$[C_T] = \frac{k_p}{3} \begin{bmatrix} \alpha + \beta & \alpha/2 - \beta & \beta/2 - \alpha & -(\alpha + \beta)/2 \\ \alpha/2 - \beta & \alpha + \beta & -(\alpha + \beta)/2 & \beta/2 - \alpha \\ \beta/2 - \alpha & -(\alpha + \beta)/2 & \alpha + \beta & \alpha/2 - \beta \\ -(\alpha + \beta)/2 & \beta/2 - \alpha & \alpha/2 - \beta & \alpha + \beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

Here,  $\alpha = a/b$  and  $\beta = b/a$  where  $a$  and  $b$  are the plate dimensions.

These matrix terms are added to the stiffness matrix terms of the Kirchhoff and R-M plate elements which correspond to deflections. In [21], this procedure is carried out for the Kirchhoff plate element only.

Thus, the resulting system of equations is

$$K \underline{u} + C \underline{u} + C_T \underline{u} = F \quad (19)$$

**Numerical Examples**

**Verification Example**

In order to verify the present model, a simply supported square plate resting on a Pasternak foundation subjected to a uniformly distributed load of  $q=E/10^5$  kN/m<sup>2</sup> is solved for different foundation parameters using Kirchhoff and R-M plate finite elements and dimensionless midpoint deflections are compared with those in [22] as given in Table 1. A schematic representation of the plate-foundation system is given in Figure 2 noting that the system is created with plate finite elements only, since the

properties of the foundation are embedded in the plate stiffness matrix.

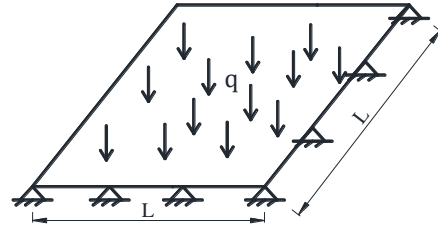


Figure 2. Simply supported square plate-foundation system

Thickness to length ratio ( $h/L$ ) of the plate is 1/100 and  $\nu=0.3$ .  $k_w'$  and  $k_p'$  are dimensionless soil parameters which are defined as  $k_w' = k_w L^4 / D$  and  $k_p' = k_p L^2 / D$  where  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ . It is seen that the deflections obtained using Kirchhoff plate finite elements and R-M plate finite elements with selective integration (2x2 and 1x1 gauss points for bending and shear stiffness matrices, respectively) are very close to the reference values. It is also observed that the dimensionless deflection values decrease as the shear modulus of the foundation increases.

Table 1. Dimensionless midpoint deflections of the simply supported square plate on Pasternak foundation

$k_w'$	$k_p'$	Dimensionless midpoint deflection ( $w' = 10^3 D w / qL^4$ )		
		Kirchhoff PT	R-M PT (sel.int.)	[22]
1	1	3.8517	3.8855	3.8530
1	3 <sup>4</sup>	0.7637	0.7647	0.7630
1	5 <sup>4</sup>	0.1154	0.1154	0.1150

**Simply supported square plate on Pasternak foundation**

A simply supported square plate resting on an isotropic Pasternak foundation is solved for different plate thicknesses and foundation parameters. The plate is subjected to a uniformly distributed load  $q=1$  kN/m<sup>2</sup>. The plate length is  $L=1$  m, the modulus of elasticity is  $E=1 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup> and the Poisson's ratio is  $\nu = 0.3$ .

The finite element implementation of the plate-foundation system is carried out both using Kirchhoff and R-M plate finite elements for two different thickness to length ratios (1/50 and 1/100) as well as for successively refined meshes ((4x4), (8x8), (16x16), (32x32), (64x64)). Comparisons are made for the dimensionless midpoint deflections and for the convergence rates which are obtained via L2 norm displacement error analysis.

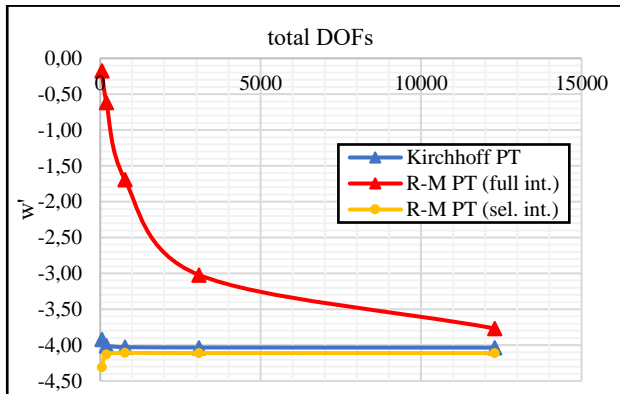
The relative displacement errors are obtained using

$$\|e\|_2 = \frac{\|u_e - u_c\|}{\|u_e\|} = \sqrt{\frac{\int_A (u_e - u_c)^2 dA}{\int_A (u_e)^2 dA}} \quad (20)$$

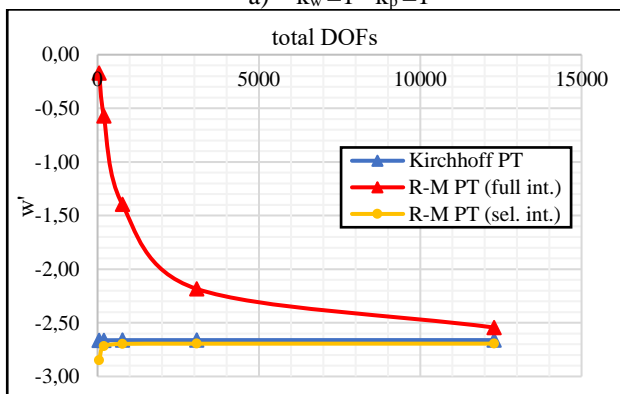
which is in L2 norm. Here,  $u_c$  indicate the calculated values of the displacements,  $u_e$  are the exact displacements obtained using an overkill mesh (64x64) and  $A$  is the plate domain.

In the finite element implementation using Kirchhoff plate elements, (2x2) gauss integration points suffice according to the gauss quadrature rule since the displacement function of the element is an incomplete third order polynomial. In the implementation using R-M plate elements, two different gauss quadrature rules are utilized, full integration with (2x2) gauss points both for bending and shear stiffness matrices and selective integration with (2x2) gauss points for the bending stiffness matrix and a single gauss point for the shear stiffness matrix.

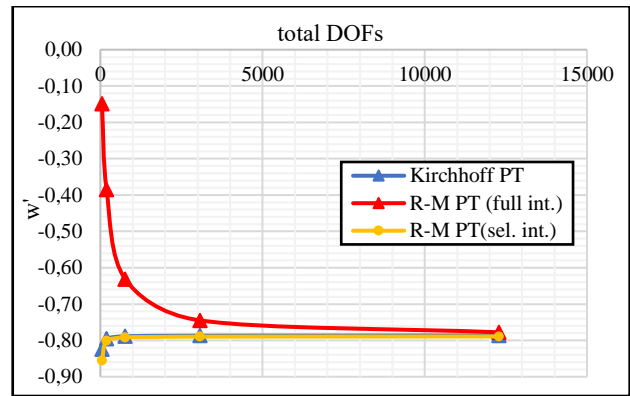
In Figure 3, dimensionless central deflections of the simply supported plate on Pasternak foundation are plotted against the total DOFs for  $h/L=1/50$  and increasing foundation shear parameters. It is seen that the midpoint deflections are underestimated due to the shear locking problem when full integration is used in the implementation of R-M PT. It is also observed that the shear locking effect decreases with increasing shear parameter of the foundation. Besides, for dimensionless foundation parameters  $k_w'=1$  and  $k_p'=1$ , very close deflection values are obtained for the Kirchhoff plate solution and R-M plate solution with selective integration even by using (8x8) meshes, Figure 3a. These values attain closer values for  $k_w'=1$  and  $k_p'=3^4$  and the same values for  $k_w'=1$  and  $k_p'=5^4$  as seen in Figures 3b and 3c, respectively.



a)  $k_w'=1$   $k_p'=1$



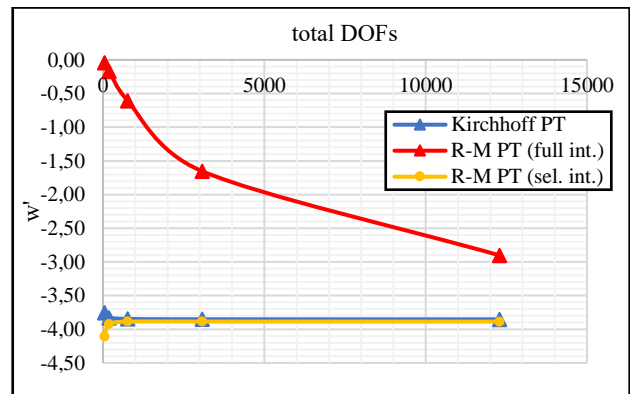
b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$



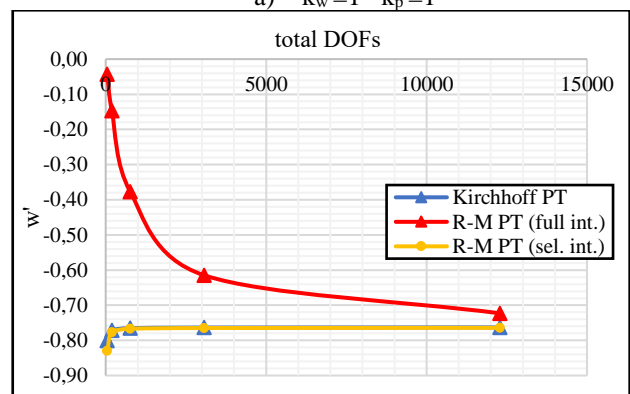
c)  $k_w'=1$   $k_p'=5^4$

Figure 3. Dimensionless central deflections ( $w'$ ) of the simply supported square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/50$ )

