



e-ISSN: 2149-3367

e-ISSN: 2149-3367

CİLT / VOLUME: XXI

SAYI / NUMBER: 5

EKİM / OCTOBER 2021

## FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

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

# Afyon Kocatepe Üniversitesi FEN ve MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ

Afyon Kocatepe University  
Journal of Science and  
Engineering



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

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

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

*Afyon Kocatepe University  
Journal of Science and Engineering*

Cilt / Volume 21  
Sayı / Number 5

e – ISSN: 2149-3367

EKİM 2021

OCTOBER 2021



## **Derginin Amacı ve İçeriği**

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

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

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

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

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

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

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

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



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

**EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF**

---

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

**ALAN EDİTÖRLERİ / EDITORIAL BOARD**

---

Afife Binnaz HAZAR, Metallurgy and Materials Engineering, Yıldız Teknik University, (Turkey)

*e-mail: afife.hazar@gmail.com*

Ahmet YILDIZ, Geological Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

Atilla EVCİN, Material Science and Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

Bojan Zlender, Civil Engineering, University of Maribor, (Slovenia)

*e-mail: bojan.zlender@um.si*

Cevat İNAL, Survey Engineering, Konya Teknik University, (Turkey)

*e-mail: cinal@ktun.edu.tr*

Fatih Onur HOCAOĞLU, Electrical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

*e-mail: fohocaoglu@gmail.com*

Hüseyin Ali YALIM, Physics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

Hüseyin BAYRAKÇEKEN, Automotive Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

İbrahim EROL, Chemistry, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

İsmail Sedat BÜYÜKSAGIŞ, Mining Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

İsmail ZORLUER, Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

Meltem DİLEK, Chemical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)

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

Muhittin BAŞER, Mathematics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mbaser@aku.edu.tr*

Mustafa YILDIZ, Molecular Biology and Genetics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: mustafa\_yildizus@yahoo.com*

Mustaque Hossain, Civil Engineering, Kansas State University, (USA)  
*e-mail: mustak@k-state.edu*

Ramazan ŞEVİK, Food Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ramazansevik03@yahoo.com*

Regita Bendikiene, Department of Production Technologies, Kaunas University of Technology,  
(Lithuania)  
*e-mail: regita.bendikiene@ktu.lt*

Sinan SARAÇLI, Statistics, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: ssaracli@aku.edu.tr*

Şükrü TALAŞ, Metallurgy and Materials Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: stalas@aku.edu.tr*

Uçman ERGÜN, Biomedical Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: uergun@aku.edu.tr*

Yüksel OĞUZ, Electrical Electronics Engineering, Afyon Kocatepe University, (Turkey)  
*e-mail: yukseloguz@aku.edu.tr*

**ADRES/ADDRESS:**

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Ahmet Necdet Sezer Kampusu, 03200, AFYONKARAHİSAR  
Telefon: 444 03 03 / 1460-1470  
Belgegeçer: 0 272 218 14 62  
e-posta: fmbd@aku.edu.tr

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### FEN BİLİMLERİ / SCIENCE

#### BİYOLOJİ / BIOLOGY (10)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Kazdağı Milli Parkı'nın (Edremit/Balıkesir) Çalı ve Ağaç Florası Shrub and Tree Flora of Kazdağı National Park (Edremit / Balıkesir) Derya DENİZ, Selami SELVİ	<b>051001 (1005-1015)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Udimo 75 WG Herbisitinin Ames Testi ile Salmonella typhimurium'da Potansiyel Mutajenitesi Potential Mutagenicity of Udimo 75 WG Herbicide in Salmonella typhimurium with Ames Test Dilek AKYIL	<b>051002 (1016-1021)</b>

#### FİZİK / PHYSICS (11)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Düşük Sıcaklık Alaşımlarının Radyasyon Zırhlama Özellikleri The Radiation Shielding Properties of the Low Temperature Alloys Canan AKSOY, Serdar DİZMAN, Bakiye ÇAKIR, Ezgi TAYLAN KOPARAN, Engin TIRAŞOĞLU	<b>051101 (1022-1026)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Co-M-Ni (M= Fe, Ag) Geçiş Metali Nanoalaşımlarının Yapısal, Enerjik ve Manyetik Özellikleri Structural, Energetic and Magnetic Properties of Co-M-Ni (M= Fe, Ag) Transition Metal Nanoalloys Hüseyin YILDIRIM	<b>051102 (1027-1037)</b>

#### KİMYA / CHEMISTRY (12)

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> C Vitamininin Karbonik Anhidraz İzoenzimleri (hCA I ve II) Üzerine Etkisi The Effect of Vitamin C on Carbonic Anhydrase Isoenzymes (hCA I and II) Yağmur HOŞGÖR, Ekrem TUNCA, Metin BÜLBÜL	<b>051201 (1038-1045)</b>
--	---------------------------

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Chaffee-Infante Denklemi için Soliton Çözümlerinin Oluşturulması Construction of Soliton Solutions for Chaffee-Infante Equation Şeyma TÜLÜCE DEMIRAY, Uğur BAYRAKCI	<b>051301 (1046-1051)</b>
---	---------------------------

## **MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ / ENGINEERING**

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Servikal Kanserlerin Teşhisinde Kullanılan Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms Used in the Diagnosis of Cervical Cancers Tolga ÖZLEN, Ali GÜNEŞ	<b>055101 (1052-1060)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Covid-19 Salgını Sırasında Evden Çalışma: Türk Yazılım Profesyonellerinin Deneyimleri Home-Based Working During Covid-19 Pandemic: Experience of Turkish Software Professionals Gül TOKDEMİR	<b>055102 (1061-1068)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Uydu İmgelerine Derin Öğrenme Tabanlı Süper Çözünürlük Yöntemlerinin Uygulanması Application of Deep Learning Based Super Resolution Methods To Satellite Images And Improvement Of Images Ayşe CENGİZ, Derya AVCI	<b>055103 (1069-1077)</b>

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Deneysel Sürtünme Modeli Kestirimiyle bir Ters Sarkacın PID Kontrolü PID Control of an Inverted Pendulum with Experimental Friction Model Estimation Ayhan GÜN, Abdurrahman KARAMANCIOĞLU	<b>055201 (1078-1085)</b>
---	---------------------------

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Amorf Çekirdekli Transformatörün Çoklu Fizik Yöntemiyle Elektromanyetik - Sıcaklık Analizi Electromagnetic-Temperature Analysis of Amorphous Core Transformer by Multiple Physics Method Atabak NAJAFI, İres İSKENDER	<b>055202 (1086-1096)</b>
---	---------------------------

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

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Sulak Alanların Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Değerlendirilerek Entegre Veritabanı Modeli Tasarımı Integrated Database Model Design by Evaluation of Wetlands Within the Scope of Water Framework Directive Mustafa YAMAN, Zehra YIĞIT AVDAN	<b>055401 (1097-1107)</b>
--	---------------------------

*HARİTA, MİMARLIK & ŞEHİR VE BÖLGE PLANLAMA / MAP, ARCHITECTURE & CITY AND REGIONAL PLANNING (55)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Kartogram Haritaların Nüfus Analizinde Kullanımı The Use Of Cartogram Maps in Population Analysis Muhammed Hüseyin KAYA, İbrahim YILMAZ	<b>055501 (1108-1124)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Google Earth Pro Verilerinden Oluşturulan Sayısal Yükseklik Modelleri ve Global Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Değerlendirmesi Accuracy Assessment of Global Digital Elevation Models and Generated Digital Elevation Models from Google Earth Pro Data Adalet DERVİŞOĞLU, Şaziye Özge ATİK, Ramazan Alper KUÇAK, Mahmut Oğuz SELBESOĞLU	<b>055502 (1125-1136)</b>

*İNŞAAT & ULAŞTIRMA / CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION (56)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Mermer Tozu ve Uçucu Külün Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi The Effect of Marble Powder and Fly Ash on Mechanical Properties of Cement Mortars Cüneyt DOĞAN, İsmail DEMİR	<b>055601 (1137-1145)</b>
---	---------------------------

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Pasif Ev Sertifika Sisteminin Mevcut Binalarda Uygulanması: EnerPHit Sertifika Sistemi</p> <p>Application Of The Passive House Certification System In Existing Buildings: EnerPHit Certification System</p> <p>Ahunur AŞIKOĞLU, Müjde ALTIN, Necla Seval BAYRAM</p>	<p><b>055602 (1146-1156)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Polimer Katkılı Bitümlü Sıcak Karışımların İzmir Hava Durumu Şartlarındaki Marshall Stabilitate Performansının İncelenmesi</p> <p>Investigation of Marshall Stability Performance of Polymer Modified Hot Mix Asphalt Under İzmir Weather Conditions</p> <p>Sajjad HASSANPOUR KASANAGH, Perviz AHMEDZADE, Taylan GÜNAY</p>	<p><b>055603 (1157-1166)</b></p>

*KİMYA & METALURJİ VE MALZEME / CHEMISTRY & METALLURGY AND MATERIALS (57)*

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Yüksek Sıcaklık ve Düşük Sıcaklık Su-Gaz Değişirme Reaktörleri Sistemi ile Hidrojen Üretimi Üzerine Nümerik Çalışma: Çoklu-Ölçekli Modelleme Yaklaşımı ve Simülasyonu</p> <p>A Numerical Study of Hydrogen Production via High-temperature and Low-temperature Water-Gas Shift Reactors' System: The Multi-Scale Modeling Approach and Simulation</p> <p>Seçgin KARAGÖZ</p>	<p><b>055701 (1167-1180)</b></p>
<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Tungsten Borür Takviyeli Bakır Matrisli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi</p> <p>Development of Tungsten-Boride Reinforced Copper Matrix Composite Materials</p> <p>Aytekin HİTİT, Muhammed Emir KARA, Emre AKDAĞ, Lokman ERDOĞAN, Yaşar Samet AZINÇ</p>	<p><b>055702 (1181-1186)</b></p>

*MADEN & JEOLJİ / MINES, & GEOLOGICAL (58)*

<p><b>Araştırma Makalesi / Research Article</b></p> <p>Dereli (Giresun, Türkiye) Bölgesi Yüzey Sularının Fizikokimyasal Özellikleri Üzerine Bir Araştırma</p> <p>A Study on Physicochemical Characteristics of Surface Waters in The Area of Dereli (Giresun, Turkey)</p> <p>Hülya KAÇMAZ</p>	<p><b>055801 (1187-1194)</b></p>
---	----------------------------------

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Jeomorfik İndis kullanarak Gülbahçe Fay Zonu' nun (GBFZ) Aktif Tektonik Değerlendirmesi, İzmir, Batı Anadolu, Türkiye Active Tectonics of Gülbahçe Fault Zone (GBFZ) by Using Geomorphic Indices, İzmir Province, Western Anatolia, Turkey Berna ŞENGÖÇMEN GEÇKİN, Hasan SÖZBİLİR, Çağlar ÖZKAYMAK, Mustafa SOFTA	<b>055802 (1195-1209)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan Depremi (Mw5.1) Kaynak Parametreleri ve Fay Çözümlerinin Araştırılması, Güneydoğu Anadolu Investigation of the Source Parameters and Fault Mechanism Solutions of the December 3rd, 2020 Mw5.1 Siirt-Kurtalan Earthquake, Southeast Anatolia Nihan HOŞKAN	<b>055803 (1210-1222)</b>

*MÜHENDİSLİK DİĞER / OTHER ENGINEERING (72)*

<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> İHA Yardımcı İniş Sisteminin Meta-Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri ile Kontrolü Control of UAV Auxiliary Landing System with Meta-Heuristic Optimization Methods Serkan ÇAŞKA, Ali UYSAL	<b>057201 (1223-1230)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Güney Okyanusunun Atmosfer ve Okyanus Sirkülasyonlarının Sayısal Modeller Yardımıyla İncelenmesi Analysis of the Atmospheric and Oceanic Circulations of the Southern Ocean with the Help of Numerical Models Yasemin EZBER, Bilge TUTAK, Mehmet ILICAK	<b>057202 (1231-1246)</b>
<b>Araştırma Makalesi / Research Article</b> Yara Örtü Materyallerinde Aktif Ajan Olarak Kullanılmak Üzere Jelatin Kaplı Gümüş Nanoparçacıkların Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu Synthesis and Characterization of Gelatin Coated Silver Nanoparticles for Use as Active Agent in Wound Dressing Materials Zehra GÜN GÖK	<b>057203 (1247-1258)</b>

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 051001 (1005-1015)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 051001 (1005-1015)

DOI: 10.35414/akufemubid.891097

## Araştırma Makalesi / Research Article

## Kazdağı Milli Parkı'nın (Edremit/Balıkesir) Çalı ve Ağaç Florası

Derya DENİZ<sup>1</sup>, Selami SELVİ<sup>2</sup><sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji A.B.D., Balıkesir, Türkiye<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi, Altınoluk Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Balıkesir, Türkiye

Sorumlu yazar e-posta: sselvi2000@yahoo.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9959-6945>

derydadenzhada@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7937-2311>

Geliş Tarihi: 04.03.2021

Kabul Tarihi: 07.10.2021

## Öz

Kazdağı Milli Parkı (Edremit/Balıkesir), Türkiye'de tanımlanan Önemli Bitki Alanlarından (ÖBA) birini oluşturmaktadır. Bu çalışmada Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde yayılış gösteren odunsu bitkilerin (çalı ve ağaç) florası araştırılmış ve ilk defa odunsu bitkilerin floristik envanteri ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda 26 familyaya ait 60 cins ve 91 taksonun Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde yayılış gösterdiği tespit edilmiştir. Bunlardan 10 taksonun kültür formunda olduğu görülmüştür. Milli Park ve çevresinde tespit edilen odunsu taksonların %53'ü (48 takson) ağaççık ve ağaçlardan; %47'si (43 takson) ise çalılardan oluşmaktadır. Araştırma alanında en fazla taksona sahip familyanın Rosaceae (20 takson) olduğu görülmüştür. Bu familyayı sırasıyla; Lamiaceae (11 takson), Fagaceae (9 takson) ve Fabaceae (7 takson) takip etmektedir. En fazla takson içeren cinsler ise *Quercus* L. (7 takson), *Rubus* L. (4 takson) ve 3'er taksonla *Cistus* L., *Juniperus* L. ve *Genista* L. olduğu belirlenmiştir. Taksonların fitocoğrafik elementlerine göre dağılımı incelendiğinde; %22'si Akdeniz (20 takson), %18'i Avrupa-Sibirya (16 takson), %10'u D. Akdeniz (9 takson), %1'i Karadeniz (1 takson) fitocoğrafik elementlerinde yer almaktadır. Taksonların %49 (45 takson)'unun ise fitocoğrafik elementi bilinmemektedir. Araştırma alanında teşhisi yapılan taksonlar, global ölçekte IUCN tehlike kategorilerine göre sınıflandırıldığında, %57'si (52 takson) 'LC' (Az endişe verici) kategorisinde, %5'i (4 takson) "DD" (Yetersiz veri) kategorisinde, %2'si (2 takson) 'VU' (zarar görebilir) kategorisinde, %2'side (2 takson) "EN" (Tehlikede) kategorisinde yer almakta; %34'ünün (31 takson) ise tehlike kategorisi bilinmemektedir.

## Anahtar kelimeler

Ağaç;  
Çalı;  
Flora;  
Kazdağı;  
Milli Park

## Shrub and Tree Flora of Kazdağı National Park (Edremit / Balıkesir)

## Abstract

Kazdağı National Park (Edremit / Balıkesir) constitutes one of the Important Plant Areas (IPA) defined in Turkey. In this study, the flora of woody plants (shrubs and trees) spreading around Kazdağı National Park and its surroundings was investigated and the floristic inventory of woody plants was presented for the first time. As a result of the study, it was determined that 60 genera and 91 taxa belonging to 26 families were distributed in and around Kazdağı National Park. It has been observed that 10 of these taxa are in the form of culture. 53% (48 taxa) of woody taxa determined in and around the National Park are from shrubs and trees; 47% (43 taxa) consists of bushes. It was seen that the family with the most taxa in the research area was Rosaceae (20 taxa). Lamiaceae (11 taxa), Fagaceae (9) and Fabaceae (7 taxa) follow this family, respectively. The genera including the most taxa are *Quercus* L. (7 taxa), *Rubus* L. (4 taxa) and *Cistus* L., *Juniperus* L., and *Genista* L. with 3 taxa. When the distribution of taxa according to phytogeographic elements is examined; Phytogeographical elements are located in 22% Mediterranean (20 taxa), 18% Europe-Siberia (16 taxa), 10% E. Mediterranean (9 taxa), 1% and Black Sea (1 taxon). The phytogeographic element of 49% (45 taxa) of taxa is unknown. When taxa diagnosed in the research area are classified according to IUCN threatment categories on a global scale, 57% (52 taxa) are in the 'LC' (Least Concern) category, 5% (4 taxa) are in the "DD" (Insufficient data) category, %2 (2 taxa) are in the 'VU' (Vulnerable) category, 2% (2 taxa) are in the "EN" (Endangered) category; The threatment category of 31 taxa is unknown.