Then, the thickness to length ratio of the plate is decreased to 1/100. For this case, the shear locking effect is much more pronounced for  $k_w'=1$  and  $k_p'=1$ , Figure 4a. Dimensionless deflections are the same for Kirchhoff plate solution and R-M plate solution with selective integration for all foundation parameters as seen in Figure 4. For  $k_w'=1$  and  $k_p'=5^4$  foundation parameters, the same deflection values are achieved using the finest mesh when R-M solution with full integration is used, Figure 4c.



a)  $k_w'=1$   $k_p'=1$



b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$

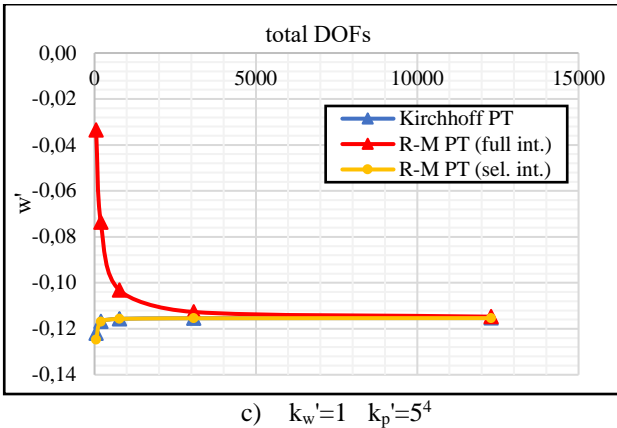


Figure 4. Dimensionless central deflections ( $w'$ ) of the simply supported square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/100$ )

Computation time is also obtained both for the Kirchhoff PT and R-M PT solutions for successively refined meshes and given comparatively in Table 2.

Table 2. Comparison of computation time between Kirchhoff and R-M (sel. int.) solutions for successively refined meshes

	Computation time (sec.)	
	Kirchhoff plate elements	R-M plate elements
4x4 mesh (75 DOFs)	0.096	0.101
8x8 mesh (243 DOFs)	0.168	0.147
16x16 mesh (867 DOFs)	0.38	0.462
32x32 mesh (3267 DOFs)	1.899	1.751
64x64 mesh (12675 DOFs)	48.784	38.951

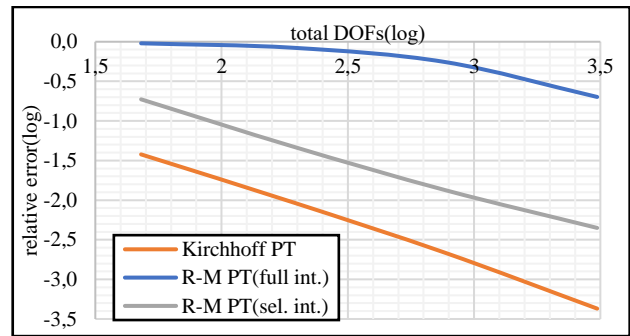
It is observed that the computation time for both of the solutions are close to each other and the solutions abruptly become computationally expensive in terms of time when using the finest mesh (64x64). Note that the computation time does not significantly change when selective and full integrations are used in the implementation of R-M PT except for the finest mesh. Running time is even longer (51.015 seconds) when full integration is used.

The relative displacement errors of the simply supported square plate on the Pasternak foundation are obtained for the two thickness to length ratios and for different foundation parameters in L2 norm and given comparatively in logarithmic scale as shown in Figures 5-6.

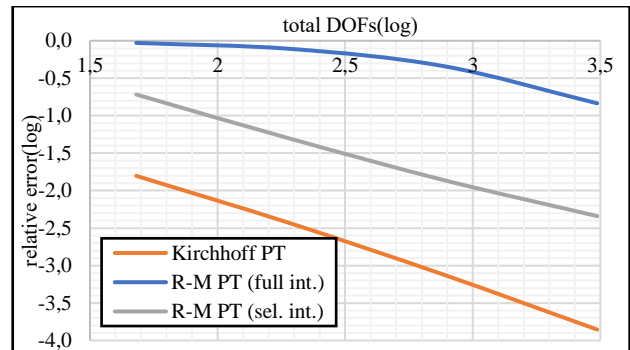
For both of the  $h/L$  ratios and all foundation parameters, it is observed that the errors are the least when Kirchhoff plate elements are used and the largest when R-M plate elements with full integration are used in the implementation.

For  $h/L=1/50$ , the relative errors decrease with increasing shear parameter for R-M solution with full integration. The error values do not change for the R-M solution with selective integration and decrease for the Kirchhoff solution when the shear parameter of the foundation is  $k_p'=3^4$  as seen in Figure 5.

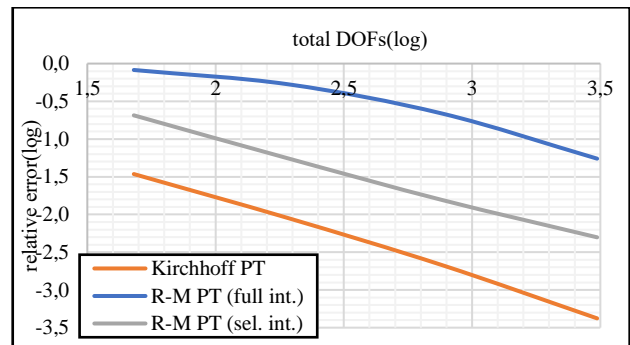
Then, the relative errors for the plate-foundation system are obtained for  $h/L=1/100$  and given in Figure 6. The relative errors decrease when using the R-M plate elements with full integration and do not change for the rest of the solutions except for the Kirchhoff solution for  $k_p'=3^4$  where there is a slight decrement in the relative error values.



$k_w'=1$   $k_p'=1$

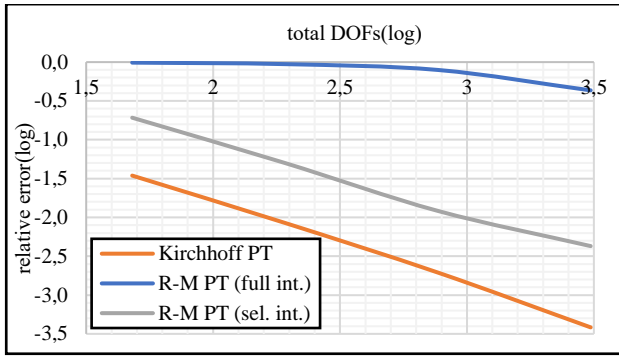


$k_w'=1$   $k_p'=3^4$

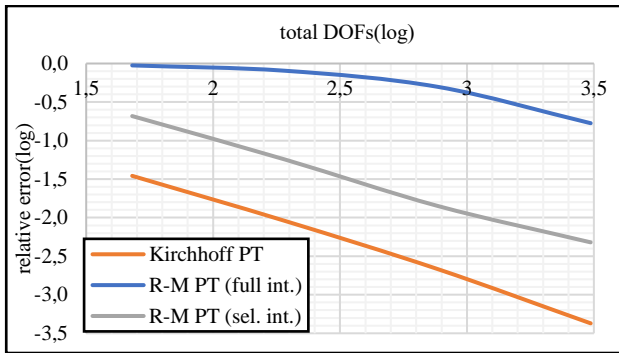


$k_w'=1$   $k_p'=5^4$

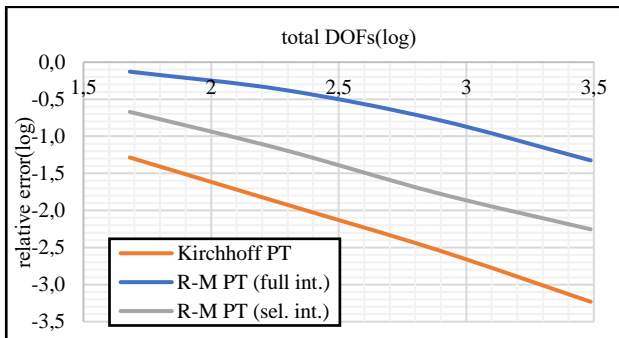
Figure 5. Relative errors of the simply supported square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/50$ )



$k_w'=1 \quad k_p'=1$



$k_w'=1 \quad k_p'=3^4$



$k_w'=1 \quad k_p'=5^4$

Figure 6. Relative errors of the simply supported square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/100$ )

The slopes of relative error-total DOF lines which give the convergence rates of the numerical solutions to the exact solutions are also obtained, Table 3.

For both of the thickness to length ratios, the R-M solutions with full integration have considerably smaller convergence rates which is due to the shear locking effect. The convergences rates decrease as  $h/L$  ratio decreases from 1/50 to 1/100 and increase as the shear parameter of the foundation increases. The convergence rates for the Kirchhoff solutions are the largest and they almost remain the same for decreasing  $h/L$  ratio and increasing shear parameter.

Table 3. Convergence rates for the simply supported plate-foundation system

$h/L$	$k_w'$	$k_p'$	Kirchhoff	R-M (full int.)	R-M (sel. int.)
1/50	1	1	2.2	0.7	1.8
	1	$3^4$	2.3	0.9	1.8
	1	$5^4$	2.1	1.3	1.8
1/100	1	1	2.2	0.4	1.8
	1	$3^4$	2.1	0.8	1.8
	1	$5^4$	2.2	1.3	1.8

**Clamped square plate on Pasternak foundation**

The boundary conditions of the same plate-foundation system are converted from simply supported to clamped and the system is solved for the same thickness to length ratios and foundation parameters, Figure 7.