## Keywords

Tree;  
Shrub;  
Flora;  
Ida Mount;  
National Park



## 1. Giriş

Balıkesir, Akdeniz ile Avrupa-Sibiryaya fitocoğrafik bölgelerinin geçiş sonunda bulunmasından dolayı, çeşitli vejetasyon tiplerine ve zengin bitki örtüsüne sahip illerden birisidir. Ayrıca biyolojik çeşitlilik açısından oldukça zengin olan Kazdağı, Madra Dağı ve Kapıdağı gibi önemli dağları da bünyesinde barındırmaktadır (Güner ve Selvi 2016). Kazdağı endemik ve nadir bitkiler açısından değerlendirildiğinde; ülkemizin en önemli bitki alanlarından birisi olduğu görülmektedir. Yaklaşık 800 taksonun yayılış gösterdiği Kazdağı'nda 32' si sadece bu dağa özgü olmak üzere, ülke çapında 80' in üzerinde nadir ve endemik bitki taksonu yer aldığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuş ve bu özelliklerinden dolayı bölge, Önemli Bitki Alanı (ÖBA) olarak belirlenmiştir. Bu özellikleriyle Kazdağı, yalnız Türkiye'nin değil, tüm Avrupa kıtasının en önemli bitki alanlarından birisini oluşturmaktadır (Özhatay vd. 2003; Dirmenci vd. 2007, Satıl 2009; Ahiskalı vd. 20102, Selvi vd. 2013, Paşa vd. 2019).

Kazdağı'nın bir bölümü; barındırdığı zengin biyoçeşitliliği, nadir ve endemik türleri, bol su kaynakları, kültürel ve arkeolojik değerleri nedeniyle 17.04.1993 tarih ve 21555 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan 93/4243 sayılı Bakanlar Kurulu Kararı ile Milli Park ilan edilmiştir (Arı ve Soykan 2006; Deniz 2020). Kazdağı Milli Parkı, Edremit Körfezinin sahip olduğu doğal, kültürel ve tarihi zenginlik kaynaklarından birisidir. Yoğun ve sağlıklı orman dokusu, coğrafik oluşumu ve iklimsel özelliklerinin çakışması, yöreye özgü bitki ve yaban hayatının çok çeşitli olmasının önünü açmıştır. Ayrıca çoğu çalı ve ağaç türleri de yöre insanları tarafından gıda başta olmak üzere, şifa, yakacak, süs ve hayvan yemi olarak değerlendirilmektedir (Anonim, 1995).

Çalı ve ağaçlar genel olarak odunsu bitkiler olarak adlandırılmakta olup dış görünüşleri büyük değişiklik göstermekte ve bitkileri sınıflandırmada kolaylık sağlamaktadır. Çalılar genellikle sürünücü bodur formlarda, dipten çok gövdeli bir tepe geliştirirlerken; ağaçlar dar ya da geniş tek tepeli, dik ya da sarkık dallı yapıları geliştirirler (Yaltırık 1997, Akkemik 2018).

Kazdağı florası ile ilgili çeşitli floristik çalışmalara rastlanmaktadır. Özel ve Gemici (2001) tarafından;

Kazdağı'nın flora ve vejetasyonu üzerine floristik bir araştırma yürütülmüştür. Çalışmalarında Kazdağı'nda 101 familyaya ait 900 taksonun yayılış gösterdiği tespit edilmiştir. Dağdeviren (2002); Kazdağı'nda doğal yetişen Gymnosperm taksonları üzerinde dendrokronolojik araştırmalar yürütmüştür. Araştırmada 9 Gymnosperm taksonunun Kazdağı'nda doğal olarak yetiştiğini belirlemiştir. Satıl ve ark. (2006); tarafından Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde etnobotanik bir araştırma yürütülmüştür. Bu çalışmada 243 bitki taksonunun etnobotanik kullanımı olduğu, bunların arasında çalı ve ağaç türlerinin de bulunduğu ortaya konulmuştur.

Dirmenci vd. (2007); Kazdağı Milli Parkı çiçekli bitkileri kitabında 36 familyaya ait 130 taksonu morfolojik olarak tanımlamışlardır. Bu kitapta çalimsı ve ağaçsı türlere de değinmişlerdir.

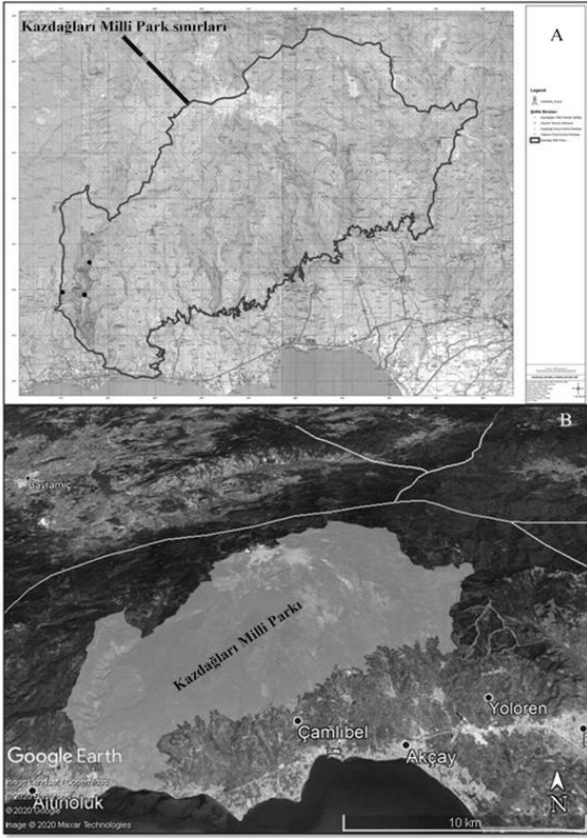
Kazdağı Milli Parkı, flora açısından incelendiğinde birçok türe ev sahipliği yapmakta ve bunların önemli bir kısmını da çalimsı ve ağaçsı türler oluşturmaktadır. Ancak şimdiye kadar Kazdağı Milli Parkı'nın çalı ve ağaçları ile ilgili kapsamlı bir envantere rastlanmamıştır. Bu çalışma ile ülkemizin en önemli dağlarından birisi olan Kazdağı Milli Parkının çalı ve ağaç florası tespit edilerek envanter oluşturulması; ayrıca ileride Kazdağı Milli Parkı ve yakın çevresinde yapılması planlanan floristik çalışmalar için önemli bir kaynak teşkil etmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmamızın materyalini, Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde yetişmekte olan çalı ve ağaç taksonları oluşturmaktadır.

### 2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanımız olan Kazdağı Milli Parkı; Çanakkale ve Balıkesir illeri arasında yer almaktadır. Alanın güneyinde Edremit Körfezi, doğusunda Zeytinli Çayı, kuzeyinde Karamenderes Çayı ve batısında da Mıhlı Çayı yer almaktadır. Karataş Tepe 1767 m ile Kazdağı'nın en yüksek noktasıdır. Diğer önemli yükseltiler ise 1765 m ile Babadağ Tepe, 1726 m ile Sarıkız Tepe, 1712 m ile Kırklar Tepe gelmektedir (7). Çalışma alanının genel görüntüsü Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanının; harita (A) ve uydu (B) görünümü

## 2.2. İklim Özellikleri

Çalışma alanı; iklim özellikleri bakımından Akdeniz iklim kuşağına yakın olmakla birlikte, Akdeniz-Karadeniz iklimleri arasında bir geçiş bölgesi oluşturmaktadır. Kazdağı'nın güney kısmının denizel iklimi, kuzeyinin ise karasal iklimi göstermesi tamamen coğrafik durumuna bağlı bir özelliktir. Kazdağı Milli Parkı'nın bulunduğu Edremit'te 11 yıllık sıcaklık ortalaması en yüksek Ağustos ayında 28.3 °C ve en düşük Ocak ayında 7.7 °C olup 11 yıllık sıcaklık ortalaması ise 17.7°C'dir. 11 yıllık ortalama yağış miktarı 64.2 mm'dir. Edremit'te aylık toplam yağışların yıl içindeki aylara dağılımı incelendiğinde Ocak ayından itibaren yağışın azaldığı, Eylül ayından itibaren yağışın arttığı gözlenmiştir. En fazla yağış Aralık ayında, en az yağış Temmuz ayında yine, en fazla yağışlı günler kış mevsiminde, en az yağış ise yaz mevsiminde görülmektedir. En kuvvetli rüzgâr yönü kuzey-kuzey doğu yönüdür. 11 yıllık ortalama rüzgâr hızı 14.25 m/sn'dir. Yıllık ortalama kuvvetli rüzgârlı günlerin toplamı yaklaşık 59 gündür. Nisbi nem değerleri kış aylarında artmakta, yaz aylarında düşmektedir. En yüksek ortalama nispi nem % 72.0 ile Ocak ayı, en düşük ortalama nispi nem ise % 46.1 ile Temmuz ayı olduğu hesaplanmıştır (Anonim 2019).

## 2.3. Çalı ve ağaçların sınıflandırılması

Çalı ve ağaçların sınıflandırılmasında farklı araştırmacılar tarafından çok çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Bu çalışmada tespit edilen çalı ve ağaçların sınıflandırılmasında; odunsu yapı ve sekonder gelişim göstermesi ortak karakterler; tabandan itibaren dallanma olup olmaması, tek ya da çok gövde içermesi ile bitki boyu ayırt edici en önemli karakterler olarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler Ellenberg ve Mueller-Dombois (1965)' ve Yaltırık (1997)' in çalı ve ağaç sınıflandırmalarına göre yapılarak çalışmada tespit edilen taksonlar çalı ve ağaç olarak adlandırılmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Çalı ve ağaçların sınıflandırılmasında uygulanan metot

Hayat Formu	Bitki boyu (m)	Gövde Durumu	Tabandan itibaren dallanma	Adlandırma
	0.45-1	Çok	Var	Kısa boylu
Çalı	1-2	Birkaç -çok	Var	Orta boylu
	2-5	Birkaç-çok	Var	Uzun boylu
	2-6	Tek ya birkaç	Yok	Ağaccık
Ağaç	6-20	Tek	Yok	Orta boylu ağaç
	20-50	Tek	Yok	Büyük boylu

## 2.4. Floristik çalışmalar

Florsitik çalışmalar 2018-2020 yılları arasında Kazdağı Milli Park sınırları dahilinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Çalışma süresince 115 farklı noktadan çalı ve ağaç formunda bulunan bitki örnekleri yılın farklı mevsimlerinde yapılan floristik geziler esnasında toplanmış ve teşhisleri yapılmıştır. Araziye tespit edilen çalı ve ağaçların fotoğrafları çekilmiş, teşhisi için gerekli notlar tutulmuş ve herbaryum örnekleri alınmıştır. Taksonların teşhisleri herbaryum örnekleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bitkilerin teşhisinde "Türkiye Florası başta olmak üzere çeşitli floristik kitaplardan faydalanılmıştır (Tutin vd. 1964-1990, Davis 1965-1985; Davis vd. 1988; Strid 1991, Güner vd.. 2001). Teşhisi yapılan taksonlar, Balıkesir Üniversitesi Altınoluk Meslek Yüksekokulu Botanik

Laboratuvarı'nda muhafaza edilmektedir. Çalışmada tespit edilen taksonların türkçe isimleri Güner vd. (2012)'a göre, güncel bilimsel isimleri "International Plant Name Index (IPNI, 2021)" ve "The Plant List (2021)' e göre verilmiştir. Ayrıca taksonların, IUCN tehlike kategorileri IUCN (2019) kriterlerine göre global düzeyde değerlendirilmiştir (Çizelge 2).

### **3. Bulgular**

Bu çalışmada Kazdağları Milli Parkı'nda yayılış gösteren odunsu bitkiler (çalı, ağaç) araştırılmıştır. Araştırma sonucunda Kazdağları Milli Park' ında 26 familyaya ait 60 cins ve 91 türün yayılış gösterdiği tespit edilmiştir. 91 taksondan 10' u ise kültür formunda yer aldığı görülmüştür (Çizelge 2; asteriks ile gösterilmiştir). Çizelge 2' de tespit edilen taksonların familyaları, bilimsel isimleri, Türkçe isimleri, koordinatları, IUCN tehlike kategorileri ve endemizm durumları alfabetik olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Kazdağı Milli Park'ında tespit edilen çalı ve ağaç taksonları

NO	FAMİLYA	TAKSON	TÜRKÇE İSİM	ELEMENT	IUCN	HAYAT FORMU	FORM TİPİ
1	Anacardiaceae	<i>Pistacia palaestina</i> Boiss.	Çöğre	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Ağaç	Kısa Boylu
2	Anacardiaceae	<i>Pistacia terebinthus</i> subsp. <i>terebinthus</i>	Menengiç	Akdeniz	LC	Ağaç	Kısa Boylu
3	Anacardiaceae	<i>Rhus coriaria</i> L.	Sumak	Bilinmiyor	VU	Çalı	Uzun boylu
4	Apocynaceae	<i>Nerium oleander</i> L.	Zakkum	Bilinmiyor	LC	Çalı	Uzun boylu
5	Asparagaceae	<i>Asparagus acutifolius</i> L.	Tilkişen	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
6	Asparagaceae	<i>Ruscus aculeatus</i> L.	Tavşan Memesi	Bilinmiyor	LC	Çalı	Kısa boylu
7	Asteraceae	<i>Inula viscosa</i> (L.) Aiton	Sümenit	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu
8	Betulaceae	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertner	Kızılağaç	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
9	Betulaceae	<i>Carpinus betulus</i> L.	Gürgen	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
10	Betulaceae	<i>Corylus avellana</i> L. var. <i>avellana</i>	Findık	Avrupa-Sibirya	LC	Çalı	Uzun boylu
11	Cistaceae	<i>Cistus creticus</i> L.	Laden	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
12	Cistaceae	<i>Cistus laurifolius</i> L.	Karağan	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu
13	Cistaceae	<i>Cistus salviifolius</i> L.	Kartli	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
14	Cupressaceae	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	Servi	D. Akdeniz	LC	Ağaç	Uzun boylu
15	Cupressaceae	<i>Juniperus communis</i> var. <i>saxatilis</i> Pall.	Bodur Ardıç	Bilinmiyor	LC	Çalı	Uzun boylu
16	Cupressaceae	<i>Juniperus excelsa</i> M. Bieb. subsp. <i>excelsa</i>	Bozardıç	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
17	Cupressaceae	<i>Juniperus oxycedrus</i> L. subsp. <i>oxycedrus</i> var. <i>oxycedrus</i>	Katranardıç	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Kısa Boylu
18	Ephedraceae	<i>Ephedra major</i> Host	Hum	Bilinmiyor	LC	Çalı	Orta boylu
19	Ericaceae	<i>Arbutus andrachne</i> L.	Sandal Ağacı	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Kısa Boylu
20	Ericaceae	<i>Arbutus unedo</i> L.	Kocayemiş	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Kısa Boylu
21	Ericaceae	<i>Vaccinium myrtillus</i> L.	Ayiüzümü	Avrupa-Sibirya	LC	Çalı	Kısa boylu
22	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia hierosolymitana</i> Boiss.	Çalı Sütleğeni	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu
23	Fabaceae	* <i>Cercis siliquastrum</i> L.	Erguvan	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
24	Fabaceae	<i>Colutea cilicica</i> Boiss. & Balansa	Patlangaç	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Uzun boylu
25	Fabaceae	<i>Cytisus hirsutus</i> L.	Keçi Tırfılı	Bilinmiyor	LC	Çalı	Kısa boylu
26	Fabaceae	<i>Genista anatolica</i> Boiss.	Kandaşdiken	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
27	Fabaceae	<i>Genista carinalis</i> Griseb.	Kırtıl Çalısı	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
28	Fabaceae	<i>Genista januensis</i> subsp. <i>lydia</i> (Boiss.) Kit Tan & Ziel.	Geyik Borcağı	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
29	Fabaceae	<i>Spartium junceum</i> L.	Katırtırnağı	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu