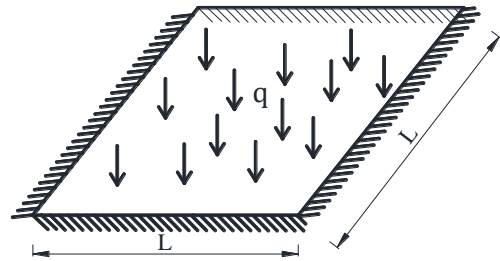
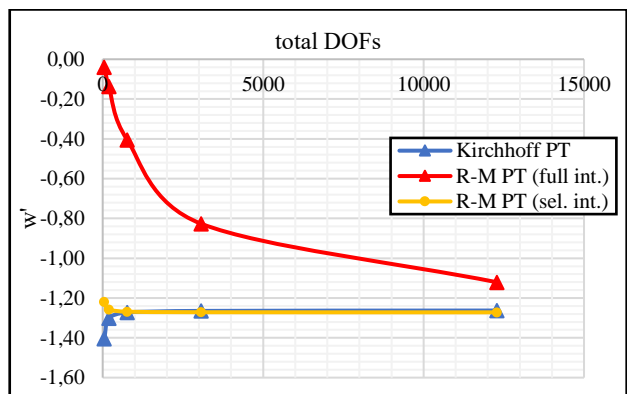
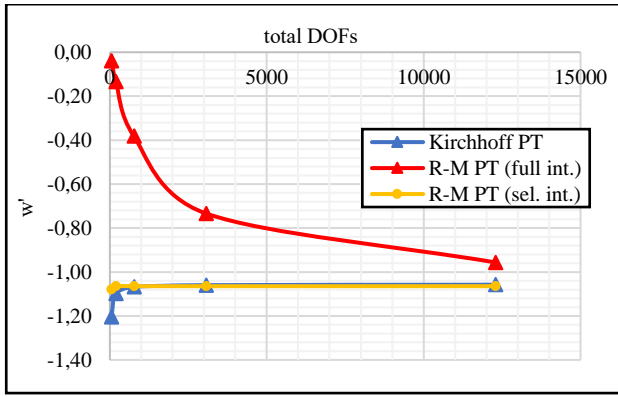


Figure 7. Clamped square plate-foundation system

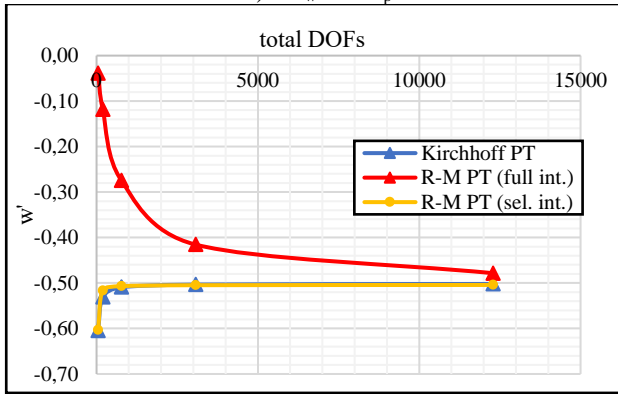
It is observed from the dimensionless midpoint deflections that the shear locking problem is more effective than the simply supported case for  $h/L=1/50$  and this effect is more evident as the thickness to length ratio decreases from 1/50 to 1/100 as seen in Figures 8-9. The dimensionless deflections are the same for the Kirchhoff solution and the R-M solution with selective integration. For the dimensionless foundation parameters  $k_w'=1$  and  $k_p'=1$ , the curves obtained for mesh refinement are steeper for  $h/L=1/100$  and there is no tendency to converge to specific values even for the finest mesh, Figure 9a. Closer values are obtained using the R-M elements with full integration as the dimensionless foundation shear parameter increases, Figures 9b-9c.



a)  $k_w'=1 \quad k_p'=1$

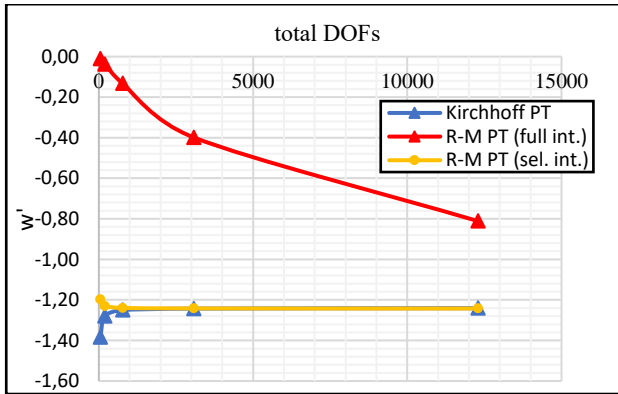


b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$

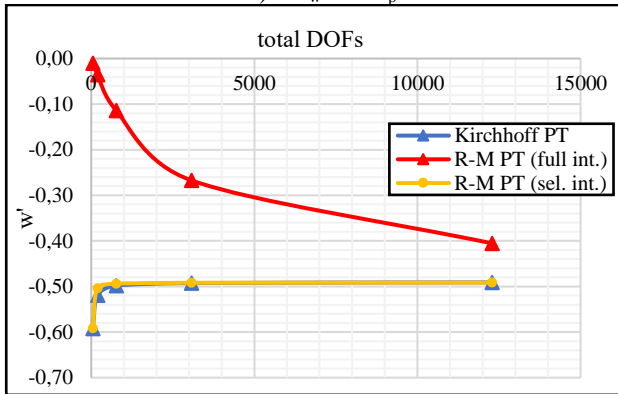


c)  $k_w'=1$   $k_p'=5^4$

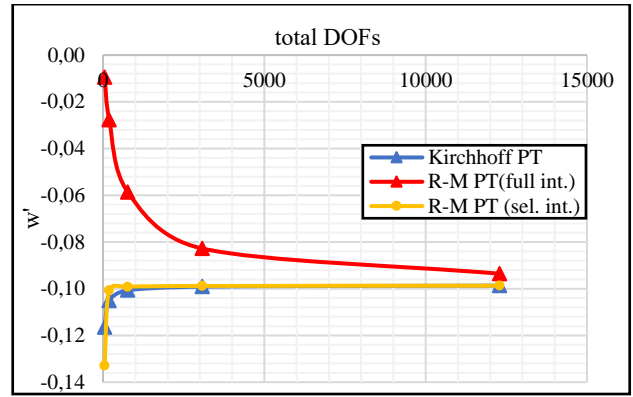
Figure 8. Dimensionless central deflections ( $w'$ ) of the clamped square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/50$ )



a)  $k_w'=1$   $k_p'=1$



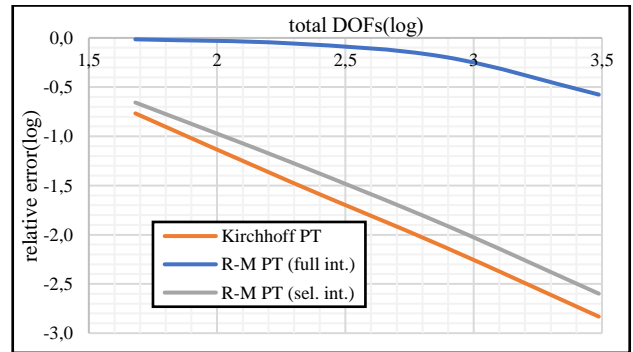
b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$



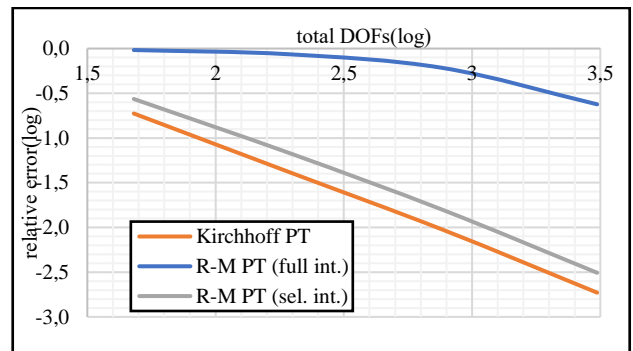
c)  $k_w'=1$   $k_p'=5^4$

Figure 9. Dimensionless central deflections ( $w'$ ) of the clamped square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/100$ )

The relative errors for the clamped plate-foundation system are given in Figures 10-11. Compared to the simply supported case, the errors obtained using the R-M elements with selective integration are closer to those obtained using the Kirchhoff plate elements. For  $h/L=1/50$ , the relative errors decrease for  $k_p'=5^4$  when R-M elements with full integration is used and increase slightly for the R-M solution with selective integration and the Kirchhoff solution as the shear parameter increases, Figure 10.

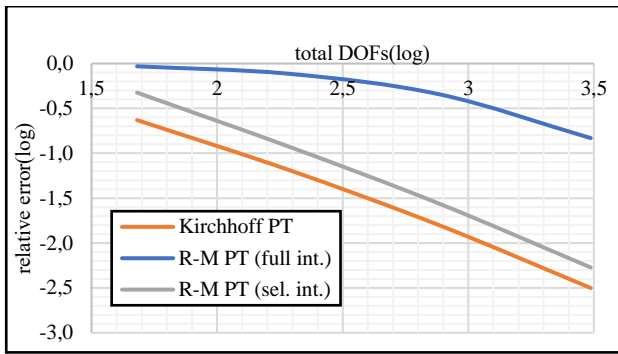


a)  $k_w'=1$   $k_p'=1$



b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$

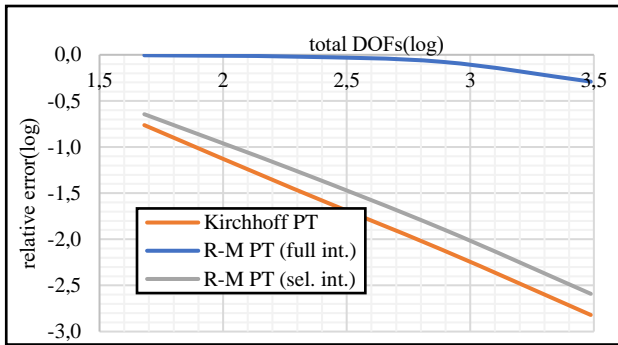




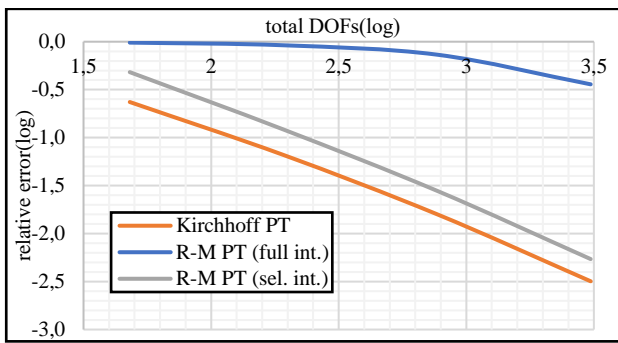
c)  $k_w'=1$   $k_p'=5^4$

Figure 10. Relative errors of the clamped square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/50$ )

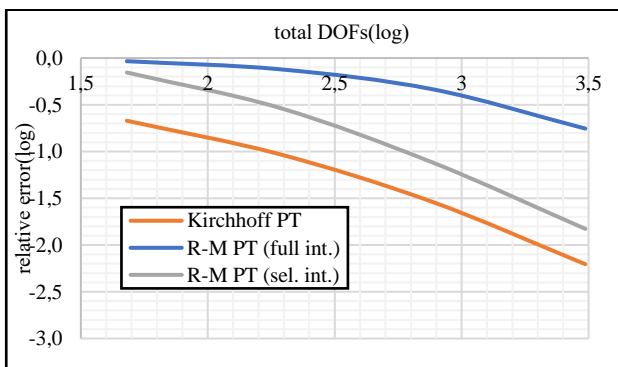
For  $h/L=1/100$ , as the shear parameter increases, the relative errors decrease when using the R-M elements with full integration and increase when the R-M elements with selective integration and the Kirchhoff elements are used.



a)  $k_w'=1$   $k_p'=1$



b)  $k_w'=1$   $k_p'=3^4$



c)  $k_w'=1$   $k_p'=5^4$

Figure 11. Relative errors of the clamped square plates on Pasternak foundations for mesh refinement ( $h/L=1/100$ )

The convergence rates of the numerical solutions to the exact solutions are given in Table 4 comparatively.

It is observed that the convergence rates for the Kirchhoff solution almost remain the same for decreasing  $h/L$  ratio and increasing shear parameter except for  $h/L=1/100$  and  $k_p'=5^4$ . When the R-M plate elements with full integration are used, the convergence rates are the smallest. The rates increase for increasing shear parameter and decrease as  $h/L$  ratio decreases. Using the R-M elements with selective integration, the convergence rates remain the same except for  $h/L=1/100$  and  $k_p'=5^4$ .

Table 4. Convergence rates for the clamped plate-foundation system

$h/L$	$k_w'$	$k_p'$	Kirchhoff	R-M (full int.)	R-M (sel. int.)
1/50	1	1	2.3	0.6	2.2
	1	$3^4$	2.2	0.7	2.2
	1	$5^4$	2.1	0.9	2.2
1/100	1	1	2.3	0.3	2.2
	1	$3^4$	2.1	0.5	2.2
	1	$5^4$	1.7	0.8	1.9

### Conclusions

In this paper, the finite element analyses of thin plates resting on Pasternak foundations are performed for two thickness to length ratios, two different boundary conditions and three different foundation parameters. The presented Kirchhoff and R-M plate elements are used in the implementation with full and selective integrations and the dimensionless midpoint deflections and the convergence rates due to a uniform loading are obtained and compared with each other.

It is demonstrated that the thin plate-foundation system can easily be modelled by adding the parameter matrices of an existing soil finite element to the respective stiffness matrix terms of both Kirchhoff and R-M plate finite elements.

It is observed that the shear locking effect arises when full integration is used in the implementation of R-M PT and this effect is more evident as the thickness to length ratio of the plate decreases. By using full integration with  $2 \times 2$  Gauss points for the bending stiffness matrix and selective integration with a single Gauss point for the shear stiffness matrix of the plate element, this problem is alleviated.

Convergence rates do not change significantly for increasing shear parameter of the foundation except for the R-M PT implementation with full integration where the rates increase with increasing shear parameter. Another exception is that the convergence rates for the largest shear parameter for Kirchhoff and R-M (sel.int.) solutions are smaller when the plate-foundation model is clamped.

The convergence rates for R-M solutions with full integration are smaller than the rates for the Kirchhoff and R-M (sel. int.) solutions for both of the boundary

conditions and as the thickness of the plate decreases, the rates decrease considerably because of the shear locking effect.

For the Kirchhoff and R-M (sel. int.) solutions, the convergence rates are close to each other for the simply supported plate-foundation system compared to the clamped case.

For the simply supported case, the convergence rates do not change for the Kirchhoff and change slightly for R-M(sel. int.) solutions whereas the convergence rates do not change for both solutions for the clamped plate case as the  $h/L$  ratio decreases.

Besides, it is observed that although the most converged deflection values are obtained when the finest mesh (64x64) is used in the analyses, it is computationally expensive in terms of time. Using a (32x32) mesh for the Kirchhoff and R-M (sel. int.) solutions would be more suitable since the running time is significantly short and very close results are obtained.

## References

- [1] A.E.H. Love, "The small free vibration and deformation of a thin elastic shell". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, vol. 179, pp. 491-546, 1888.
- [2] G. Kirchhoff, "Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe", *J. Reine Angew. Math.*, vol. 40, pp. 51-88, 1850.
- [3] E. Reissner, "The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 67, pp. A67-A77, 1945.
- [4] R.D. Mindlin, "Influence of rotary inertia and shear on flexural motion of isotropic elastic plates", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, pp. 31-38, 1951.
- [5] Ü.H. Çalık-Karaköse, "Static analysis of thin plates using Kirchhoff and Reissner-Mindlin plate theories", *The 15th International Scientific Research Congress-Science and Engineering Sciences - (UBAK)*, 17-18 December 2022, Ankara.
- [6] E. Winkler, "Theory of Elasticity and Strength of Materials". *Dominicus, Prague*, 1867.
- [7] P.L. Pasternak, "On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two foundation constants". *Cosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow, USSR*, pp. 1-56, 1954.
- [8] C.V.G. Vallabhan, W.T. Straughan, Y.C. Das, "Refined Model of Analysis of Plates of Elastic Foundations". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 117, no. 12, pp. 2830-2844, 1994.
- [9] M. Çelik, and A. Saygun, "A method for the analysis of plates on a two-parameter foundation", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 36, pp. 2891-2915, 1999.
- [10] A. Joodaky and I. Joodaky, "A semi-analytical study on static behavior of thin skew plates on Winkler and Pasternak foundations", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 100, pp. 322-327, 2015.
- [11] Gan, J., Yuan, H., Li, S., Peng, Q., Zhang, H., "A computing method for bending problem of thin plate on Pasternak foundation", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 7, pp. 1-10, 2020.
- [12] Y. Xiang, C.M. Wang, S. Kitipornchai, "Exact vibration solution for initially stressed Mindlin plates on Pasternak foundation". *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 36, no. 4, pp. 311-316, 1994.
- [13] M.H. Omurtag, A. Ozutok, A.Y. Akoz, "Free vibration analysis of Kirchhoff plates resting on elastic foundation by mixed finite element formulation based on Gateaux differential". *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 295-317, 1997.
- [14] D. Zhou, Y.K. Cheung, S.H. Lo, F.T.K. Au, "Three-dimensional vibration analysis of rectangular thick plates on Pasternak foundations". *Int. J. Numer. Methods. Eng.*, vol. 59, no. 10, pp. 1313-1334, 2004.
- [15] MATLAB R2019a, Natick, Massachusetts: The Mathworks, Inc.
- [16] R.J. Melosh, "Structural analysis of solids". *J. Structural Engineering*, ASCE, vol. 4, pp. 205-223, 1963.
- [17] O.C. Zienkiewicz, and Y.K. Cheung, "The finite element method for analysis of elastic isotropic and isotropic slabs". *Proc. Inst. Civ. Engng.*, vol. 28, pp. 471-88, 1964.
- [18] O.C. Zienkiewicz, and Y.K. Cheung, "Finite element procedures in the solution of plate and shell problems in Stress Analysis", *O.C. Zienkiewicz and G.S. Holister (Eds.), Chapter 8. John Wiley & Sons, Chichester*, 1965.
- [19] T.J.R. Hughes, R.L. Taylor, and W. Kanok-Nukulchai, "A simple and efficient finite element for plate bending", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, vol. 11, pp. 1529-43, 1977.
- [20] E.D.L. Pugh, E. Hinton, and O.C. Zienkiewicz, "A study of quadrilateral plate bending elements with reduced integration". *J. Appl. Mech.*, vol. 12, pp. 1059-1079, 1978.
- [21] Ü.H. Çalık-Karaköse, "Influence Surface Coefficients of Plates Resting on Pasternak Foundation", *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)*, vol. 13, no. 2, pp. 371-377, 2022.
- [22] K.Y. Lam, C.M. Wang, X.Q. He, "Canonical exact solution for Levy-plates on two-parameter foundation using Green's functions". *Eng. Struct.*, vol. 22, no. 4, pp. 364-378, 2000.