Kazdağı Milli Parkı'nın (Edremit/Balıkesir) Çalı ve Ağaç Florası, Deniz ve Selvi

30	Fagaceae	<i>Castanea sativa</i> Mill.	Kestane	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
31	Fagaceae	<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	Kayın	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
32	Fagaceae	<i>Quercus cerris</i> L.	Saçlı Meşe	Akdeniz	LC	Ağaç	Uzun boylu
33	Fagaceae	<i>Quercus coccifera</i> L.	Kermes Meşesi	Akdeniz	LC	Ağaç	Orta boylu
34	Fagaceae	<i>Quercus frainetto</i> Ten.	Macar Meşesi	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
35	Fagaceae	<i>Quercus infectoria</i> Oliv. subsp. <i>infectoria</i>	Mazı Meşesi	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Kısa Boylu
36	Fagaceae	<i>Quercus petraea</i> subsp. <i>iberica</i> (Steven ex M. Bieb.) Krassiln.	Ballık Meşesi	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Uzun boylu
37	Fagaceae	<i>Quercus pubescens</i> Willd.	Tüylü Meşe	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
38	Fagaceae	<i>Quercus robur</i> L.	Saplı Meşe	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
39	Juglandaceae	<i>Juglans regia</i> L.	Ceviz	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Uzun boylu
40	Lamiaceae	<i>Origanum onites</i> L.	Bilyalı Kekik	D. Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
41	Lamiaceae	* <i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Biberiye	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
42	Lamiaceae	<i>Salvia argentea</i> L.	Gümüüşşalba	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
43	Lamiaceae	<i>Salvia fruticosa</i> Mill.	Adaçayı	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
44	Lamiaceae	<i>Salvia tomentosa</i> Mill.	Şalba	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
45	Lamiaceae	<i>Satureja cuneifolia</i> Ten.	Kaya Kekiği	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
46	Lamiaceae	<i>Satureja pilosa</i> Velen.	Eybek Kekiği	Avrupa-Sibirya	Bilinmiyor	Çalı	Kısa Boylu
47	Lamiaceae	<i>Satureja thymbra</i> L.	Halil İbrahim Zahteri	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
48	Lamiaceae	<i>Teucrium flavum</i> L. subsp. <i>hellenicum</i> Rech.f.	Sarıyavşan	D. Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
49	Lamiaceae	<i>Thymbra spicata</i> L.	Zahter	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
50	Lamiaceae	<i>Vitex agnus-castus</i> L.	Hayıt	Akdeniz	DD	Çalı	Orta boylu
51	Lauraceae	<i>Laurus nobilis</i> L.	Defne	Akdeniz	LC	Ağaç	Orta boylu
52	Moraceae	* <i>Ficus carica</i> L.	İncir	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
53	Moraceae	* <i>Morus alba</i> L.	Ak Dut	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
54	Moraceae	* <i>Morus nigra</i> L.	Kara Dut	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Orta boylu
55	Oleaceae	<i>Jasminum fruticans</i> L.	Boruk	Akdeniz	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu
56	Oleaceae	* <i>Olea europaea</i> L.	Zeytin	Akdeniz	DD	Ağaç	Orta boylu
57	Oleaceae	<i>Phillyrea latifolia</i> L.	Akçakesme	Akdeniz	LC	Ağaç	Kısa Boylu
58	Pinaceae	<i>Abies nordmanniana</i> (Steven) Spach subsp. <i>equi-trojani</i> (Asc. & Sint. ex Boiss.) Coode & Cullen	Kazdağı Gökarnarı	Karadeniz	EN	Ağaç	Uzun boylu
59	Pinaceae	<i>Cedrus libani</i> A. Rich	Katran Ağacı	Akdeniz	VU	Ağaç	Uzun boylu
60	Pinaceae	<i>Pinus brutia</i> Ten.	Kızılçam	D. Akdeniz	LC	Ağaç	Uzun boylu
61	Pinaceae	<i>Pinus nigra</i> J. F. Arnold	Kara Çam	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Uzun boylu

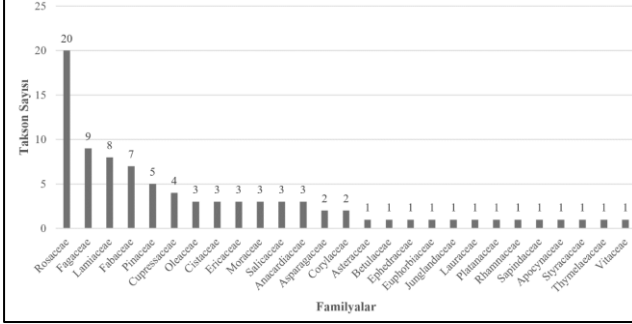
Kazdağı Milli Parkı'nın (Edremit/Balıkesir) Çalı ve Ağaç Florası, Deniz ve Selvi

62	Pinaceae	* <i>Pinus pinea</i> L.	Fıstık Çamı	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Uzun boylu
63	Platanaceae	<i>Platanus orientalis</i> L.	Çınar	Bilinmiyor	DD	Ağaç	Uzun boylu
64	Rhamnaceae	<i>Paliurus spina-christi</i> P. Mill.	Kara Çalı	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Uzun boylu
65	Rosaceae	<i>Amygdalus communis</i> L.	Badem	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Orta boylu
66	Rosaceae	* <i>Armeniaca vulgaris</i> Lam.	Kayısı	Bilinmiyor	EN	Ağaç	Orta boylu
67	Rosaceae	<i>Cerasus avium</i> (L.) Moench	Kiraz	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
68	Rosaceae	<i>Cerasus prostrata</i> (Labill.) Ser. var. <i>prostrata</i> (Labill.) Ser.	Yabani Kiraz	Akdeniz	LC	Çalı	Kısa boylu
69	Rosaceae	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq. var. <i>monogyna</i>	Yemişen	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Kısa Boylu
70	Rosaceae	<i>Crataegus orientalis</i> Pall. Ex M. Bieb.	Alıç	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Kısa Boylu
71	Rosaceae	<i>Cydonia oblonga</i> Mill.	Ayva	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Kısa Boylu
72	Rosaceae	* <i>Malus sylvestris</i> (L.) Mill. subsp. <i>orientalis</i>	Yaban Elması	Bilinmiyor	DD	Ağaç	Orta boylu
73	Rosaceae	<i>Prunus divaricata</i> Ledeb.	Yunus Eriği	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
74	Rosaceae	<i>Prunus spinosa</i> L.	Çakal Eriği	Avrupa-Sibirya	LC	Çalı	Uzun boylu
75	Rosaceae	<i>Pyrus communis</i> L.	Armut	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
76	Rosaceae	<i>Pyrus elaeagnifolia</i> Pall.	Ahlat	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Orta boylu
77	Rosaceae	<i>Rosa canina</i> L.	Kuşburnu	Bilinmiyor	LC	Çalı	Orta boylu
78	Rosaceae	<i>Rosa pulverulenta</i> M.Bieb.	Bodur Gül	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
79	Rosaceae	<i>Rubus canescens</i> DC.	Çobankösteği	Avrupa-Sibirya	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
80	Rosaceae	<i>Rubus hirtus</i> Waldst. & Kit.	Tüntürük	Avrupa-Sibirya	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
81	Rosaceae	<i>Rubus idaeus</i> L.	Ahududu	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
82	Rosaceae	<i>Rubus sanctus</i> Schreb.	Böğürtlen	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Orta boylu
83	Rosaceae	<i>Sorbus torminalis</i> (L.) Crantz	Pitlicen	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
84	Rosaceae	<i>Sorbus umbellata</i> Fritsch	Geyik Elması	Bilinmiyor	LC	Ağaç	Orta boylu
85	Salicaceae	<i>Populus alba</i> L.	Ak Kavak	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
86	Salicaceae	<i>Populus tremula</i> L.	Titrek Kavak	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
87	Salicaceae	<i>Salix alba</i> L. subsp. <i>alba</i>	Aksöğüt	Avrupa-Sibirya	LC	Ağaç	Uzun boylu
88	Sapindaceae	<i>Acer hyrcanum</i> Fisch. & C.A.Mey. subsp. <i>keckianum</i> (Aschers.&Sint.exPax) Yalt.	Kazdağı Akçaağacı	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Ağaç	Uzun boylu
89	Styracaceae	<i>Styrax officinalis</i> L.	Ayı Fındığı	Bilinmiyor	LC	Çalı	Uzun boylu
90	Thymelaeaceae	<i>Daphne oleoides</i> Schreb.	Gövçek	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Çalı	Kısa boylu
91	Vitaceae	* <i>Vitis vinifera</i> L.	Asma	Bilinmiyor	LC	Çalı	Uzun boylu

\*Kültür formu

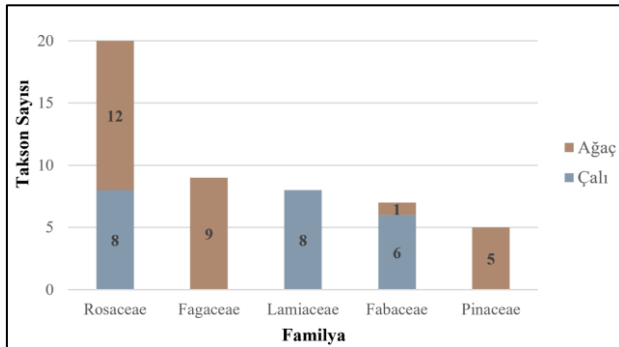
#### 4. Tartışma ve Sonuç

Araştırma alanında en fazla taksona sahip familyalar; Rosaceae (20 takson), Fagaceae (9 takson), Lamiaceae (8 takson), Fabaceae (7 takson) ve Pinaceae (5 takson) olarak belirlenmiştir (Şekil 2).



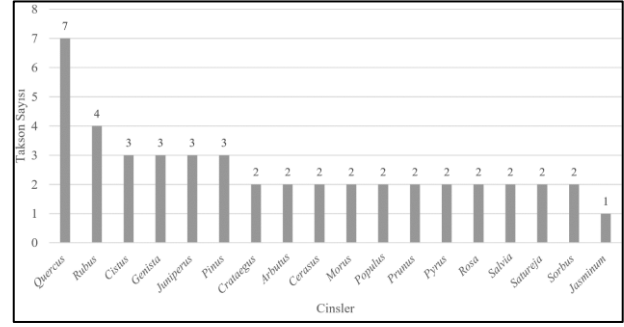
Şekil 2. En fazla tür içeren familyalar

En fazla takson içeren familyalar hayat formlarına göre sınıflandırıldığında; Fagaceae ve Pinaceae familyalarındaki taksonların sadece ağaç formunda, Lamiaceae familyasındaki taksonların ise çalı formunda olduğu tespit edilmiştir. Rosaceae ve Fabaceae familyası üyelerinde ise hem ağaç hem de çalı formunda taksonlar yer almaktadır. Rosaceae familyası en fazla ağaç içeren takson sayısına (12 takson) sahipken onu 8 taksonla Fagaceae familyası takip etmektedir. En fazla çalı taksonu içeren familyalar ise 8 taksonla Rosaceae ve Lamiaceae familyalarıdır. Bu familyaları 5 taksonla Fabaceae familyası takip etmektedir (Şekil 3).



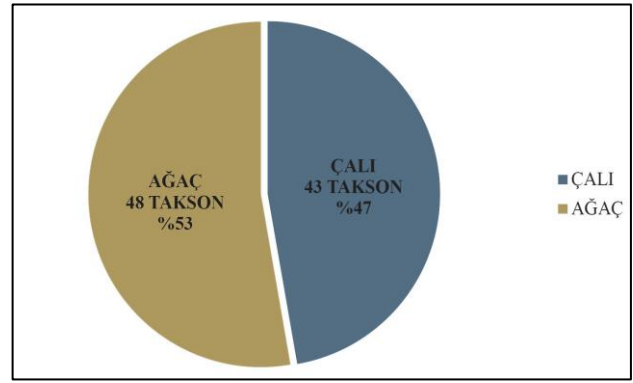
Şekil 3. En fazla tür içeren familyaların hayat formlarına göre dağılım grafiği

Araştırma alanında en fazla taksona sahip olan cinsler; *Quercus* (7 takson), *Rubus* (4 takson), *Cistus* (3 takson), *Juniperus* (3 takson), *Genista* (3 takson) ve *Pinus* (3 takson) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4).



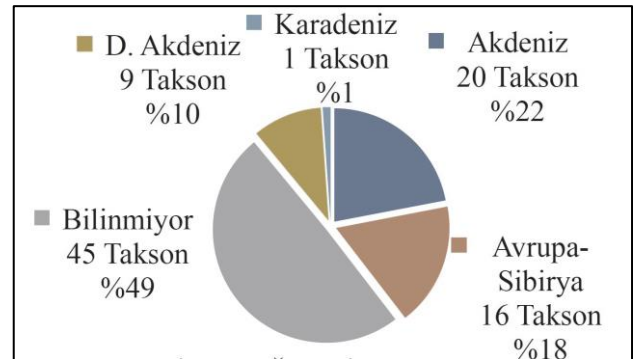
Şekil 4. En fazla tür içeren cinsler

Alanda tespit edilen taksonlar, hayat formlarına göre sınıflandırıldığında; %53'ünün (48 takson) ağaç ve %47'sinin (43 takson) çalı olduğu belirlenmiştir (Şekil 5).



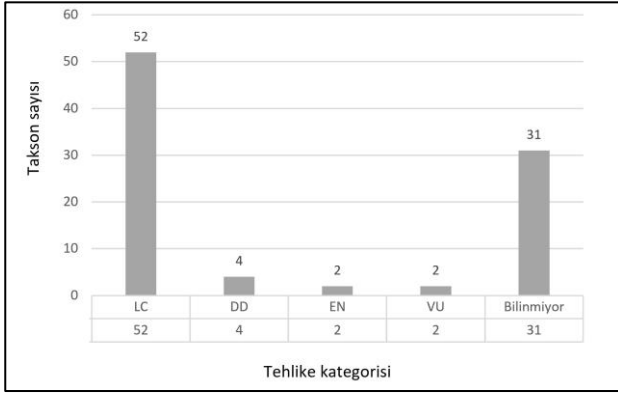
Şekil 5. Taksonların hayat formlarına göre dağılım grafiği

Taksonların fitocoğrafik elementlerine göre dağılımı incelendiğinde; %22'si Akdeniz (20 takson), %18' i Avrupa-Sibirya (16 takson), %10' u D. Akdeniz (9 takson), %1' i Karadeniz (1 takson) fitocoğrafik elementlerinde yer almakta olup %49'(45 takson)' unun ise fitocoğrafik elementi bilinmemektedir. Fitocoğrafik elementi bilinmeyen taksonların çoğunluğunu kozmopolit taksonlar oluşturmaktadır (Şekil 6).



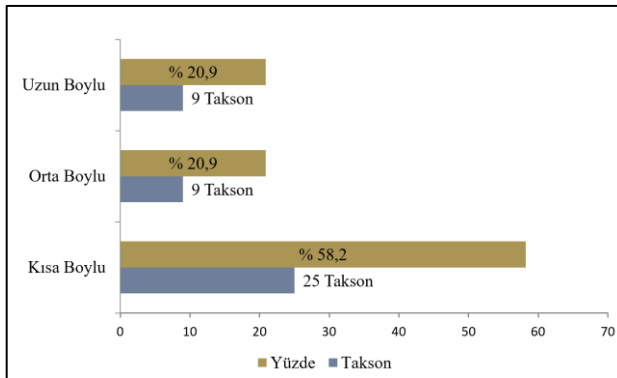
Şekil 6. Taksonların fitocoğrafik elementlerine göre dağılım grafiği

Taksonlar, global ölçekte IUCN tehlike kategorilerine göre sınıflandırıldığında, %57'si (52 takson) 'LC'(Az endişe verici), %5'i (4 takson) "DD"(Yetersiz veri), %2'si (2 takson) 'VU'(Zarar görebilir) ve %2'si de (2 takson) "EN"(Tehlikede) kategorisinde yer almaktadır. Taksonların %34 (31 takson)'unun ise tehlike kategorisi bilinmemektedir (Şekil 7). Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabına göre taksonlar değerlendirildiğinde sadece 1 taksonun tehlike kategorisinin olduğu görülmüştür. *Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani* (Kazdağ Gökürü) taksonu EN (Tehlikede) kategorisinde değerlendirilmiştir (Adıgüzel vd., 2000).



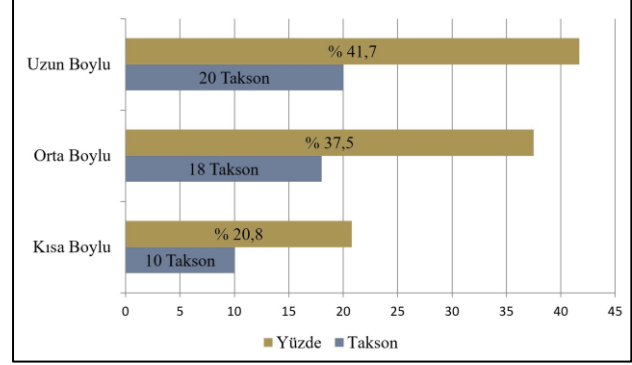
Şekil 7. Taksonların global ölçekte IUCN tehlike kategorilerine göre dağılım grafiği

Çalışmada çalı ve ağaç formları; Ellenberg ve Mueller-Dombois (1965) ve Yaltırık (1997)' göre değerlendirilmiş ve bitki boyu, gövde çapı ve tabandan itibaren dallanma gibi temel karakterlere göre tiplere bölünmüştür (Çizelge 1). Çalı formunda; kısa, orta ve uzun boylu olmak üzere 3 farklı çalı tipi olduğu görülmüştür. Kısa boylu tip %58.2 (25 takson) en fazla takson içeren tiptir. Bunu %20.9 ile (9 takson) orta boylu ve %20.9 ile (9 takson) uzun boylu çalı tipleri takip etmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalı taksonlarının form tiplerine göre dağılım grafiği

Ağaç formunda ise ağaççık (kısa boylu), orta boylu ve uzun boylu tiplere rastlanmıştır. En fazla % 41.7 (20 takson) ile uzun boylu tipler gözlenmekte, bunu %37.5 (18 takson) ile orta boylu ve %20.8 (10 takson) ile kısa boylu tipler takip etmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Ağaç taksonlarının form tiplerine göre dağılım grafiği

Satıl ve ark. (2006); tarafından Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde yürütülen etnobotanik bir araştırmada 243 bitki taksonunun etnobotanik kullanımı ortaya konulmuştur. Bu çalışmada 26' sını çalısı ve 16'sını ağaç olmak üzere 42 taksonun tümüne çalışma alanımız sınırları içerisinde rastlanmıştır. Dağdeviren (2002); Kazdağı'nda doğal yetişen Gymnospermae taksonları üzerinde dendrokronolojik araştırmalar yürütmüştür. Çalışma sonucunda 9 Gymnospermae taksonunun doğal olarak yetiştiği tespit edilmiştir (*Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojana*, *Juniperus excelsa* Bieb., *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus*, *Pinus brutia*, *Pinus nigra* subsp. *pallasiana*, *Taxus baccata* L. ve *Juniperus excelsa*, *Juniperus communis* ve *Ephedra major*) . Çalışmamızda *Taxus baccata* hariç diğer tüm taksonlara Kazdağı Milli Parklar sınırlarında rastlanmıştır. Dirmenci vd., (2007); Kazdağı Milli Parkı çiçekli bitkileri kitabında 36 familyaya ait 130 taksonu morfolojik olarak tanımlamışlardır. Bu taksonlardan 26' sını çalı ve ağaç formunda yer alıp; tüm bu taksonlara çalışma alanımız içerisinde rastlanmıştır.

Kazdağı Milli Park'ında ilk defa odunsu bitkilerin envanteri bu çalışma ile ortaya konulmuştur. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar vurgulanacak olursa;



1. Çalışma ile Kazdağı Milli Parkı ve yakın çevresinde; 10' u kültür formunda olmak üzere 27 familya 60 cinse ait 91 çalı ve ağaç taksonu belirlenmiştir.

2. Alanda endemik takson olarak sadece *Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani* (Kazdağı Göknaarı)' nin yayılış gösterdiği görülmüştür.

3) Taksonların 48' inin ağaç, 43' ünün ise çalı formunda olduğu tespit edilmiştir.

4) Çalılar, formlarına göre sınıflandırıldığında 25 taksonun kısa boylu, 9 taksonun orta boylu ve 9 taksonun ise uzun boylu olduğu; ağaçlarda ise 10 taksonun kısa boylu, 18 taksonun orta boylu ve 20 taksonun uzun boylu olduğu ortaya konulmuştur.

5) Taksonlar global ölçekte IUCN tehlike kategorilerine göre sınıflandırıldığında; 52 taksonun LC, 4 taksonun DD, 2 taksonun VU ve 2 taksonun EN kategorisinde yer aldığı görülmüştür. Taksonlardan 31 tanesinin tehlike kategorisi olmadığı görülmüştür.

6) Taksonların fitocoğrafik elementlerine göre dağılımı incelendiğinde; 20 taksonun Akdeniz, 16 taksonun Avrupa-Sibirya, 9 taksonun D. Akdeniz ve 1 taksonun Karadeniz elementi olduğu tespit edilmiştir. Ancak taksonlardan 45 tanesinin fitocoğrafik elementi bilinmemektedir.

7) Milli Park sınırlarında en çok takson içeren familyalar; Rosaceae, Lamiaceae, Fagaceae, Fabaceae ve Pinaceae iken, en çok takson içeren cinsler; *Quercus*, *Rubus*, *Cistus*, *Genista*, *Juniperus*, *Pinus* ve *Satureja* olduğu görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışmayı 2019/56 nolu araştırma proje ile destekleyen Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne; ayrıca T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğüne ve Güre Doğa Koruma Milli Parklar Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

#### 5. Kaynaklar

Adıgüzel, N., Aytaç, Z., Duman, H., Ekim, T., Koyuncu, M. and Vural, M., 2000. Türkiye Bitkileri Kırmızı Kitabı. Türkiye Tabiatını Koruma Derneği ve Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Yayını, 100-250.

Ahiskalı, M., Arı, Ç.S. and Selvi, S. 2012. Edible wild plants and their consumption during winter in a rural village on Mount İda (Kazdağı). *Boccone*, **24**, 195-198.

Akkemik, Ü., 2018. Türkiye'nin doğal-egzotik ağaç ve çalları. T.C. Orman Ve Su İşleri Bakanlığı Orman Genel Vakıflar Genel Müdürlüğü Kültür Yayınları, 50-246.

Anonim, 1995. Kazdağı Milli Parkı Master Plan Raporu. T.C Orman Bakanlığı Milli Parklar ve Av-Yaban Hayatı Genel Müdürlüğü Milli Parklar Dairesi Başkanlığı Yayınları, 10-45.

Anonim, 2019. İstasyon bilgileri veri tabanı. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). 2. Bölge Müdürlüğü Balıkesir Edremit Meteoroloji İstasyonu Müdürlüğü, Balıkesir.

Arı, Y. and Soykan, A., 2006. Kazdağı Milli Parkı'nda kültürel ekoloji ve doğa koruma. *Türk Coğrafya Dergisi*, **44**, 11-32.

Dağdeviren, N., 2002. Kazdağları'nda doğal yetişen Gymnospermae taksonları üzerinde dendrokronolojik araştırmalar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 82.

Davis, P., 1965-1985. Flora of Turkey and East Aegean Islands, Vol. 1-9, Edinburgh University Press, Edinburgh.

Davis, P., Mill, R.R. and Tan, K., 1988. Flora of Turkey and East Aegean Islands (Supplements I), Vol. 10, Edinburgh University Press, Edinburgh.

Deniz, D., 2020. Kazdağı Milli Parkı'nın (Edremit/Balıkesir) çalı ve ağaç taksonları üzerine araştırmalar. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 267.

Dirmenci, T., Satıl, F. and Tümen G., 2007. Kazdağı Milli Parkı çiçekli bitkileri. Zeytinli Belediyesi Yayınları, 182-185.

Ellenberg, H. and Mueller-Dombois, 1965. A key to Raunkiaer plant life forms with revised subdivisions. Ber. Geobot. Inst. Rubel, 1-73.

Güner, A., Özhatay, N., Ekim, T., and Başer, K.H.C., 2001. Flora of Turkey and East Aegean Islands (Supplements II), Vol. 11, Edinburgh University Press, Edinburgh.

Güner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., ve Babaç, M.T. (edlr.), 2012. Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler).

Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayınları, İstanbul.

Güner, Ö. and Selvi S., 2016. Wild medicinal plants sold in Balıkesir/Turkey herbal markets and their using properties. *Biological Diversity and Conservation*, **9**(2), 96-101.

Özhatay, N., Byfield, A., and Atay, S., 2003. Türkiye'nin önemli bitki alanları. Doğal Hayatı Koruma Vakfı (WWF Türkiye) yayını, 1-200.

Paşa, C., Selvi, S., Özer, Z. and Kılıç, T., 2019. An investigation on the determination of diurnal and ontogenetic variations of essential oil composition in *Sideritis trojana* growing in Kazdağı (Edremit-Balıkesir). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, **22**(6), 972-975.

Satıl, F., Tümen, G., Dirmenci, T., Çelik, A. Arı, Y. and Malyer, H. 2006. Kazdağı Milli Parkı ve çevresinde (Balıkesir) etnobotanik envanter çalışması. *TUBA Kültür Envanteri Dergisi*, **5**, 171-203.

Satıl, F., 2009. Threatening Factors on plant diversity of Kazdağı (İda Mountain) national park in Turkey and suggestions for conservation. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, **23**(2), 208-211.

Selvi, S., Dağdelen, A. and Kara, S., 2013. Kazdağlarından (Balıkesir-Edremit) toplanan ve çay olarak tüketilen tıbbi ve aromatik bitkiler. *Journal of Tekirdag Agricultural Faculty*, **10**(2), 26-33.

Strid, A. ve Tan, K. (eds.) 1991. Mountain flora of Greece. Vol. 2., Edinburgh University Press. Edinburgh, UK.

Tutin, T.G., Heywood, V.H., Burges, N.A., Valentine, D.H., Walters, S.M. and Webb, D.A., 1964-1980. Flora Europae, Vol: 1-5, Cambridge at Univ. Press, Cambridge.

Yaltırık, F. 1997. Orman ve Park Ağaçlarımız: Süs Çalıları ve Sarılıcılar, Atlas Yayınevi, 1-150.

#### **İnternet kaynakları**

1- <https://bizimbitkiler.org.tr>. (10.07.2020).

2- <http://www.theplantlist.org>. (12.07.2020)

3- <http://www.iucnredlist.org>. (14.07.2020).

4- <https://www.ipni.org>. (18.07.2020).

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 051002 (1016-1021)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 051002 (1016-1021)

DOI: 10.35414/akufemubid.891586

Araştırma Makalesi / Research Article

## Potential Mutagenicity of Udimo 75 WG Herbicide in *Salmonella typhimurium* with Ames Test

Dilek AKYIL<sup>1</sup><sup>1</sup>Afyon Kocatepe University, Faculty of Science and Literature, Department of Molecular Biology and Genetics, Afyonkarahisar, Turkeye-posta: dilekakyil9@gmail.com. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7048-3808>

Geliş Tarihi: 05.03.2021

Kabul Tarihi: 04.10.2021

### Abstract

In addition to the benefits of pesticides frequently used in the agricultural sector, there are also many negative effects on the environment and living organisms. We aimed this study was to investigate mutagenic activity of Udimo 75 WG herbicide that commonly used in the agricultural sector by Ames/*Salmonella* microsome short-time test system. Experiments were applied in the absence (-S9) and presence (+S9) of enzymes in the metabolic activation by using TA98 and TA100 strains of *Salmonella typhimurium*. At first, the cytotoxic doses of the test substances were detected and then, 5 non-cytotoxic dose for each test substances were selected. For the mutagenicity of Udimo 75 WG 500, 250, 125, 62.5 and 31.25 µg/plate doses were studied. The obtained data were statistically analysed by Dunnett's t-test and the results were evaluated by compare with spontaneous control plates. According to the results of this study, Udimo 75 WG herbicide showed mutagenic activity both in the absence and presence of S9 fraction at the dose of 500 µg/plate concentration in both strains. Therefore, this herbicide may be in the genotoxic risk group for humans and other living things.

### Keywords

Ames test;  
Mutagenicity;  
Sulfonylurea  
herbicides; Udimo 75  
WG

## Udimo 75 WG Herbisitinin Ames Testi ile *Salmonella typhimurium*'da Potansiyel Mutajenitesi

### Öz

Tarım sektöründe sıklıkla kullanılan pestisitlerin faydalarının yanı sıra çevreye ve yaşayan canlılara olumsuz birçok etkisi de vardır. Bu çalışmada, tarım sektöründe yaygın olarak kullanılan bir herbisit olan Udimo 75 WG'nin Ames/*Salmonella* mikrozom kısa süreli test sistemi ile mutajenik aktivitesinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneyle *Salmonella typhimurium* TA98 ve TA100 suşları kullanılarak metabolik aktivasyon yokluğunda (-S9) ve varlığında (+S9) gerçekleştirilmiştir. İlk olarak test maddelerinin sitotoksik dozları tespit edilmiş ve ardından her test maddesi için 5 sitotoksik olmayan doz seçilmiştir. Çalışmada Udimo 75 WG 500, 250, 125, 62.5 ve 31.25 µg/plak dozları çalışılmıştır. Elde edilen veriler, Dunnett t-testi ile istatistiksel olarak analiz edilmiş ve sonuçlar, spontan kontrol plakları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, Udimo 75 WG herbisiti, her iki suşta da 500 µg/plak konsantrasyonunda S9 fraksiyonunun hem yokluğunda hem de varlığında mutajenik aktivite göstermiştir. Dolayısıyla bu herbisit, insanlar için genotoksik bir risk oluşturabilir.

### Anahtar kelimeler

Ames testi;  
Mutajenite; Sülfonilüre  
herbisitleri; Udimo 75  
WG

## 1. Introduction

Identification of chemical substances that cause mutation has become an important parameter in the risk assessment of that substance in recent years, and such chemicals cause fertility problems and cause problems in future generations. These substances also have the potential to cause cancer, and mutagenicity tests have also gained importance at this stage (Moulas *et al.* 2013). Earlier studies have showed that some pesticides are clastogenic and mutagenic in different biological test systems (Siroki *et al.* 2001, Celik 2003, Stivaktakis *et al.* 2010, Moulas *et al.* 2013, Akyl and Konuk 2014, Özkara 2017). The Ames test is an important test method for determining the mutagenic and anti-mutagenic effects of various chemical substances and also has an effect of over 90% in detecting genotoxicity (Kauffmann *et al.* 2020). In this test system, different *Salmonella typhimurium* strains with mutations in his operon are used to define the mutagenic activity of substances (Maron and Ames 1983).

Sulfonylurea herbicides are very strong, highly selective chemicals that are widely used in agriculture and can act at low application rates (Mora *et al.* 2019) and it is estimated that there will be even more sales in the market in further. These herbicides have weak toxicity for animals and humans, and are effective on a broad range of weeds (Myhre *et al.* 2004). Sulfonylurea herbicides inhibit the activity of acetolactate synthase (ALS) enzyme, and the biosynthesis of isoleucine, leucine and valine causing the death of the plant (Jin *et al.* 2012, Delye *et al.* 2018). It has been shown that sulfonylurea herbicides could bind to active site of the ALS and blocked the substrate binding (Zhang 2021).

Udimo 75 WG is a systemic sulfonylurea herbicides that controls various plants from pests. The increasing use of herbicides around the world is very important to demonstrate the potential risk effects on non-target living things through Ames test. We aimed of this study is to determine the mutagenic

activity of Udimo 75 WG herbicide with the Ames test, depending on its widespread use.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Chemicals and test strains

The test substance Udimo 75 WG was purchased from a local market in Afyonkarahisar/Turkey and dissolved in sterile distilled water. S9 from the liver of rats (Sprague Dawley) were obtained from Sigma Aldrich. The *S. typhimurium* test strains TA98 and TA100 were kindly supplied by Prof Nuran Diril, of Hacettepe University, Turkey. These strains were incubated for 16h in liquid nutrient broth and kept at -80°C. Their genetic markers and other properties including the numbers of spontaneously induced revertants and responses to positive controls, were controlled as designed by Maron and Ames (Maron and Ames 1983).

### 2.2. Determination of cytotoxic doses

For the test of cytotoxic doses, 0.1 ml test suspension added for each concentration and 0.1 ml bacterial suspension of TA100 from overnight culture to 2 ml top agar which maintained in water bath at 45°C. After shaking for 3 s, the mixture was added to the nutrient agar. All plates were maintained in incubator at 37°C for 24 h, and then the revertant colonies were counted for each plate and toxic and non-toxic doses were determined. Samples were evaluated on triplicate plates in two independent parallel experiments and all results of the experiment were analyzed by the statistical analysis.

### 2.3. Ames Salmonella/Microsome Assay

In order to determine the mutagenic activity of Udimo 75 WG, the plate incorporation test was applied using the TA98 and TA100 strains of *S. typhimurium* in the absence and presence of S9 fraction (Maron and Ames 1983). Genetic controls of test strains described according to Maron and Ames (1983). The test concentrations of the Udimo 75 WG (500, 250, 125, 62.5, 31.25 µg/plate) were determined according to Dean *et al.* (1985). Five different concentrations of Udimo 75 WG to be used during the experiment were freshly prepared with sterile distilled water, and stock solutions were kept

at 4 °C. The strains were maintained at 37 °C in nutrient broth for 16 h with orbital shaking. Positive controls were also used in parallel with the application.