# Deprem Mühendisliği Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Açık Kaynaklı Bir Yazılım Geliştirilmesi: DARLA (Versiyon 1.0)

## *Development of Open Source Software for Use in Earthquake Engineering Applications: DARLA (Version 1.0)*

Ülgen Mert Tuğsal<sup>1\*</sup>, Ahu Kömeç Mutlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gebze Teknik Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [umtuğsal@gtu.edu.tr](mailto:umtuğsal@gtu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7304-4432>

<sup>2</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, [ahumutlu@gtu.edu.tr](mailto:ahumutlu@gtu.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2243-7302>

### MAKALE BİLGİLERİ

#### Makale Geçmişi:

Geliş 3 Şubat 2023  
Revizyon 10 Mart 2023  
Kabul 14 Mart 2023  
Online 23 Mart 2023

#### Anahtar Kelimeler:

Tepki Spektrumları, Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları, Python, Deprem Mühendisliği

### ÖZ

Günümüz teknolojisindeki ivmelenmeler neticesinde deprem mühendisliğindeki uygulamalarda kullanılmak üzere deprem karakteristik özellikleri ve mühendislik şiddet parametreleri hızlı ve pratik bir şekilde belirlenebilir olmuştur. Bu gelişme çerçevesinde yazılımsal olarak parametrelerin pratik hesaplamalarını amaçlayan uygulamalarda artış gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, Python yazılım dili kullanılarak, belli bir depreme ait, kuvvetli yer hareketi kayıtları zaman serisi kayıtlarından, maksimum ivme (*Peak Ground Acceleration (PGA)*), maksimum hız (*Peak Ground Velocity (PGV)*) ve maksimum yerdeğiştirme (*Peak Ground Displacement (PGD)*) değerleri hesaplanmış; kayıtlara ait hız-ivme-yerdeğiştirme zaman serileri üretilmiş; tepki spektrumları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY-2018) tanımlanmakta olan tasarım spektrumları ile karşılaştırılarak görselleştirilmiştir. Deprem sinyallerinin frekans içerikleri de ayrıca elde edilmiştir (Fourier Amplitude – Frequency grafikleri). Elde edilen çıktılar görselleştirilerek, yorum kolaylığı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen açık kaynaklı yazılım (*Depremlerin kARakteristik özeLliklerini Ayırıştırma: DARLA v1.0*) yardımıyla, deprem meydana geldiği andan itibaren bölge özelinde deprem mühendisliği anlamında yarı-otomatik üretilen bilimsel veriler ışığında hızlı değerlendirme yapılması hedeflenmiştir.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 3 February 2023  
Received in revised form 10 March 2023  
Accepted 14 March 2023  
Available online 24 March 2023

#### Keywords:

Response Spectra, Strong Ground Motion Records, Python, Earthquake Engineering

### ABSTRACT

It is an important issue that earthquake characteristics and engineering intensity parameters can be determined quickly and practically to be used in earthquake engineering applications in the light of new developing technologies. Within this context, an increase is observed in software integration of engineering parameters. In this study, using Python software language, maximum acceleration (*PGA*), maximum velocity (*PGV*), and maximum displacement (*PGD*) values were calculated from time series records of strong ground motions of a certain earthquake; velocity-acceleration-displacement time series of records were produced; response spectra were visualized by comparing them with the design spectra defined in the Turkish Building Earthquake Code (TBDY-2018). Frequency contents of earthquake signals were also obtained (Fourier Amplitude – Frequency plots). It is aimed to provide ease of interpretation by visualizing the outputs obtained. With the help of the open-source software DARLA (ver1.0), which was developed within the scope of this study, it is intended to make a rapid assessment in the light of semi-automatically produced scientific data, in terms of earthquake engineering, specific to the region, from the moment the earthquake occurred.

Doi: 10.24012/dumf.1247285

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Türkiye tektonik açıdan karmaşık ve sismik olarak aktif bir coğrafyaya sahiptir. Bu açıdan bakıldığında, deprem-zemin-yapı kapsamında üretilen bilimsel çalışmaların literatür katkısı önem kazanmaktadır. Meydana gelen orta ve büyük ölçekli depremlerde yalnızca depreme ait sismolojik parametrelerin (yeri, büyüklüğü, zamanı, derinliği vb.) değil depremin yapı ve zeminini maruz bıraktığı etkiyi, yapı ve zeminin deprem sinyaline verdiği tepkiyi tespit etmek de mühendislik çalışmaları açısından önemlidir.

Deprem mühendisliği ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; depremlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi ve mühendislik uygulamalarında ihtiyaç duyulan kuvvetli yer hareketi parametrelerinin türetilmesi konularında literatürde çok sayıda yayın mevcuttur. Örnek çalışmalardan bir tanesinde Yunanistan için mühendislik yer hareketi parametrelerinin ampirik bağıntılarla hesaplanarak, yer hareketi kaydının genliği, frekans içeriği, süresi ve enerjisinin etkilerini araştırarak sönüm ilişkisi denklemlerine dahil edilmiştir [1]. Benzer şekilde, mühendislik parametrelerini hesaplamak için, kuvvetli yer hareketi verilerini işlemek üzere yazılmış açık kaynaklı yazılım örneği olarak OpenSeismoMatlab yazılımı gösterilebilir [2]. OpenSeismoMatlab, çeşitli zaman serilerini ve tepe değerlerini, Arias yoğunluğunu, önemli süreyi, çeşitli lineer elastik tepki spektrumlarını, Fourier genlik spektrumunu ve ortalama periyodu hesaplayabilen bir yazılım algoritmasına sahiptir.

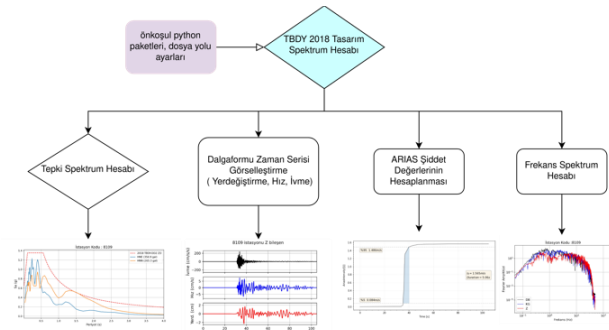
Günümüz teknolojisindeki ivmelenmeler neticesinde deprem mühendisliğindeki uygulamalarda kullanılmak üzere deprem karakteristik özellikleri ve mühendislik şiddet parametreleri hızlı ve pratik bir şekilde belirlenebilir olmuştur. Bu gelişme çerçevesinde yazılımsal olarak parametrelerin pratik hesaplamalarını amaçlayan uygulamalarda artış gözlemlenmektedir.

Tasarım spektrumu, mühendislerin bir yapının sismik tasarım aşamasında maruz kalacağı sismik kuvvetleri tahmin etmesine olanak sağlayan önemli bir araçtır. Tasarım spektrumu, belirli bir bölgede beklenen maksimum yer hareketinin periyot ve spektral ivme büyüklüğüne bağlı olarak ifade edilen grafiksel bir temsili olup, o bölgede meydana gelecek belirli bir yer hareketi seviyesinin olasılığı olan sismik tehlike kavramına dayanmaktadır. Sismik tehlike, yerel jeolojinin özelliklerine, depremin büyüklüğüne ve mesafesine ve sahadaki zemin tipine göre belirlenir. Deprem davranış (tepki) spektrumu ise, bir yapının belirli bir sönüm oranı için göz önüne alınan bir depreme maksimum tepkisinin belirli bir periyot aralığı için grafiksel bir gösterimidir. Tepki spektrumu, bir yapının deprem nedeniyle maksimum yer değiştirmesini, hızını ve ivmesini belirlemek ve bu sayede depremlerin etkilerine dayanacak yapılar tasarlamak için kullanılır.

Kuvvetli yer hareketi ölçümleri, deprem sırasında oluşan yer ivmesini zamanın veya frekansın fonksiyonu olarak vermekte ve deprem mühendisliği uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. İlgili depreme ait hız-ivme-yerdeğiştirme zaman serileri ve bu ivme serilerine ait tepki spektrumları üretilmektedir. Bu çalışma kapsamında, elde edilen tepki spektrumları Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) [3] tanımlanmakta olan tasarım spektrumları ile karşılaştırılarak görsel çıktılar üretilmiştir. Tepki spektrumu hesabında literatürde sıklıkla kullanılan bir sayısal hesaplama yöntemi olan Newmark metodu [4] kullanılmıştır. Bu yöntem aracılığıyla belirli bir zaman adımına ait dinamik denge denklemleri çözülerek çözüm bölgesine ait ivme, hız ve yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir [5]. Her bir deprem yer hareketi için maksimum yer ivmesi (PGA), Maksimum Yer Hızı (PGV) ve Maksimum Yerdeğiştirme (PGD) değerleri hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın ana çerçevesi, deprem mühendisliği uygulamalarında kullanılmak üzere deprem kayıtlarının kuvvetli yer hareketi parametrelerini hesaplayacak, kullanıcı ara yüzüne sahip açık kaynaklı bir yazılımın geliştirilmesidir. Yazılım dili olarak Python [6] açık kaynaklı kütüphaneleri kullanılmıştır. Geliştirilen yazılım eğitim ve araştırmalara katkı sağlamak üzere <https://github.com/SeismoStructure/DARLA> sayfasından erişime açıktır.

Geliştirilen DARLA (v1.0) (Depremlerin kARakteristik özelleliklerini Ayırıştırma) yazılımına ait iş akışı Şekil 1 ile gösterilmiş ve detayları metin içinde açıklanmıştır.