The test petri dishes for the assays without the S9 fraction were carried out with different concentrations of 100 µL of test material, 100 µL of overnight bacterial culture and 500 µL of phosphate buffer into 2 mL top agar in a hot water bath at 45 °C.

This prepared mixture was shaken with vortex for 3 seconds and dumped into minimal glucose agar. The petri dishes with the S9 fraction were carried out with 500 µL of S9 mix instead of the phosphate buffer. All petri dishes with minimal glucose agar were maintained at 37 °C for 72 hours and revertant colonies were recorded at the end of the incubation. The assay was applied with three replicate for each dose and two individual applications were designed and the results were evaluated statistically.

#### 2.4. Statistical analysis

The significant differences among the treatment groups were determined by using the SPSS ver. 15.0. In the analyses, the Dunnett-t test (2 sided) was performed on Ames tests.

### 3. Results

Ames tes method contains plating His– *Salmonella typhimurium* onto media including trace amounts of histidine and adding different concentrations of substances to be tested for mutagenicity, resulting colonies that if the compound is capable of reversing the mutation in *S. typhimurium*. His-mutation is consequently converted to His+ (Ames *et al.* 1973, Flückiger-Isler *et al.* 2004).

Results of the Ames test are presented in Table 1. At the end of the experiment, all concentrations showed a mutagenic effect with both strains. In addition to the mutagenic response, the increase in revertant colony number was dose-dependent in both TA98 and TA100 strains. Besides, amount of spontaneous revertant colonies of the negative control was observed to be less than that of all the applied doses of the test material. Additionally, positive control plates caused a significant increase in the rate of spontaneous mutation in two strains. The test concentrations below 500 µg/plate showed no significant increases in the amount of spontaneous revertant colonies with compared to the negative control. Udimo 75 WG herbicide has mutagenic activity both in the absence and presence of S9 fraction of 500 µg/plate dose in both strains.

**Table 1.** The mutagenic activity of Udimo 75 WG for *S. tyhimurium* TA98 and TA100 strains

Substance	Dose (µg/plate)	Revertant Colony			
		Mean ± Standard Deviation			
		TA98		TA100	
		- S9	+ S9	- S9	+ S9
Udimo	500	102.13±7.6*	132.51±3.37*	209.24±6.16*	326.27±12.49*
	250	76.25±5.4	108.21±6.21	172.42±5.24	300.16±9.28
	125	59.47±3.21	94.27±3.31	159.30±4.25	279.21±10.45
	62.5	52.29±2.72	80.09±4.41	121.31±2.47	241.54±6.41
	31.25	44.25±4.58	52.27±3.30	101.12±3.35	210.48±7.12
NC (dH <sub>2</sub> O)	100	41.12±4.14	57.24±6.23	90.17±5.21	152.21±7.13
SA	10			2641.15±31.18*	
2AA	5				2824.13±37.18*
2AF	200		1165.13±21.08*		
NPD	200	1320.25±32.85*			

\*Mean statistically significant at p<0.05 (Dunnett t-test), NC: Negative control, SA: Sodium azide, 2AA: 2-aminoanthracene, 2AF: 2-aminofluorene, NPD: 4-nitro-o-phenyldiamine.

#### 4. Discussion

In the Ames test, bacterial mutants (mutated to the histidine gene that produces amino acids necessary for bacteria to survive) have been developed to be used to determine the mutagenic effects of chemical substances. For this, a number of strains of *S. typhimurium* bacteria are used (such as TA98, TA100, TA1535 and TA1537). Without the synthesis of histidine in bacteria, no growth and colony form can occur. After the strains are treated with the suspect chemical, they become able to produce histidine and grow to form a colony. In the study, Ames test with the different doses of Udimo 75 WG displayed a mutagenic activity at the highest concentration of 500 µg/plate both TA98 and TA100 strains (Maron and Ames 1983, Malev 2012, Kumar *et al.* 2013).

*S. typhimurium* TA98 strain has spontaneous mutations at the frameshift hisD3052 allele which consists of a -1 deletion. This allele can be reverted by frameshift mutagens. The base-pair substitution hisG46 allele in TA100 strain consists of a CCC codon (leucine) instead of the wild-type CTC codon (proline). This mutation can be reversed by mutagens that cause base change at G-C pairs (Di Sotto *et al.* 2008). In this context these bacterial properties, our results can be said that Udimo 75 WG mutagenicity in TA98 strain is caused by frameshift mutations and that of TA100 strain is due to base change (Di sotto *et al.* 2008).

Many studies have been conducted on sulfonylurea herbicides from past to presents with different microorganisms. Boldt and Jacobsen (1998) reported that metsulfuron methylin, a sulphonyl urea herbicide, is toxic at low concentrations in *Pseudomonas* strains, while chlorsulfuron has toxic effects at only higher concentrations. Thifensulfuron methylin was found to be toxic in some strains of *Pseudomonas* in the same study (Boldt and Jacobsen 1998). This study showed that the herbicides caused different results among strains (Boldt and Jacobsen, Burnet and Hodgson 1991). In the studies of many other researchers, sulphonylurea herbicides generally showed toxic

effects. Chlorsulfuron is a sulphonylurea herbicide, and it has been shown to be toxic in some microorganisms with concentration ranging from 3 µM (Forlani *et al.* 1995) to 2.8 mM (Blair and Martin 1988). Burnet and Hodgson (1991) reported that sulfometuron methyl and chlorsulfuron, which are sulphonylurea herbicides, have different toxic effects. In this study, sulfometuron methyl reduced the growth in many strains compared to methyl chlorsulfuron. All these studies mentioned above have results that support our study. Unlike our study, the sulphonylurea herbicide monosulfuron does not have a mutagenic effect with the Ames test (Man-yi *et al.* 2008).

The achievement of such different results in different studies varies depending on the different physiological and genetic properties of the microorganisms. Microorganisms may also include different isoenzymes of ALS (Burnet and Hodgson 1991). In addition, these differences play an important role in the physical interaction between herbicide and enzyme. It has been also shown that the membranes function as a barrier for sulphonylurea herbicides (Burnet and Hodgson 1991). Additionally, the tested chemicals can be genotoxic, mutagenic or not genotoxic due to their biological activity and chemical structure such as positions of the binding location and having rings in the structure (Kutlu *et al.* 2011, Ema *et al.* 2012, Kaur *et al.* 2014).

#### 5. Conclusion

In conclusion, Udimo 75 WG was found to mutagenic at some doses in the Ames test. This and many similar herbicides may pose genotoxic risks to humans and other microorganisms. In order to increase the reliability of a study, it is considered appropriate to support it with other different test methods. It has been recommended that various chemical substances may enhance the number of revertants in *Salmonella* strains due to mechanisms that would correlate to eukaryotes (Gocke and Albertini 1996). In addition to these methods, comet test can be applied to detect DNA damage (Sasaki *et*

al. 2000). Studies like this will support the Ames test results and give us more insight into the chemical substances.

## 6. References

- Akyl, D. and Konuk, M., 2014. Detection of genotoxicity and mutagenicity of chlorthiophos using micronucleus, chromosome aberration, sister chromatid exchange, and Ames tests. *Environmental Toxicology*, **30(8)**, 937-45.
- Ames, B.N., Durston, W.E., Yamasaki, E. and Lee, F.D., 1973. Carcinogens are mutagens: a simple test system combining liver homogenates for activation and bacteria for detection. *Proceeding of the National Academy Sciences*, **70(8)**, 2281-2285.
- Blair, A.M. and Martin, T.D., 1988. A review of the activity and mode of action of sulfonylurea herbicides. *Pesticide Science*, **22**, 195-219.
- Beyer, E.M., Duffy, M.J., Hay, J.V. and Schlueter, D.D., 1988. Sulfonylureas. In: *Herbicides. Chemistry, Degradation and Mode of Action*, **3**, Kearney, P.C., Kaufman, D.D. Eds., Marcel Dekker, New York, 117-189.
- Boldt, T.S. and Jacobsen, C.S., 1998. Different toxic effects of the sulfonylurea herbicides metsulfuron methyl, chlorsulfuron and thifensulfuron methyl on fluorescent pseudomonads isolated from an agricultural soil. *FEMS Microbiology Letters*, **161**, 29-35.
- Brown, H.M., 2010. Mode of action, crop selectivity, and soil relations of the sulfonylurea herbicides. *Pest Management Science*, **29**, 263-281.
- Burnet, M. and Hodgson, B., 1991. Differential effects of the sulfonylurea herbicides chlorsulfuron and sulfomethuron on microorganisms. *Archives of Microbiology*, **155**, 521-525.
- Celik, A., Mazmanci, B., Camlica, Y., Askin, A. and Çömelekoğlu, U., 2003. Cytogenetic effects of lambda-cyhalothrin on Wistar rat bone marrow. *Mutation Research*, **539**, 91-97.
- Dean, B.J., Brooks, T.M., Hodson-Walker, G. and Hutson, D.H., 1985. Genetic toxicology testing of 41 industrial chemicals. *Mutation Research*, **153**, 57-77.
- Délye, C., Duhoux, A., Gardin, J.A.C., Gouzy, J. and Carrère, S., 2018. High conservation of the transcriptional response to acetolactate-synthaseinhibiting herbicides across plant species. *Weed Research*, **58**, 2-7.
- Di Sotto, A., Evandri, M.G. and Mazzanti, G., 2008. Antimutagenic and mutagenic activities of some terpenes in the bacterial reverse mutation assay. *Mutation Research*, **653**,130-133.
- Ema, M., Imamura, T., Suzuki, H., Kobayashi, N., Naya, M. and Nakanishi, J., 2012. Evaluation of genotoxicity of multi-walled carbon nanotubes in a battery of in vitro and in vivo assays. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **63**,188-195.
- Flückiger-Isler, S., Baumeister, M., Braun, K., Gervais, V., Hasler-Nguyen, N., Reimann, R., Van Gompel, J., Wunderlich, H.G. and Engelhardt, G., 2004. Assessment of the performance of the Ames II assay: a collaborative study with 19 coded compounds. *Mutation Research*, **558**, 181-197.
- Forlani, G., Mantelli, M., Branzoni, M., Nielsen, E. and Favilli, F., 1995. Differential sensitivity of plant-associated bacteria to sulfonylurea and imidazolinone herbicides. *Plant and Soil*, **176**, 243-253.
- Gocke, E. and Albertini, S., 1996. Synergistic/comutagenic action in the Ames test as an indication of irrelevant positive findings. *Mutation Research*, **350**, 51-57.
- Jin, J., Ma, H., Cao, X.F., Li, J.H., Zhang, Q.Y. and Chen, C.S., 2012. The discovery of the novel lead compound of N-nitroureas target on acetohydroxy acid synthase. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **104**, 218–223.
- Kauffmann, K., Gremm, L., Brendt, J., Schiwly, A., Bluhm, K., Hollert, H., Büchs, J., 2020. Alternative type of Ames test allows for dynamic mutagenicity detection by online monitoring of respiration activity. *Science of the Total Environment*, **726**, 137862.
- Kaur, M., Arora, S., Nagpal, A. and Katnoria, J.K., 2014. Clastogenic effects of synthetic food dyes using *Salmonella typhimurium* and *Allium cepa* test

- systems. *Indian Journal of Biotechnology*, **13**, 547-550.
- Kumar, A., Sharma, K., Tomar, M., Malik, V. and Kataria, S.K., 2013. Determination of mutagenic potential of imidacloprid in *Salmonella typhimurium*–TA 98 and TA 100 following bacterial reverse mutation assay. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research*, **4(7)**, 2231-1238.
- Kutlu, M., Öztaş, E. and Aydoğan, G., 2011. An investigation of mutagenic activities of some 9-substitued phenanthrene derivatives with Ames/Salmonella/microsome test. *Anadolu University Journal of Science and Technology*, **1**, 83-94.
- Malev, O., 2012. Toxic effects of selected neonicotinoids through different organisational levels: in vitro and in vivo studies. University of Nova Gorica Graduate School, Nova Gorica, 2012.
- Man-yi, W., Jun-jie, K., Guo-dong, J.U. and Bao-sen, Liu., Applied research of a new sulfonylurea herbicide monosulfuron. Nankai University, National Pesticide Engineering Research Center, Tianjin 300071, China.
- Maron, D.M. and Ames, B.N., 1983. Revised methods for the *Salmonella* mutagenicity test. *Mutation Research*, **113**, 173-215.
- Mora, D.A., Cheimona, N., Palma-Bautista, C., Rojano-Delgado, A.M., Osuna-Ruiz, M.D., Alcántara de la Cruz, R., De Prado, R., 2019. Physiological, biochemical and molecular bases of resistance to tribenuron-methyl and glyphosate in *Conyza canadensis* from olive groves in southern Spain. *Plant Physiology and Biochemistry*, **144**, 14–21.
- Moulas, C., Petsoulas, C., Rousidou, K., Perruchon, C., Karas, P. and Dimitrios, G.K., 2013. Effects of systemic pesticides Imidacloprid and Metalaxyl on the phyllosphere of pepper plants. *BioMed Research International*, **8**.
- Myhre, C.D., Loeppky, H.A., Stevenson, F.C., 2004. MON-37500 for weed control and alfalfa seed production. *Weed Technology*, **18**, 810–815.
- Özkara, A., 2017. Evaluation of Siperkor pesticide mutagenicity with Ames test. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, **17(2)**, 393-398.
- Sasaki, Y.F., Sekihashi, K., Izumiyama, F., Nishidate, E., Saga, A., Ishida, K. and Tsuda S., 2000. The comet assay with multiple mouse organs: comparison of comet assay results and carcinogenicity with 208 chemicals selected from IARC monographs and U.S. NTP Carcinogenicity Database. *Critical Reviews in Toxicology*, **30**, 629-799.
- Siroki, O., Undeger, U., Institoris, L., Nehez, M., Basaran, N., Nagymajtényi, L. and Dési, I., 2001. A study on geno and immunotoxicological effects of subacute propoxur and pirimicarb exposure in rats. *Ecotoxicol Environmental Safety*, **50**, 76-81.
- Stivaktakis, P., Vlastos, D., Giannakopoulos, E. and Demetrios, P.M., 2010. Differential micronuclei induction in human lymphocyte cultures by imidacloprid in the presence of potassium nitrate. *Research Article in the Science World Journal*, **10**, 80–89.
- Zhang, Y.Y., Gao, S., Hoang, M., Wang, Z., Ma, X., Zhai, Y., Li, N., Zhao, L., Fu, Y. And Ye, F., 2021. Protective efficacy of phenoxyacetyl oxazolidine derivatives as safeners against nicosulfuron toxicity in maize. *Pest Management Science*, **77**, 177-183.



## The Radiation Shielding Properties of the Low Temperature Alloys

Canan AKSOY<sup>1\*</sup>, Serdar DİZMAN<sup>2</sup>, Bakiye ÇAKIR<sup>3</sup>, Ezgi TAYLAN KOPARAN<sup>4</sup>, Engin TIRAŞOĞLU<sup>5</sup>

<sup>1\*</sup> Electronics and Communication Engineering, Faculty of Technology, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

<sup>2\*</sup> Department of Physics, Faculty of Arts and Sciences, Recep Tayyip Erdogan University, Rize, Turkey

<sup>3</sup> Vocational School of Health Services, Artvin Çoruh University, Artvin, Turkey

<sup>4</sup> Department of Mathematics and Science Education, Ereğli Faculty of Education, Zonguldak Bülent Ecevit University, 67300 Zonguldak, Turkey

<sup>5</sup> Department of Physics, Faculty of Science, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey

e-posta: \*Corresponding author: [cananaksoy@ktu.edu.tr](mailto:cananaksoy@ktu.edu.tr)

[serdar.dizman@erdogan.edu.tr](mailto:serdar.dizman@erdogan.edu.tr),

[bcakir@artvin.edu.tr](mailto:bcakir@artvin.edu.tr),

[etaylan20@gmail.com](mailto:etaylan20@gmail.com),

[engint@ktu.edu.tr](mailto:engint@ktu.edu.tr),

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0554-7123>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6511-9526>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-4339-1913>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4762-2742>

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7953-5638>

Geliş Tarihi: 01.08.2021

Kabul Tarihi: 19.10.2021

### Abstract

Solder alloys are significant for many applications. In addition to the physical electrical and magnetic properties of solders, it is of great importance to determine the shielding properties of the materials in order to prevent the harmful effects of radiation on human health if they are used in systems containing radiation. In this study, the shielding properties of some low temperature solder alloys were investigated. The alloy samples were tested by the gamma-ray emitted from <sup>241</sup>Am radioactive source 59.5 keV energy settled into HpGe detector. The highest mass attenuation coefficient and the lowest HVL and MFP values were determined for studied samples. The results showed that SDO-4 with the lowest shielding parameters, it is much more suitable for the radiation shielding among the studied sample.

#### Keywords

Attenuation coefficient; Solder alloys; WinXCOM; HpGe detector

## Düşük Sıcaklık Alaşımlarının Radyasyon Zırhlama Özellikleri

### Öz

Lehimler birçok uygulama için önemlidir. Lehimlerin fiziksel elektrik ve manyetik özelliklerinin yanı sıra bunların radyasyon içeren sistemlerde kullanılması durumunda radyasyonun insan sağlığına zararlarını önlemek açısından malzemelerin zayıflatma özelliklerinin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bazı düşük sıcaklık süperiletken lehim alaşımlarının zırhlama özellikleri araştırıldı. Alaşım numuneleri, HpGe dedektörüne yerleştirilen <sup>241</sup>Am radyoaktif kaynaktan 59.5 keV enerjisiyle yayılan gama ışını ile uyarılmıştır. En yüksek kütle soğurma katsayısı ve en düşük HVL, MFP değerleri belirlendi. Sonuçlar, en düşük ekranlama parametrelerine sahip SDO-4'ün, çalışılan örnek arasında radyasyon kalkanı için çok daha uygun olduğunu göstermiştir.

#### Anahtar kelimeler

Zayıflama katsayısı; Lehim alaşımları; WinXCOM; HpGe dedektör

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Introduction

New developed superconducting materials are crucial for the electronic and cryogenic applications. The researchers have been investigating novel lead free solders because of the legislation on lead including materials. Tin based solders are good candidate to replace the lead including alloys with their good mechanical properties with high ductility, low melting point. Besides, their electrical and

superconducting properties are acceptable for using them in microelectronic and low temperature applications. Among the tin based solders, SnIn and SnInBi can be candidates for superconducting applications to replace the currently used lead based solders (Mousavi et al. 2015). The determined binary and ternary solders might be affected from the addition of other superconducting materials such as MgB<sub>2</sub>, YBCO, Pb. These materials have

already been used for many applications such as ITER and TOKAMAK where the materials exposed to high magnetic field and radiation. Although MgB<sub>2</sub> and YBCO have higher melting point comparing the solder formation temperature, their soluble properties might be changed the SnIn solder system. It has already known that lead contribution is effecting the solder and enhancing the superconducting physical, electric and magnetic properties (Matsumoto et al. 2017). In case of their using in the nuclear research. The shielding properties are quite crucial to determine the thickness to design the radiation absorption level of the used materials for radiation used systems. The attenuation and shielding parameters are the mass and linear attenuation coefficients, and half value layer (HVL), tenth value layer (TVL) and mean free path (MFP). They are evaluated for composite materials [Sürücü and Subaşı 2021], bulk and alloy materials [Şirin 2021, Karadoğan et al. 2021, Aksoy 2021], soils (Sarı and Dizman 2020), minerals [Baltaş et al. 2019], for several pure elements [Kaya et al. 2017]. The SnIn alloy used as a based alloy material as SnIn(35:65) and SnInBi (50:35:15) were claimed that they have the best superconducting properties among the binary SnIn and the ternary SnInBi superconducting solders (Mousavi et al. 2015).

The main goal of this study was, determining the shielding properties of the own fabricated alloy solders with contribution of MgB<sub>2</sub>, YBCO to SnIn and Pb to SnInBi solder alloys. The fabricated samples were irradiated by the gamma rays emitted from high-purity germanium detector. The measured mass attenuation coefficients were compared with the theoretical values from the online calculation WinXCOM software.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Experimental procedure

The compositions of the studied samples were given in in table 1 with their label and the density of the each sample. The weighted powders were mixed together for 2 minutes and melted in the alumina crucible at temperatures up to 350 °C for 1 hour on a hot-plate. The samples were poured in to the 5 mm radius copper mould and the samples

were cut as 1 mm thickness as seen in Figure 1. The density of the samples were measured by Archimedes method by using pure water.

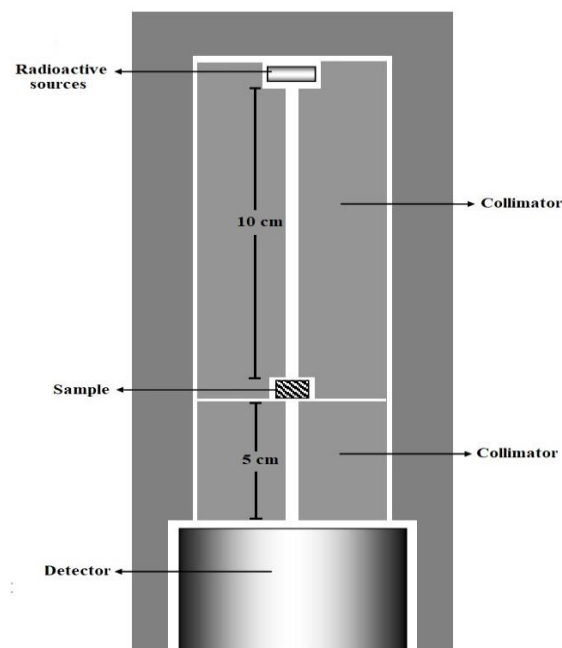


**Figure 1.** It shows the shape of studied samples

**Table 1.** The labels and densities of the used samples

Chemical Composition		Code	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Sn <sub>35</sub> In <sub>65</sub>	+2wt % YBCO	SDO-1	6.20
Sn <sub>35</sub> In <sub>65</sub>	+ 2wt% MgB <sub>2</sub>	SDO-2	6.19
Sn <sub>35</sub> In <sub>65</sub>	+4wt % MgB <sub>2</sub>	SDO-3	6.07
Sn <sub>50</sub> In <sub>35</sub> Bi <sub>15</sub>	+2wt % Pb	SDO-4	6.14

The produced samples were measured by ORTEC high purity detector emitted gamma ray of using <sup>241</sup>Am radioactive source at 59.5 keV energy. The 10 cm lead shield is used to decrease the background level. The figured experimental set up were illustrated in Figure 2.



**Figure 2.** Experimental set-up of the Gamma ray attenuation system.

## 2.2 The calculation of the shielding parameters

The Beer-Lambert's Law is considered to calculate the shielding parameters are calculated. It was proved that if any material subjects to a gamma-ray, the incident beam is attenuated by  $x$  thickness as formulated Equation 1.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

The mass attenuation coefficients ( $\mu/\rho$ ) of the samples is calculated by using the mixture rule Eq. (2):

$$\mu/\rho = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (2)$$

where  $\rho$  is the density of the material, while  $w_i$  is weight fraction and  $(\mu/\rho)_i$  is mass attenuation coefficient values of the  $i$ th element in the alloy (Scofield 1974, Berger and Hubbell 1987).

Theoretical  $\mu/\rho$  of studied solder alloy samples were calculated with WinXCOM online software program (Berger and Hubbell 1987, Gerward et al. 2004).

The Half-Value Layer (HVL) indicates the one-half value of the initial photon which helps the determine the material thickness for shielding, the tenth value layer (TVL) is a tenth of the original intensity and mean free path (MFP) is the material thickness, the average distance a unit of radiation can travel in the material before being absorbed. HVL, TVL, MFP are calculated as following;

$$HVL = \ln 2 / \mu \quad (3)$$

$$TVL = \ln 10 / \mu \quad (4)$$

$$MFP = \frac{\int_0^\infty t e^{-\mu t} dt}{\int_0^\infty t e^{-\mu t} dt} = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

## 3. Results and Discussion

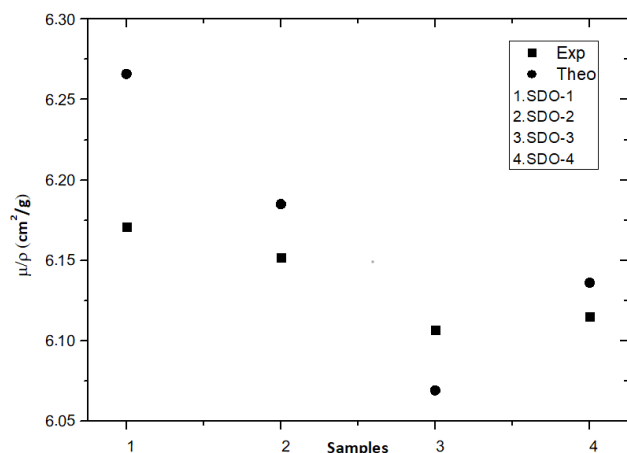
The attenuation coefficients were investigated at 59.5 keV emitted gamma ray from  $^{241}\text{Am}$  radioactive source. The obtained data from the experiment and the theoretical values of mass attenuation coefficient were calculated by using the normalised sample compositions. The mixture section was used and the energy was added the emitted energy as 59.5 keV in WinXCOM online software programme. The theoretical values were taken from the attenuation without coherent scattering of the total attenuation.

The shielding properties of the investigated samples were also calculated by using linear attenuation coefficient. All data were illustrated in Table 2 and the compared data were given in Fig.3 and Fig.4.

**Table 2.** The attenuation and shielding data of the studied samples. The relative deviations from the theoretical data were added to the experimental data.

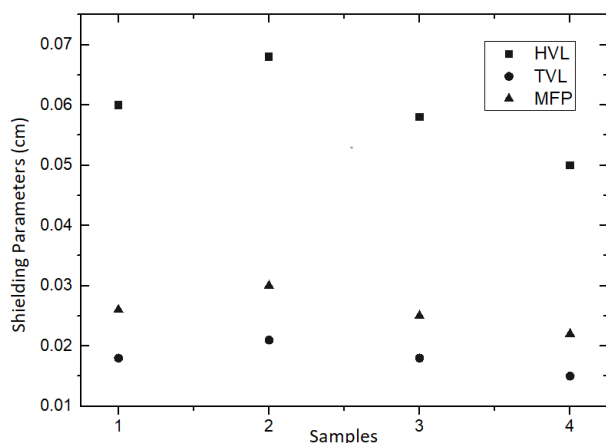
Sample	$\mu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	TVL (cm)	HVL (cm)	MFP (cm)	$(\mu/\rho)$ Exp ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$(\mu/\rho)$ Theo ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
SDO-1	38.26	0.06	0.02	0.03	6.17±0.02	6.27
SDO-2	33.83	0.07	0.02	0.03	6.15±0.01	6.19
SDO-3	39.69	0.06	0.02	0.03	6.11±0.01	6.07
SDO-4	45.86	0.05	0.02	0.02	6.12±0.01	6.14

The mass attenuation coefficient was given in Fig. 3 with the compared data from the WinXCom. The experimentally obtained data were lower than the theoretical one except the SDO-3 among the other samples. It might be induced from the increased the  $\text{MgB}_2$  content that reduced the sample density while compared the SDO-2. It may be explained with the photonic interactions such as photoelectric absorption mechanism in low energies (Mariyappan et al.2018). The highest and lowest values were SDO-1 and SDO-3, respectively. It seems that SDO-3 is much more suitable for radiation shielding among the studied samples.



**Figure 3.** The mass attenuation coefficients at 59.5 keV of the studied alloys

The shielding properties such as HVL, TVL, MFP of the studied materials were plotted in the Fig.4. The compared results showed that the sample has maximum value is SDO-1 and the minimum one is SDO-4.



**Figure 4.** The shielding parameters of the studied samples

Ağar (2018) mentioned that the highest mass attenuation coefficient and the lowest HVL and MFP values are acceptable to determine the best shielding material. Thus, in the current study, it can be said that SDO-4 with the lowest shielding parameters, it is much more suitable for the radiation shielding at 59.5 keV. The current results might be useful for the researcher study on the designing of the radiation shield and or various applications.

#### 4. References

Ağar, Osman, 2018. "Investigation on gamma radiation shielding behaviour of CdO–WO3–TeO2 glasses from 0.015 to 10 MeV. *Cumhuriyet Science Journal*, 39, no. 4: 983-990.

Aksoy, C., 2021. The X-Ray fluorescence parameters and radiation shielding efficiency of silver doped superconducting alloys. *Radiation Physics and Chemistry*, **186**, 109543.

Baltas, H., Sirin, M., Celik, A., Ustabas, & El-Khayatt, A. M., 2019. Radiation shielding properties of mortars with minerals and ores additives. *Cement and Concrete Composites*, **97**, 268-278.

Berger MJ, Hubbell JH., 1987. XCOM: Photon Cross Sections Database. Web Version 1.2. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA, August 1999 (originally published as NBSIR 87-3597, XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, 1987–1999.

Gerward L, Guilbert N, Jensen KB, Leving H., 2004. –a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiation physics and chemistry*. 71: **653-4**.

Hubbell, J. and Seltzer, S., 1995, Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html> (Accessed October 14, 2021).

Karadoğan Işık, Z., Özdemir, Y., Kavaz, E., 2021. Ni Tabanlı Bazı Süperalaşımın Foton Etkileşim Özelliklerinin İncelenmesi, *El-Cezeri* **8**, 552-566.

Kaya, N., Tıraşoğlu, E., Apaydın, G., Aylıkçı, V., & Cengiz, E. 2007. K-shell absorption jump factors and jump ratios in elements between Tm (Z= 69) and Os (Z= 76) derived from new mass attenuation coefficient measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **262** (1), 16-23.

Mariyappan M., Marimuthu K., Sayyed M.I., Dong M.G., Kara U., 2018. Effect Bi2O3 on the physical, structural and radiation shielding properties of Er3+ ions doped

bismuth sodium fluoroborate glasses, *J. Non-Cryst. Solids*, **499**, 75–85.

Matsumoto, R., Iwata, H., Yamashita, A., Hara, H., Nishijima, G., Tanaka, M., & Takano, Y., 2017. Superconducting joints using Bi-added PbSn solders. *Applied Physics Express*, **10** (9), 093102.

Mousavi, T., Aksoy, C., Grovenor, C.R.M. & Speller, S. C., 2015. Microstructure and superconducting properties of Sn–In and Sn–In–Bi alloys as Pb-free superconducting solders, *Superconductor Science and Technology*, **29** (1). 015012.

Sarı S. , Dizman S., 2020. Ovit Dağbaşı Gölü Çevresinden Alınan Toprak Örneklerinde Radyoaktivite ve Radyolojik Etkilerin Araştırılması, 2020, *El-Cezeri Cezeri Journal of Science and Engineering*, **7**, 3, 1122 – 1130.

Scotfield JH., 1974. Exchange corrections of K X-ray emission rates. *Physical Review A*. **9** (3):1041.

Sirin, M., 2020. The effect of titanium (Ti) additive on radiation shielding efficiency of Al25Zn alloy. *Progress in Nuclear Energy*, **128**, 103470.

Sürücü, A.M and Subaşı S., 2021. "Nanomateriyallerin Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi." *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, **8.1**: 182-1941.

# Co-M-Ni (M= Fe, Ag) Geçiş Metali Nanoalaşımlarının Yapısal, Enerjik ve Manyetik Özellikleri

Hüseyin YILDIRIM<sup>1</sup><sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Yenice Meslek Yüksekokulu, Karabükhuseyinyildirim@karabuk.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8554-3885>

Geliş Tarihi: 01.05.2021

Kabul Tarihi: 04.10.2021

## Öz

Bu çalışmada,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşım sistemlerinin yapısal, enerjik ve manyetik özellikleri hakkında teorik bir araştırma yapılmıştır. Hesaplamalarımız, seçilen sistemlerde Gupta ve DFT yaklaşımları birleştirilerek yapılmıştır. Gupta düzeyindeki optimizasyon sonuçları, Fe, Ag ve Ni atomlarının yüzeye yerleşmeyi tercih ettiğini ve Co atomlarının ise merkeze yerleşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Gupta düzeyindeki karışma enerjisi analizinden,  $\text{Co}_1\text{Fe}_6\text{Ni}_6$  ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$  nanoalaşımlarının sırasıyla  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için en kararlı bileşim olduğu bulunmuştur. Ayrıca, Gupta düzeyi enerjik olarak DFT düzeyi ile uyumlu değildir. Nanoalaşımların toplam manyetik momentleri ve atomların lokal manyetik momentleri ve lokal yükleri de incelenmiştir. 13 atomlu Co-M-Ni (M= Fe, Ag) nanoalaşımlarının toplam manyetik momentinin ferromanyetik Fe atomlarının eklenmesiyle arttığı ve manyetik olmayan Ag atomlarının eklenmesiyle genellikle azaldığı görülmüştür. Simülasyon sonuçları,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının yapısal, enerjik ve manyetik özelliklerinin kompozisyona bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

### Anahtar kelimeler

Manyetik nanoalaşımlar;  
Optimizasyon;  
Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi; Kobalt; Demir; Nikel

## Structural, Energetic and Magnetic Properties of Co-M-Ni (M= Fe, Ag) Transition Metal Nanoalloys

### Abstract

In this study, a theoretical investigation about structural, energetic, and magnetic properties of  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ternary nanoalloy systems has been performed. Our calculations have been performed combining Gupta and DFT approaches on chosen systems. The optimization results at Gupta level show that, Fe, Ag and Ni atoms prefer to locate on the surface and Co atoms tend to locate at the centre. From the excess energy analysis at Gupta level,  $\text{Co}_1\text{Fe}_6\text{Ni}_6$  and  $\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$  nanoalloys was found to be the most stable composition for  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalloys, respectively. Also, the Gupta level energetically does not compatible with the DFT level. The total magnetic moments of the nanoalloys and local magnetic moments and local charges of the atoms have been examined. It has been observed that the total magnetic moment of the 13 atom Co-M-Ni (M=Fe, Ag) nanoalloys increase by the addition of ferromagnetic Fe atoms and generally decrease by the addition of non-magnetic Ag atoms. The simulation results show that the structural, energetic, and magnetic properties of  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalloys vary depending on the composition.