Şekil 1. DARLA (v1.0) İş Akış Şeması

## Ön Koşullar

Python açık kaynaklı yazılımı, dünya genelinde araştırmacı ve yazılımcıların kendi amaçları doğrultusunda hazırlayarak, ortak kullanıma sunduğu zengin bir kütüphaneye sahiptir. DARLA (v1.0) çalıştırılmadan önce aşağıda listelenmiş yazılım paketlerinin yüklenmesi gerekmektedir.

- Matplotlib (versiyon 3.2.0) [7]
- openquake.engine [8]
- gmpe-smtk-master [9]

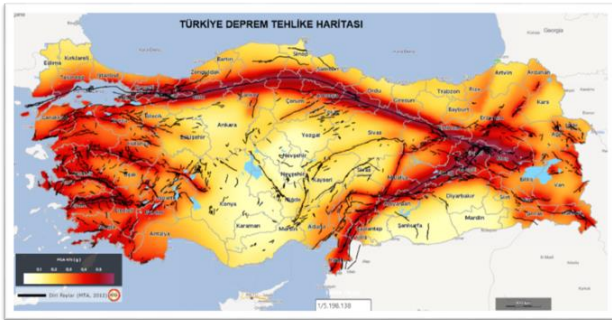
Python kütüphanesinden çağırılması gereken modüller DARLA (v1.0) içerisine yerleştirilmiştir.

## Deprem verilerinin hazırlanması

Çalışmada kullanılmak üzere tespit edilen depreme ait, kuvvetli yer hareketi kayıtları zaman serisi üç bileşen olarak ilgili yerel ve/veya uluslararası veri ağlarından Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (BUKRAE-BDTİM) (<https://doi.org/10.7914/SN/KO>) [10]; T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistemi (AFAD-TADAS), (<https://doi.org/10.7914/SN/TK>) [11]; The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) [12]; Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD) [13] temin edildikten sonra, deprem sinyal kayıtlarının bilgisayar üzerindeki dosya yapısına uygun olarak buldurulması ve ilgili dosyaların uzantılarına göre yazılım içinde gerek dosya yeri yolu (ör: /home/user/database/) gerek ise dosya adı uzantısı (ör: \*.asc, \*.ASC, \*.txt) güncellenmelidir.

### Giriş parametrelerinin tanımlanması

Bina tipi yapıların deprem etkisi altında tasarımında esas alınacak deprem yer hareketlerine ilişkin veriler, dört farklı deprem yer hareketi düzeyi için, 22/01/2018 tarih ve 2018/11275 sayılı Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları (Şekil 2) ile tanımlanmıştır (<https://tdth.afad.gov.tr/>) [14]. Giriş parametrelerinin tanımlanması aşamasında ilk olarak, çalışılacak depremin merkezüstü koordinatları kullanılarak Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen kısa periyot spektral ivme katsayısı ( $S_s$ ) ve 1.0 saniye periyot için spektral ivme katsayısı ( $S_1$ ) değerlerinin girilmesi gerekmektedir. Deprem yer hareketi spektrumları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi esas alınarak %5 sönüm oranı için, seçilen bu spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak tanımlanmaktadır. Tasarım spektrumunu elde etmek üzere farklı periyot değerleri de yazılım içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 2. Türkiye Deprem Tehlike Haritası  
(<https://tdth.afad.gov.tr/>)

### Tasarım spektrumu hesabı

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) [3] yapıların sismik kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlanmasına yönelik hükümleri içermektedir. Bu bağlamda tanımlanmış olan tasarım spektrumu, o bölgeye ait tehlike haritası verileri (deprem büyüklüğü, faya uzaklık, faylanma mekanizması, jeolojik özellikler ve yerel zemin koşulları v.b.), bölgeye ait geçmişte meydana gelmiş depremleri temsil etmektedir. Davranış spektrumlarının istatistiksel olarak çözümlenmesine dayanmaktadır.

TBDY-2018 [3]'de ifade edildiği üzere, çalışma bölgesinin noktasal koordinatları kullanılarak Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen  $S_s$  ve  $S_1$  değerleri ile yerel zemin sınıfına bağlı olarak tanımlanan yerel zemin etki katsayıları ( $F_s$  ve  $F_1$ ) bilgisi yazılıma girdi verisi olarak verilmektedir. İlgili yönetmelikte tanımlandığı şekli ile  $S_s$ ,  $S_1$  ve yerel zemin etki katsayılarına ait tablolar yazılımda mevcuttur. Tasarım spektral ivme katsayıları ( $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$ ) kullanılarak yatay ve düşey elastik tasarım spektrumları hesaplamaları yazılım tarafından yapılmaktadır.

#### Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

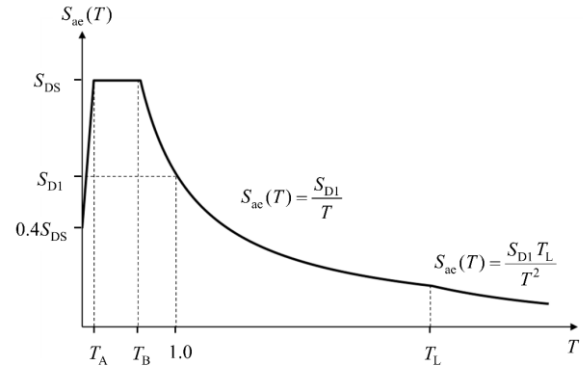
Gözönüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım ivme spektrumunun (Şekil 3) ordinatları olan yatay elastik spektral ivmeleri  $S_{ae}(T)$ , doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [ $g$ ] cinsinden Denklem (1)'de tanımlanmıştır:

$$S_{ae}(T) = \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} (T_A \leq T \leq T_B)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} (T_B \leq T \leq T_L) \quad (1)$$

$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} (T_L \leq T)$$



Şekil 3. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

Burada  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  Tasarım spektral ivme katsayılarını,  $T$  ise doğal titreşim periyodunu göstermektedir. Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları  $T_A$  ve  $T_B$  Denklem (2) ile  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  'e bağlı olarak tanımlanmaktadır:

$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (2)$$

Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu  $T_L = 6s$  alınmaktadır.

#### Düşey Elastik Tasarım Spektrumu

Gözönüne alınan herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için düşey elastik tasarım ivme spektrumunun (Şekil 4) ordinatları olan düşey elastik tasarım spektral ivmeleri  $S_{aeD}(T)$ , yatay deprem hareketi için tanımlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına ve doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [ $g$ ] cinsinden Denklem (3)'te tanımlanmaktadır:

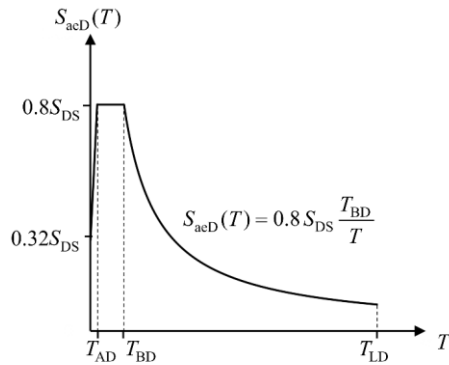
$$S_{aeD}(T) = \left(0.32 + 0.48 \frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} (0 \leq T \leq T_{AD})$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8 S_{DS} (T_{AD} \leq T \leq T_{BD})$$

$$S_{aeD}(T) = 0.8 S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})$$

Denklem (3)'te yer alan  $T_{AD}$  ve  $T_{BD}$  düşey spektrum köşe periyotları ile  $T_{LD}$  periyodu Denklem (4)'te verilmiştir:

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3}; T_{BD} = \frac{T_B}{3}; T_{LD} = \frac{T_L}{2}$$

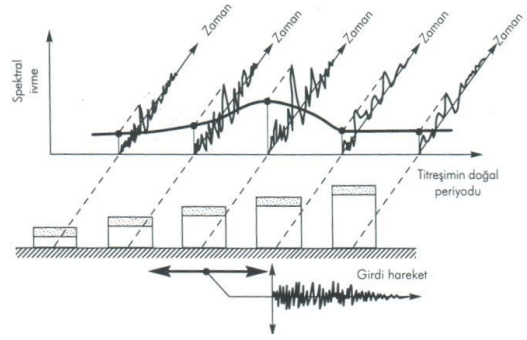


Şekil 4. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu

Bu çalışma kapsamında geliştirilen açık kaynaklı kod aracılığıyla, TBDY-2018 [3] yönetmeliğinde tanımlanmakta olan ve deprem mühendisliğinde temel öneme sahip tasarım spektrumu hızlı bir şekilde hesaplanmakta ve görselleştirilmektedir.

### Davranış (Tepki) spektrumu hesabı

Deprem sırasında açığa çıkan yer ivmesinin, yapısal sistemde oluşturacağı şekil değişimini, kütlelerin zemine görel hareketliliği olarak ifade etmek mümkündür. Kütlelerin mutlak yerdeğiştirmesi, yapı mühendisliği açısından ele alınması gereken en önemli tepkidir. Bu tepkiyi ifade eden davranış spektrumu, deprem mühendisliği pratiğinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Davranış tepki spektrumu, tek serbestlik dereceli bir sistemin belirli bir yer hareketi altındaki davranışının, sistemin sönüm oranı ve doğal periyodunun bir fonksiyonu olarak gösterimidir. Davranış spektrumu, yer hareketinin farklı doğal periyotlardaki yapılar üzerindeki etkisini yansıtır [15] (Şekil 5). Başka bir deyişle, çok sayıda farklı yapının maksimum davranışını göstermektedir.