### Keywords

Magnetic nanoalloys;  
Optimization; Density functional theory;  
Cobalt; Iron; Nickel

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Son yıllarda nanomanyetizma, bulk sistemlerdeki manyetizmadan önemli ölçüde farklı olduğu için hem temel hem de uygulamalı araştırmalarda ilgi görmektedir. (Ferrando 2016, Ebrahimi *et al.* 2019, Binns 2014). Manyetik nanoalaşımlar, benzersiz manyetik özellikleri nedeniyle ultra yüksek

yoğunluklu manyetik kayıt ortamı, manyetik veri depolama, radar emici malzeme, nükleer manyetik rezonans (NMR) görüntüleme, ilaç ve gen dağıtımı, kanser tedavisi ve teşhisi, tümörlerin ısı tedavisi, hücre ayırımı, piller, floresan biyolojik etiketleme, gaz sensörleri ve katalizörler gibi endüstriyel ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Ebrahimi *et al.* 2019, Binns 2014,

Salati *et al.* 2020, Sun *et al.* 2008, El-Gendy 2018, Toparli *et al.* 2017). Özellikle geçiş metali nanoalaşımları mükemmel katalitik ve manyetik özelliklere sahiptir (Abhandlung 2013).

Geçiş metalleri arasında Co, Fe, Ag ve Ni gibi metaller ve bunların alaşımları, yüksek bulunabilirlikleri, düşük maliyetleri ve elektron açısından zengin kapasiteleri nedeniyle çeşitli elektrokimyasal uygulamalar, oksijen evrimi reaksiyonu (oxygen evolution reaction-OER) ve oksijen indirgeme reaksiyonu (oxygen reduction reaction-ORR) için etkili bir elektrokatalizör olarak bilinmektedir ve benzersiz manyetik özelliklere sahiptir (Toparli *et al.* 2017, Annalakshmi, Nam *et al.* 2018, Yang *et al.* 2017, Theofanidis *et al.* 2018, Boroujeni *et al.* 2019, Bochicchio and Ferrando 2013). Örneğin, Ni-Co nanoalaşımlarının OER ve ORR reaksiyonlarında mükemmel elektrokatalitik aktivite sergiledikleri görülmüştür ve manyetik özelliklerini araştıran birçok çalışma yapılmıştır (Fu *et al.* 2016, Zeng *et al.* 2017, Panday *et al.* 2013, Bouzit *et al.* 2017). Ni-Fe nanoalaşımları OER reaksiyonunda elektrokatalizör olarak kullanılmıştır ve mıknatıs alaşım oldukları bilinmektedir (Toparli *et al.* 2017, Bates *et al.* 2016). Fe-Co nanoalaşımları, en yüksek seviyede doyunluk manyetizasyonu, yüksek Curie sıcaklığı, yüksek geçirgenlik gibi manyetik özellikler sergilemektedir (Çelik and Fırat 2018, Klencsar *et al.* 2016). Ag-Co ve Ag-Ni nanoalaşımları ise bir ferromanyetik ve bir ferromanyetik olmayan metalden oluşmalarından kaynaklanan ilginç manyeto-optik özellikleri nedeniyle incelenmiştir (Bochicchio and Ferrando 2013).

Nanoalaşımların yapısal, manyetik ve katalitik özelliklerinin belirlenmesinde, nanoalaşımların kimyasal düzeni, yapısal morfolojisi ve kompozisyon çeşitliliği önemli rol oynamaktadır (Taran *et al.* 2020b, Taran 2019, Calvo 2013, Taran and Arslan 2020, Taran *et al.* 2016). Bu nedenle, manyetik özelliklerin kompozisyona bağımlılığı ve nanoalaşımların manyetik özellikleri ile kimyasal düzeni arasındaki ilişki hakkında detaylı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, 13 atomlu Co-Fe-Ni ve Co-Ag-Ni nanoalaşımların yapısal ve manyetik özellikleri hakkında yeterli

literatür bilgisi olmadığı için,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların yapısal ve manyetik özelliklerinin kompozisyon ve kimyasal düzen ile ilişkisi incelenmiştir. 13 atomlu ikosahedron geometriye yoğunlaşmamızın sebebi, ikosahedron geometrinin farklı geometriler arasında en yüksek simetriye sahip olması ve 13'ün ikosahedron geometri için sihirli bir sayı olmasıdır (Taran 2019, Yıldırım and Arslan 2020). Ayrıca, az sayıda atomdan oluşan ikosahedron nanoalaşımlar, sıkı istiflenmiş bir yüzeye sahip oldukları için daha kullanışlıdır (Taran 2019).

Bu çalışmada,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların yapısal kararlılığı ve manyetik davranışlarını karşılaştırmak için farklı kompozisyon sistemleri düşünülmüştür ve simülasyonlar, atomik potansiyellerin Yoğunluk Fonksiyonel Teorisine (Density Functional Theory-DFT) karşı geçerliliğini kontrol etmek için Gupta ve DFT simülasyonlarını birleştirerek gerçekleştirilmiştir. Gupta düzeyindeki lokal optimizasyonlar,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların bir tane atomu sabit alınarak ve diğer iki atomun toplam sayısı 12 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Gupta düzeyindeki lokal optimizasyonlar sonucunda varsayılan en düşük enerjiye sahip yapılar daha sonra DFT yaklaşımı ile yeniden optimize edilmiştir. Göreceli kararlılığı analiz etmek için Gupta ve DFT düzeylerinin karışma enerjileri hesaplanmıştır. Ayrıca, nanoalaşımların toplam manyetik momentleri ve atomların lokal manyetik momentleri ve lokal yükleri de hesaplanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

$\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların varsayılan en düşük enerjiye sahip yapıları Basin-Hopping algoritması kullanılarak GMIN programı ile elde edilmiştir (Wales and Doye 1997). Her nanoalaşım için Basin-Hopping algoritması  $2 \times 10^5$  adımda gerçekleştirilmiştir. Atomlar arası etkileşimler Gupta çok cisim potansiyeli ile modellenmiştir ve Co-Fe-Ni ve Co-Ag-Ni üçlü nanoalaşımların Gupta potansiyel parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir [Varas *et al.*



2015, Kuntová *et al.* 2008). Co-Fe, Co-Ni ve Fe-Ni etkileşmeleri için parametreler homonükleer parametrelerin aritmetik ortalaması olarak alınmıştır.

**Çizelge 1.** Co-Fe-Ni ve Co-Ag-Ni nanoalaşımlarının Gupta potansiyel parametreleri.

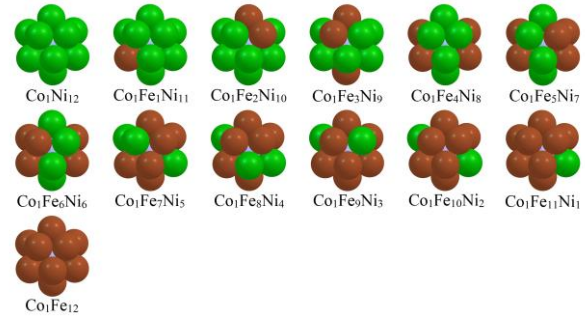
	A (eV)	p	q	ξ (eV)	r <sub>0</sub> (Å)
Co-Co	0.0950	11.604	2.2860	1.4880	2.4970
Co-Fe	0.1141	11.052	2.4430	1.5530	2.5250
Co-Ag	0.1444	10.001	3.0850	1.4776	2.6900
Co-Ni	0.0663	14.302	1.7375	1.2790	2.4935
Fe-Fe	0.1332	10.500	2.6000	1.6179	2.5530
Ag-Ag	0.1031	10.850	3.1800	1.1895	2.8900
Fe-Ni	0.0854	13.750	1.8945	1.3440	2.5215
Ag-Ni	0.0960	11.095	2.7250	1.3400	2.6900
Ni-Ni	0.0376	16.999	1.1890	1.0700	2.4900

Gupta düzeyindeki lokal optimizasyonlar sonucunda elde edilen en düşük enerjiye sahip yapılar DFT hesaplamaları için başlangıç konfigürasyonları olarak kullanılmıştır. DFT hesaplamaları, Quantum Espresso'da (QE) PWscf kodu (Giannozzi vd. 2009, Giannozzi vd. 2017), pseudopotansiyeller (Vanderbilt 1990) ve Perdew Burke Ernzerhof (PBE) tarafından önerilen genelleştirilmiş gradyent yaklaşımı (GGA) kullanarak yapılmıştır (Perdew *et al.* 1996). Dalga fonksiyonu enerji kesim değeri 41.0 Ry ve yük yoğunluğu enerji kesim değeri ise Co-Fe-Ni nanoalaşımları için 782.0 Ry, Co-Ag-Ni nanoalaşımları için 445.0 Ry olarak seçilmiştir. Marzari-Vanderbilt smearing tekniği 0.02 Ry genişletilerek uygulanmıştır. Tüm DFT hesaplamalarında küme bir kenarı 17 Å olan kübik bir hücrenin merkezine yerleştirilmiştir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

13 atomlu  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların lokal optimizasyonları, her iki kompozisyon sistemi için  $Co_1Ni_{12}$  ikili nanoalaşımlarından başlayarak sırasıyla Fe ve Ag atom sayıları artırılarak yapılmıştır. 13 atomlu ikosahedron geometrinin bir atomu merkezde diğer 12 atomu ise yüzeyde bulunmaktadır.  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımların lokal optimizasyonları sonucunda bulunan en düşük enerjiye sahip yapıları sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 1 ve Şekil 2'de Co, Fe, Ag ve Ni atomları sırasıyla mavi,

kahverengi, gri ve yeşil renkli küreler ile gösterilmiştir.



**Şekil 1**  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının Gupta düzeyindeki lokal optimizasyonları sonucunda elde edilen en düşük enerjiye sahip yapıları.

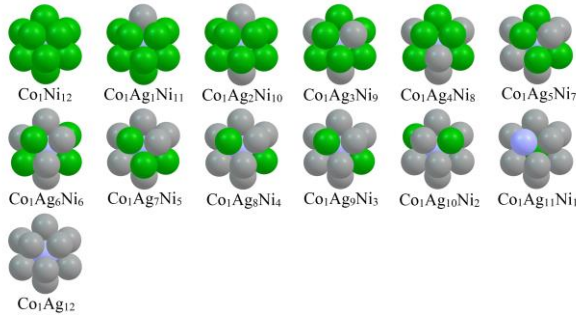
Şekil 1'e göre,  $Co_1Ni_{12}$  ikili nanoalaşımında Co atomu nanoalaşımın merkezine, Ni atomları nanoalaşımın yüzeyine yerleşmektedir. Bir Fe atomunun, bir Ni atomunun yerine ikame edilmesiyle Fe atomları nanoalaşımların yüzeyine yerleşmektedir.  $Co_1Fe_{12}$  ikili nanoalaşımında Co atomu nanoalaşımın merkezine, Fe atomları nanoalaşımın yüzeyine yerleşmektedir.  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için Co atomu daima nanoalaşımın merkezine, Fe ve Ni atomlarının ise yüzeye yerleşme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Şekil 2'e göre,  $Co_1Ni_{12}$  ikili nanoalaşımında Co atomu nanoalaşımın merkezine, Ni atomları nanoalaşımın yüzeyine yerleşmektedir. Bir Ag atomunun, bir Ni atomunun yerine ikame edilmesiyle Ag atomları nanoalaşımların yüzeyine yerleşmektedir.  $Co_1Ag_{11}Ni_1$  nanoalaşımında 1 Ni atomu nanoalaşımın merkezine yerleşirken, Ag ve Co atomları yüzeye yerleşmektedir.  $Co_1Ag_{12}$  ikili nanoalaşımında ise Co atomu nanoalaşımın merkezine, Ag atomları yüzeye yerleşmektedir.  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için Co atomu genellikle nanoalaşımın merkezine, Ag ve Ni atomlarının ise yüzeye yerleşme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, Gupta düzeyinde  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarında, Co atomunun nanoalaşımlara yerleşme eğiliminin birbirine benzediği görülmüştür. Co atomu her iki kompozisyon sisteminde de merkeze yerleşmiştir. Lokal optimizasyon sonuçları bu çalışmada öne



sürülen  $Co_{merkez}(FeNi)_{yüzey}$  ve  $Co_{merkez}(AgNi)_{yüzey}$  yerleşimlerini desteklemektedir. Varas ve arkadaşları 13 atomlu Fe-Co-Ni nanoalaşımları için benzer sonuçları elde etmişlerdir (Varas *et al.* 2015).



**Şekil 2**  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının Gupta düzeyindeki lokal optimizasyonları sonucunda elde edilen en düşük enerjiye sahip yapıları.

Kimyasal düzeni ile en düşük enerjiye sahip olan yapıların enerjileri kullanılarak yapılan karışma enerjisi ( $E_{exc}$ ) analizi, nanoalaşımların kararlılığını kompozisyona göre incelenmek için kullanılan bir yöntemdir. Nanoalaşımda sayısı sabitlenen atom türü varsa, lokal optimizasyonlar sonucunda elde edilen  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımları için karışma enerjisi sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) ile tanımlanmaktadır (Yıldırım and Arslan 2020).

$$\Delta E_{exc}^{Gupta,DFT} = E(Co_1Fe_nNi_{12-n}) - n \frac{E(Co_1Fe_{12})}{12} - 12 - n \frac{E(Co_1Ni_{12})}{12} \quad (1)$$

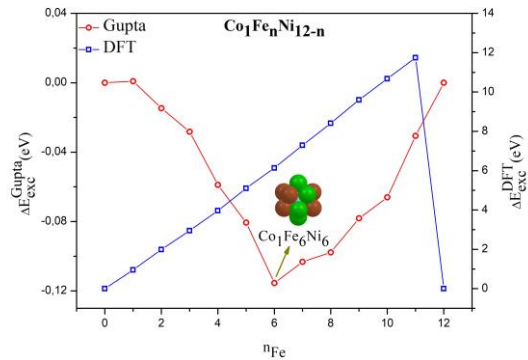
$$\Delta E_{exc}^{Gupta,DFT} = E(Co_1Ag_nNi_{12-n}) - n \frac{E(Co_1Ag_{12})}{12} - 12 - n \frac{E(Co_1Ni_{12})}{12} \quad (2)$$

$E(Co_1Fe_nNi_{12-n})$  ve  $E(Co_1Ag_nNi_{12-n})$  üçlü nanoalaşımların toplam Gupta ve DFT enerjilerini,  $E(Co_1Fe_{12})$ ,  $E(Co_1Ni_{12})$  ve  $E(Co_1Ag_{12})$  ise ikili nanoalaşımların toplam Gupta ve DFT enerjilerini ifade etmektedir (Taran *et al.* 2020a).