Şekil 5. Davranış Spektrumunun elde Edilmesi [15]

Bu çalışma kapsamında davranış spektrumlarının elde edilmesi aşamasında ilk olarak çalışılacak depreme ait ivme kayıtları ilgili yerel ve/veya uluslararası veri ağlarından çekilerek hazır edilmektedir. Doğal titreşim periyodu aralığı ve sönüm oranı seçilmektedir. Bu seçimin mühendislik uygulamalarındaki tüm yapıları kapsayabilmesi açısından geniş bir periyod aralığı kullanılmıştır (0.01sn – 4.sn) ve %5 sönüm değerleri için uygulanmıştır.

Tepki spektrumu hesabında literatürde sıklıkla kullanılan bir sayısal hesaplama yöntemi olan Newmark metodu [4] kullanılmıştır. Bu yöntem aracılığıyla belirli bir zaman adımına ait dinamik denge denklemleri çözülerek çözüm bölgesine ait ivme, hız ve yerdeğiştirme değerleri elde edilmektedir [5]. Her bir deprem yer hareketi için maksimum yer ivmesi (*PGA*), Maksimum Yer Hızı (*PGV*) ve Maksimum Yerdeğiştirme (*PGD*) değerleri hesaplanmıştır.

### Fourier spektrumu hesabı

Fourier dönüşümü yöntemi, lineer sistemlerin karakterize edilmesinde ve sinyalin frekans içeriğini tanımlamada uzun yıllardır kullanılan bir yöntemdir. Sinyalin farklı genlik ve fazlardaki dalga serileri ile ifade edilmesi, dolayısı ile sinyalin frekans içeriği bilgisinin edinilmesinde önemli bir matematiksel araçtır. Kuvvetli yer hareketi verilerinin Fourier Spektrumu, bir deprem sırasında kaydedilen sismik dalgaların frekans içeriğini ifade etmektedir ve yer hareketinin özelliklerini anlamak için önemli bir araçtır. Fourier spektrumu, her frekansta sinyaldeki toplam enerjinin grafiksel bir temsildir ve yapısal tasarım için önemli olabilecek sinyalin frekans bileşenlerini belirlemek için kullanılabilir. Fourier spektrumu, yer hareketi kayıtlarındaki yüksek frekans bileşenlerinin görel gücünü belirlemek ve ölçmek için de kullanılabilir. Bu, daha yüksek frekanslı titreşimlerden kaynaklanan yapısal hasar potansiyelini değerlendirmek için önemli bir araçtır.

Bu amaçla DARLA (v1.0) yazılım basamaklarından biri olarak ilgili deprem ait Fourier spektrumları hesaplanmış ve görselleştirilmiştir.

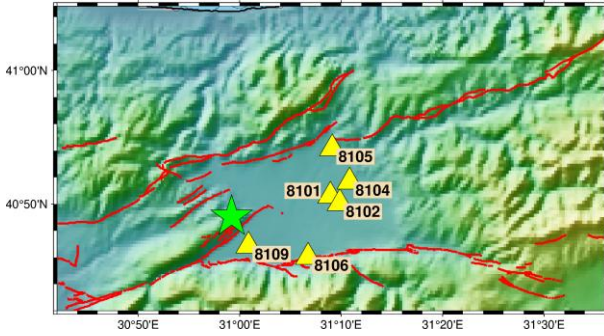
### Arias şiddeti hesabı

Arias Şiddet Hesaplaması (*AIC*), kuvvetli yer hareketi verilerinin yoğunluğunu hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Bir deprem tarafından salınan enerjinin bir ölçüsü olan Arias Yoğunluğu (*AI*) denkleminde dayanmakta olan önemli bir mühendislik parametresidir. *AIC* yöntemi, *AI*'yi hesaplamak için yer hareketi verilerinin en yüksek

yer ivmesi (PGA) ve en yüksek yer hızı (PGV) değerlerini kullanır. Yer hareketi verilerinin maksimum genliği alınarak aynı verilerin tepe yer ivmesine (PGA) bölünmesiyle hesaplanır. Arias Yoğunluğu daha sonra PGA'nın yüzdesi olarak ifade edilir. Bu parametre, bir depremin şiddetini değerlendirmek ve farklı depremlerin yoğunluğunu karşılaştırmak için kullanılabilir. Sismik aktiviteye dayanacak şekilde tasarlanan yapıların tasarım parametrelerini belirlemek için göz önüne alınan önemli bir büyüklüktür [16] (Arias, 1970). Bu amaçla DARLA (v1.0) yazılım basamaklarından biri olarak ilgili deprem ait Arias yoğunlukları hesaplanmış ve görselleştirilmiştir.

### Uygulama Örneği: 23 Kasım 2022 Gölyaka - Düzce Depremi ( $M_w=5.9$ )

23 Kasım 2022 günü yerel saat ile 04:08'de merkez üssü Gölyaka (Düzce) olan  $M_w$  5.9 büyüklüğünde bir deprem meydana gelmiş ve çevresindeki birçok il ve yerleşim yerinde hissedilmiştir. Depremin ardından, AFAD-TADAS [11] tarafından sağlanan ivme kayıtlarına ulaşılarak 6 adet sismik kayıttıya (Şekil 6) ait sayısal veri ASCII (\*.asc) formatında web sayfası üzerinden yerel bilgisayara aktararak DARLA v1.0 yazılımı çalıştırılmıştır. Şekil 6'da yeşil yıldız imgesi 23.11.2022 Gölyaka-Düzce depremi merkezüstünü, sarı üçgen sembolleri ADAF-TADAS [11] tarafından işletilen ve çalışma kapsamında verisi değerlendirilen sismik kayıtların konumlarını temsil etmektedir.



Şekil 6. Sismik kayıttı haritası AFAD-TADAS [11].

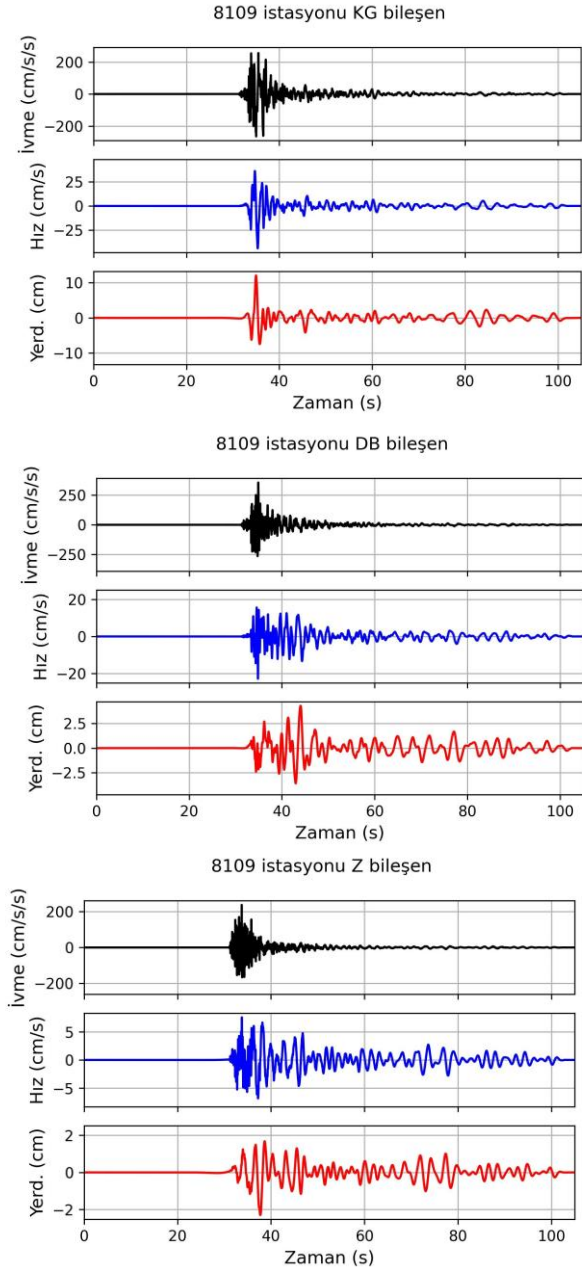
Dosya isim ve uzantılarında yapılan güncellemeler ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndan alınan  $S_s$  ve  $S_1$  spektral ivme katsayılarının yazılımda güncellenmesinin ardından DARLA (v1.0) sorunsuz olarak çıktı üretmiş ve elde edilen bulgular araştırmacıların yorumuna sunulmuştur.

DARLA (v1.0) çıktılarının AFAD-TADAS [11] web sayfası üzerinden yayınlanan ilgili mühendislik parametreleri ile uyumlu olduğu, elde edilen spektrumların ve spektral değerlerin birbiri ile örtüştüğü gözlenmiştir. AFAD-TADAS spektrum tablosu üzerinden alınan PGA değerleri ile ilgili web sayfasından alınan, işlenmiş ivme verileri kullanılarak elde edilen DARLA (v1.0) çıktısı olan PGA değerleri arasında çok küçük sayısal farklılıklar gözlenmektedir. İlgili çıktılar Şekil 7, 8, 9 ve Şekil 10 ile Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Kuvvetli yer ivmesi değerleri (K-G bileşeni için, gal cinsinden listelenmiştir)

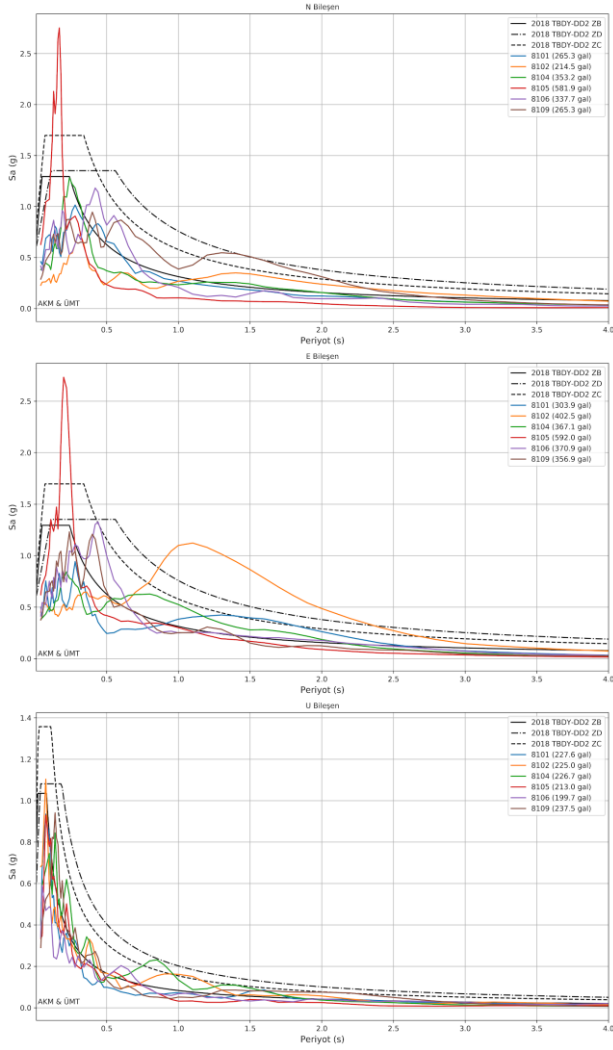
İstasyon Kodu	PGA (gal) (AFAD-TADAS)	PGA (gal) (DARLA v1.0)	$R_{epi}$
8101	246.4	265.3	10.67
8102	213.4	214.5	11.79
8104	353.2	353.2	13.74
8105	581.9	581.9	13.88
8106	336.0	337.7	9.63
8109	265.3	265.3	4.75

DARLA (v.10) yazılımı aracılığıyla her bir istasyondan alınan kuvvetli yer hareketi kayıtlarına ait ivme-hız-yerdeğiştirme zaman grafikleri elde edilmiş olup, Şekil 7'de 8109 no'lu istasyon için örnek verilmiştir.



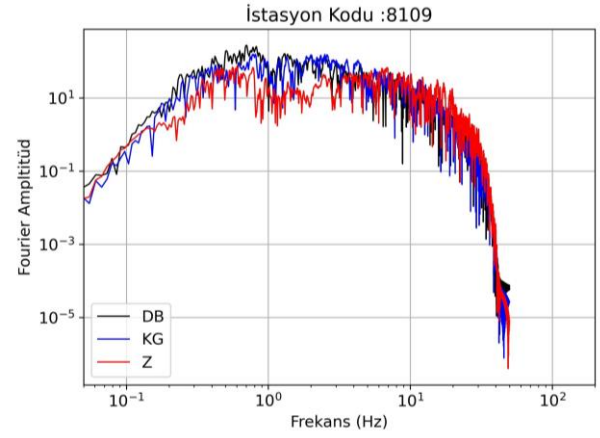
Şekil 7. 8109 no'lu istasyondan alınan kuvvetli yer hareketi kaydına ait ivme-hız-yerdeğiştirme zaman grafikleri

Her bir istasyondan alınan kuvvetli yer hareketi kayıtlarına ait davranış spektrumları elde edilmiş ve TBDY-2018 [3]'de tanımlanmakta olan tasarım spektrumları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de görselleştirilmiştir.



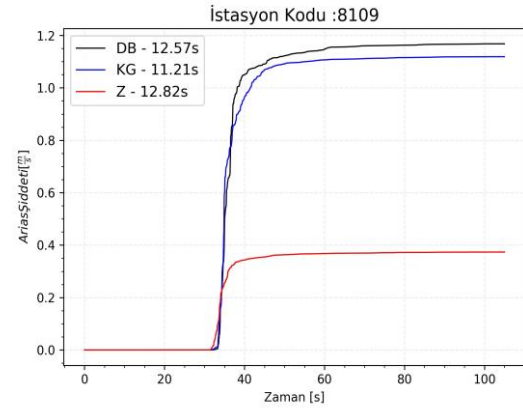
Şekil 8. Kuvvetli yer hareketi kayıtlarına ait davranış spektrumları ve TBDY-2018 tasarım spektrumları karşılaştırması

Çalışma kapsamında kullanılan kuvvetli yer hareketi kayıtlarına ait Fourier Spektrumları elde edilmiş ve 8109 no'lu istasyona ait her üç ivme bileşeni için elde edilmiş olan spektrum örnek olarak Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. 8109 no'lu istasyona ait kuvvetli yer hareketi kayıtlarının her üç bileşenine ait Fourier spektrumları

Son aşamada çalışmada yer verilen 8109 no'lu istasyona ait kuvvetli yer hareketi kayıtlarının her üç bileşenine ait Arias şiddeti hesaplamaları yapılmış ve Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. 8109 no'lu istasyona ait kuvvetli yer hareketi kayıtlarının her üç bileşenine ait Arias şiddeti hesaplamaları

## Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada, meydana gelen orta ve yıkıcı büyüklüğe sahip bir depremin ardından deprem karakteristik özelliklerinin araştırılması ve ilgili mühendislik parametrelerinin hesaplanması/görselleştirilmesi amacıyla açık kaynaklı bir yazılım hazırlanarak ortak kullanıma sunulmuştur. Kuvvetli yer hareketi kayıtları zaman serileri 3 bileşen (*KG*, *DB*, *Z*) olarak ilgili yerel ve/veya uluslararası veri ağlarından temin edilerek ilgili ara yüze



aktarılmıştır. Kayıtlara ait ivme, hız ve yerdeğiştirme zaman serileri elde edilmiştir. Her bir istasyondan alınan kayıtların üç bileşeni için davranış spektrumları elde edilmiş ve TBDY-2018’de verilen tasarım spektrumları ile karşılaştırılmıştır. İlgili depremlere ait Fourier spektrumları ve Arias şiddetleri hesaplanmış ve yazılımda görselleştirilmiştir. Hesaplanan mühendislik şiddet parametreleri için literatürde tanımlı ve geçerli olan ampirik bağıntı ve formüller kullanılmıştır.

Yazılım dili olarak Python açık kaynaklı kütüphaneler kullanılmış olup DARLA (v1.0) Github sayfası üzerinden paylaşımına açılmıştır. Planlanan çalışmalar kapsamında, yazılım üzerinde yapılacak güncellemelerle, deprem meydana geldiği andan itibaren bölge özelinde gerek sismolojik gerek deprem mühendisliği çıktıları üretilecektir. Geliştirilmesi planlanan kullanıcı dostu arayüzü ile DARLA (v1.0) kullanılarak raporlanacak olan bu şiddet parametrelerini içeren bilimsel veriler ışığında hızlı değerlendirme yapılması imkânı olacaktır.

### Teşekkür

Bu çalışmada AFAD (<https://doi.org/10.7914/SN/TK>) sismik verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verileri araştırmacıların kullanımına açtıkları için kuruma teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- [1] Danciu, L. & Tselentis, A. (2007). Engineering Ground-Motion Parameters Attenuation Relationships for Greece. Bulletin of The Seismological Society of America - BULL SEISMOL SOC AMER. 97. 162-183. 10.1785/0120050087.
- [2] Papazafeiropoulos, G. & Plevris, V. (2018). OpenSeismoMatlab: A new open-source software for strong ground motion data processing. Heliyon. 4. e00784. 10.1016/j.heliyon.2018.e00784.
- [3] TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- [4] Newmark, N. M. (1959), A method of computation for structural mechanics, Journal of Eng. Mechanics, ASCE, 85(EM3), 67-94.
- [5] Bathe, K.-J. (1996), Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [6] Van Rossum, G. and Drake, F.L. (2006) Python Reference Manual. <http://docs.python.org/ref/ref.htm>
- [7] Matplotlib Development Team. Matplotlib: A comprehensive library for creating static, animated, and interactive visualizations in Python. Comput. Sci. Eng., 21(3):22-30, 2019.
- [8] Quake.engine (2020). Quake.engine. Retrieved May 26, 2020, from <https://quake.engine.org/>
- [9] Kumar, S., & Kijko, A. (2019). Python and OpenQuake-based Toolkit for Analysis of Strong Motions and Interpretation of GMPEs. Seismological Research Letters, 90(4), 1245-1257. doi:10.1785/0220180114 <https://github.com/GEMScienceTools/gmpe-smtk> (Erişim tarihi :03.02.2023)
- [10]Boğaziçi Ün. Kandilli Rast. Ve Deprem Araşt. Enst. Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi (<https://doi.org/10.7914/SN/KO>) (BUKRDAE-BDTİM) <http://www.koeri.boun.edu.tr/new/> (Last access : 17.02.2022)
- [11]T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı Türkiye İvme Veritabanı ve Analiz Sistem (<https://doi.org/10.7914/SN/TK>), (AFAD-TADAS) <https://tadas.afad.gov.tr/> (Last access : 17.02.2022)
- [12]The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) <https://peer.berkeley.edu/research/data-sciences> (Last access : 17.02.2022)
- [13]Center for Engineering Strong Motion Data (CESMD) <https://www.strongmotioncenter.org/> (Last access : 17.02.2022)
- [14]Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, AFAD (2018) (<https://tdth.afad.gov.tr/>)
- [15]Kramer, S.L. (2003) Geoteknik Deprem Mühendisliği, Çeviren: Doç. Dr. Kamil Kayabalı, Gazi Kitabevi.
- [16]A. Arias A., “A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ (ed) Seismic design for nuclear power plants. MIT Press, Cambridge MA, pp 438–483. (1970).