Karışma enerjisi analizi, nanoalaşımı oluşturan metallerin karışma derecesini vermektedir. Karışma enerjisinin en düşük değeri, bir kompozisyon sisteminde karışma en uygun kompozisyonu yani en

kararlı nanoalaşımı vermektedir (Yıldırım ve Arslan 2019).  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) kompozisyon sistemlerinin Gupta ve DFT düzeyindeki karışma enerjisi eğrileri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

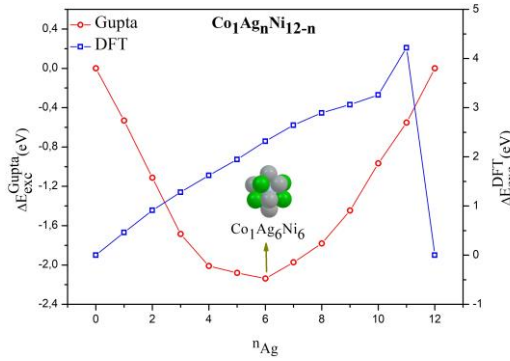
Fe atomlarının sayısının ( $n_{Fe}$ ) bir fonksiyonu olarak  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının karışma enerjisi grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'e göre,  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları Gupta düzeyinde enerjik olarak karışma uygunken, DFT düzeyinde pozitif karışma enerjileri nedeniyle enerjik olarak karışma uygun değildir. Bu sonuç,  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) kompozisyon sistemi için Gupta ve DFT düzeylerinin enerjik olarak birbiri ile uyumlu olmadığını göstermektedir. Ayrıca, Gupta düzeyinde en kararlı nanoalaşım  $Co_1Fe_6Ni_6$  olarak elde edilmiştir.  $Co_1Fe_6Ni_6$  nanoalaşımının sahip olduğu karışma enerjisi değeri  $E_{exc} = -0.12$  eV'dur.  $Co_1Fe_6Ni_6$  nanoalaşımında Fe ve Ni atomları birbiriyle karışarak simetrik olarak nanoalaşımın yüzeyine yerleşirken, Co atomu nanoalaşımın merkezine yerleşmektedir.



**Şekil 3**  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının Gupta ve DFT düzeyinde karışma enerjilerinin Fe sayısına göre değişimi.

Ag atomlarının sayısının ( $n_{Ag}$ ) bir fonksiyonu olarak  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının karışma enerjisi grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'e göre,  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları Gupta düzeyinde enerjik olarak karışma uygunken, DFT düzeyinde pozitif karışma enerjileri nedeniyle enerjik olarak karışma uygun değildir. Bu sonuç,  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) kompozisyon sistemi için Gupta ve DFT düzeylerinin enerjik olarak birbiri ile

uyumlu olmadığını göstermektedir. Ayrıca, Gupta düzeyinde en kararlı nanoalaşım  $\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$  olarak elde edilmiştir.  $\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$  nanoalaşımının sahip olduğu karışma enerji değeri  $E_{\text{exc}}=-2.13$  eV'dur.  $\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$  nanoalaşımında Ag ve Ni atomları birbiriyle karışarak nanoalaşımın yüzeyine yerleşirken, Co atomu nanoalaşımın merkezine yerleşmektedir.



**Şekil 4**  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarının Gupta ve DFT düzeyinde karışma enerjilerinin Ag sayısına göre değişimi.

Gupta düzeyinde,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) kompozisyon sistemleri için ikili nanoalaşımaların karışma enerjisi değerlerinin  $E_{\text{exc}}=0.00$  eV olduğu görülmektedir. Bu sonuç üçlü nanoalaşımaların Gupta düzeyinde ikili nanoalaşımlara göre daha kararlı olduğu anlamına gelmektedir. Yani üçlü nanoalaşımlar enerji analizine göre karışıma daha elverişlidir. Ayrıca,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) kompozisyon sistemlerinde Gupta ve DFT düzeyleri birbiriyle uyumsuz sonuçlar vermektedir. Fernandez ve arkadaşlarının çalışmasından en düşük enerjilere karşılık gelen Gupta düzeyi konfigürasyonlarının DFT hesaplamalarıyla uyumlu olmadığı bilinmektedir (Fernandez and Balbas 2005).

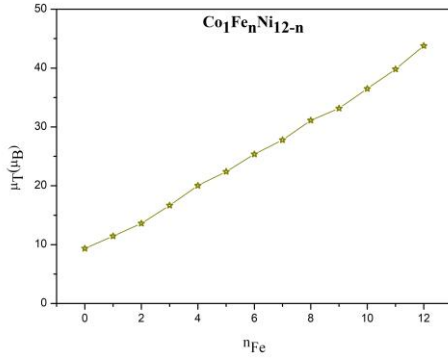
Geçiş metali nanoalaşımalarının manyetik özellikleri umut verici teknolojik uygulamalarda kullanıldığından dolayı, manyetik özellikler üzerindeki alaşım etkisi 13 atomlu  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımları için hesaplanmıştır. Quantum Espresso'da boyutları açıkça belirtilmeyen tüm büyüklükler Rydberg atomik birimleri ile tanımlanmıştır. Yük sayı olarak

verilmiştir. Toplam ve lokal manyetik momentler, Bohr magnetonu ( $\mu_B$ ) birimi ile verilmiştir. Bu çalışmada,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımalarının lokal yük ve manyetik moment birimleri Quantum Espresso ile uyumlu olarak verilmiştir. Her iki kompozisyon sisteminin toplam manyetik momentleri  $\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$  ikili nanoalaşımından başlayıp  $\text{Co}_1\text{Fe}_{12}$  ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_{12}$  ikili nanoalaşımlarına kadar hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

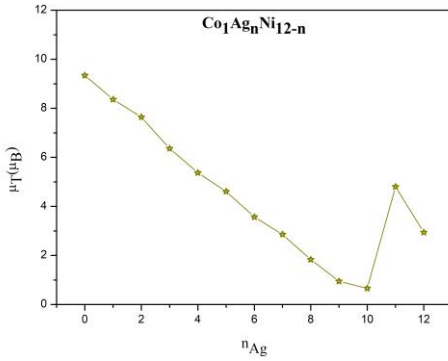
Fe atomlarının sayısının bir fonksiyonu olarak  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarının manyetik momentlerinin değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'e göre,  $\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$  nanoalaşımının manyetik momentleri  $9.34 \mu_B$ 'dir. Bu sonuç,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları içinde en zayıf manyetik momente sahip nanoalaşımın  $\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$  olduğunu göstermektedir.  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında en zayıf ferromanyetik özelliklere sahip Ni atomu ile en kuvvetli ferromanyetik özelliklere sahip olan Fe atomunun yer değiştirmesiyle manyetik momentin Fe atomu sayısı ile lineer olarak arttığı görülmektedir (Billas *et al.* 1994). Bu lineer manyetik davranış Fe bakımından zayıf olan nanoalaşımlarda daha yavaşken, Fe bakımından zengin olan nanoalaşımlarda çok daha hızlıdır.  $\text{Co}_1\text{Fe}_{12}$  nanoalaşımının manyetik momentleri  $43.79 \mu_B$ 'dir. Genel olarak,  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için Fe sayısının nanoalaşımın manyetik davranışını etkilediği görülmüştür.

Ag atomlarının sayısının bir fonksiyonu olarak  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarının manyetik momentlerinin değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'a göre,  $\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$  nanoalaşımının manyetik momentleri  $9.34 \mu_B$ 'dir. Bu sonuç,  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları içinde en kuvvetli manyetik momente sahip nanoalaşımın  $\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$  olduğunu göstermektedir.  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında en zayıf ferromanyetik özelliklere sahip Ni atomu ile ferromanyetik olmayan Ag atomunun yer değiştirmesiyle manyetik momentin Ag atomu sayısı ile genel olarak bir azalma eğilimine sahip olduğu görülmektedir.  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için Ag sayısı ile manyetik momentleri artışı gösteren tek nanoalaşım  $\text{Co}_1\text{Ag}_{11}\text{Ni}_1$ 'dir. Şekil 2

incelendiğinde Co atomunun,  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarındaki Co atomunun genel davranışının aksine yüzeye yerleştiği görülmektedir. Bu sonuç, Co atomu yüzeye yerleştiğinde daha fazla manyetik momente sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir.  $\text{Co}_1\text{Ag}_{12}$  nanoalaşımının manyetik momentleri  $2.94 \mu_B$ 'dir. Genel olarak,  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımları için Ag sayısının nanoalaşımın manyetik davranışını etkilediği görülmüştür.



**Şekil 5**  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının  $\mu_B$  cinsinden toplam manyetik momentlerinin Fe sayısına göre değişimi.



**Şekil 6**  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının  $\mu_B$  cinsinden toplam manyetik momentlerinin Ag sayısına göre değişimi.

$\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $\text{Co}_1\text{Ag}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımlarının manyetik davranışlarını daha detaylı açıklamak için tekli, ikili ve üçlü nanokümelere Co, Fe, Ag ve Ni atomlarının lokal manyetik momentleri ve lokal yük dağılımları da incelenmiştir. Tekli, ikili ve üçlü nanokümelere lokal manyetik momentleri ve lokal yük dağılımları sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8' de, toplam manyetik momentleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2'de  $\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımını oluşturan Co, Fe ve Ni atomlarından oluşmuş tekli, ikili ve üçlü nanokümelere sahip olduğu toplam manyetik momentler verilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde, Fe atomu en kuvvetli ferromanyetik olmasına rağmen, en yüksek manyetik momente ( $43.79 \mu_B$ ) sahip nanokümenin,  $\text{Fe}_{13}$  nanoparçacığı değil,  $\text{Co}_1\text{Fe}_{12}$  ikili nanoalaşımı olduğu görülmüştür. En düşük manyetik momente ( $8.45 \mu_B$ ) sahip nanoküme ise, en zayıf ferromanyetik Ni atomlarından oluşan  $\text{Ni}_{13}$  nanoparçacığıdır.

**Çizelge 2.** Co, Fe, Ag ve Ni atomlarının tekli, ikili ve üçlü nanokümelere sahip olduğu toplam manyetik momentleri.

Nanoalaşım/Nanoparçacık	Manyetik Moment ( $\mu_B$ )
$\text{Co}_{13}$	28.80
$\text{Fe}_{13}$	42.30
$\text{Ag}_{13}$	3.57
$\text{Ni}_{13}$	8.45
$\text{Co}_1\text{Ni}_{12}$	9.34
$\text{Co}_1\text{Fe}_{12}$	43.79
$\text{Co}_1\text{Ag}_{12}$	2.94
$\text{Fe}_1\text{Ni}_{12}$	10.32
$\text{Ni}_1\text{Ag}_{12}$	3.38
$\text{Co}_1\text{Fe}_6\text{Ni}_6$	25.36
$\text{Co}_1\text{Ag}_6\text{Ni}_6$	3.57

$\text{Co}_1\text{Fe}_n\text{Ni}_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımını oluşturan atomların tekli, ikili ve üçlü nanokümelere sahip olduğu lokal manyetik momentleri ve lokal yük dağılımları Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7a incelendiğinde Co atomunun yüzeydeki atom başına manyetik momentinin ( $1.96 \mu_B$ ) merkezdeki atom başına manyetik momentinden ( $1.89 \mu_B$ ) fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç yukarıda vurguladığımız Co atomu yüzeye yerleştiğinde daha fazla manyetik momente sahip olur yorumunu doğrulamaktadır. Şekil 7a, 7b ve 7c incelendiğinde yüzeydeki atomların merkezdeki atomlardan daha fazla manyetik momente sahip olduğu görülmektedir. Yüzeye yerleşen Ni atomları ( $0.76 \mu_B$ ) ve Co atomlarının ( $1.96 \mu_B$ ) atom başına sahip olduğu manyetik moment aynı iken, Fe atomlarının atom başına sahip olduğu manyetik moment  $2.87 \mu_B$  ve  $2.99 \mu_B$  arasında değişmektedir.  $\text{Fe}_{13}$  nanoparçacığında merkeze simetrik olarak yerleşen atomlar aynı manyetik momente sahiptir. Şekil 7d, 7e ve 7g incelendiğinde Ni atomlarının yüzeydeki lokal manyetik momentlerinin, Ni atomlarının Fe atomları ile yer değiştirmesinden etkilendiği görülmektedir. Ayrıca,  $\text{Co}_1\text{Fe}_{12}$  ikili nanoalaşımında yüzeydeki farklı konumlardaki Fe atomları aynı

manyetik momente ( $3.05 \mu_B$ ) sahiptir. Şekil 7d ve 7g incelendiğinde,  $Co_1Ni_{12}$  nanoalaşımında merkezdeki Co atomunun lokal yükü  $15.58'$ dir.  $Co_1Fe_6Ni_6$  nanoalaşımında ise merkezdeki Co atomunun lokal yükü  $15.52'$ dir.  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında Fe atomu katkısının merkezdeki Co atomunun lokal yükünü çok az da olsa azalttığı görülmüştür.

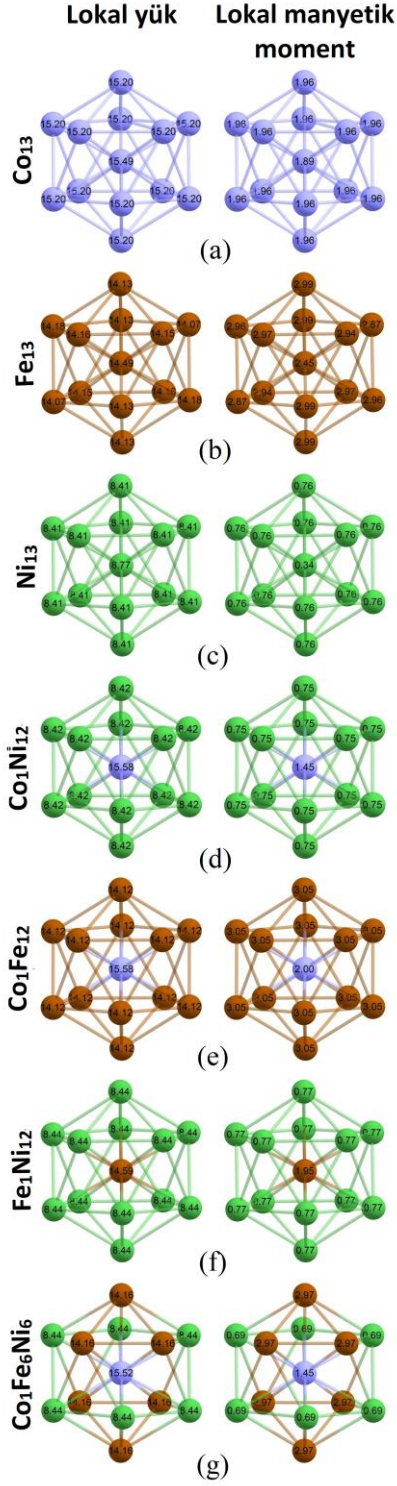
Çizelge 2'de  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımını oluşturan Co, Ag ve Ni atomlarından oluşmuş tekli, ikili ve üçlü nanokümlerin sahip olduğu toplam manyetik momentleri de verilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde, en yüksek manyetik momente ( $28.80 \mu_B$ ) sahip nanoalaşım bu kompozisyon sistemindeki en iyi ferromanyetik olan Co atomlarından oluşan  $Co_{13}$  nanoparçacığdır. En düşük manyetik momente ( $2.94 \mu_B$ ) sahip nanoalaşım ise ferromanyetik olmayan Ag atomlarından oluşan  $Ag_{13}$  nanoparçacığı değil, ferromanyetik Co atomu katkılı  $Co_1Ag_{12}$  nanoalaşımı olduğu görülmüştür.  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımını oluşturan atomların tekli, ikili ve üçlü nanokümlerinin lokal manyetik momentleri ve lokal yük dağılımları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8a, 8b ve 8c incelendiğinde ferromanyetik Co ve Ni atomlarından oluşan  $Co_{13}$  ve  $Ni_{13}$  nanoparçacıklarında yüzeydeki atomların merkezdeki atomlardan daha fazla manyetik momente sahip olduğu görülmektedir. Ferromanyetik olmayan Ag atomlarından oluşan  $Ag_{13}$  nanoparçacığında ise yüzeydeki ve merkezdeki Ag atomlarının manyetik momenti ( $0.06 \mu_B$ ) eşittir. Şekil 8e ve 8f'deki  $Co_1Ag_{12}$  ve  $Ni_1Ag_{12}$  nanoalaşımaları incelendiğinde, Ni atomu Co atomundan daha zayıf ferromanyetik olmasına rağmen,  $Ni_1Ag_{12}$  nanoalaşımında yüzeydeki Ag atomlarının lokal manyetik momentlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 8d ve 8g incelendiğinde Ni atomlarının yüzeydeki lokal manyetik momentlerinin, Ni atomlarının Ag atomları ile yer değiştirmesinden etkilendiği görülmektedir. Ek olarak ferromanyetik olmayan Ag atomlarının toplam manyetik momente katkısının negatif olduğu tek nanoalaşım  $Co_1Ag_6Ni_6$  nanoalaşımıdır.  $Co_1Ni_{12}$  nanoalaşımında merkezdeki Co atomunun lokal yükü  $15.58'$ dir.  $Co_1Ag_6Ni_6$  nanoalaşımında ise

merkezdeki Co atomunun lokal yükü ise  $15.42'$ dir.  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında Ag atomu katkısının merkezdeki Co atomunun lokal yükünü azalttığı görülmüştür.

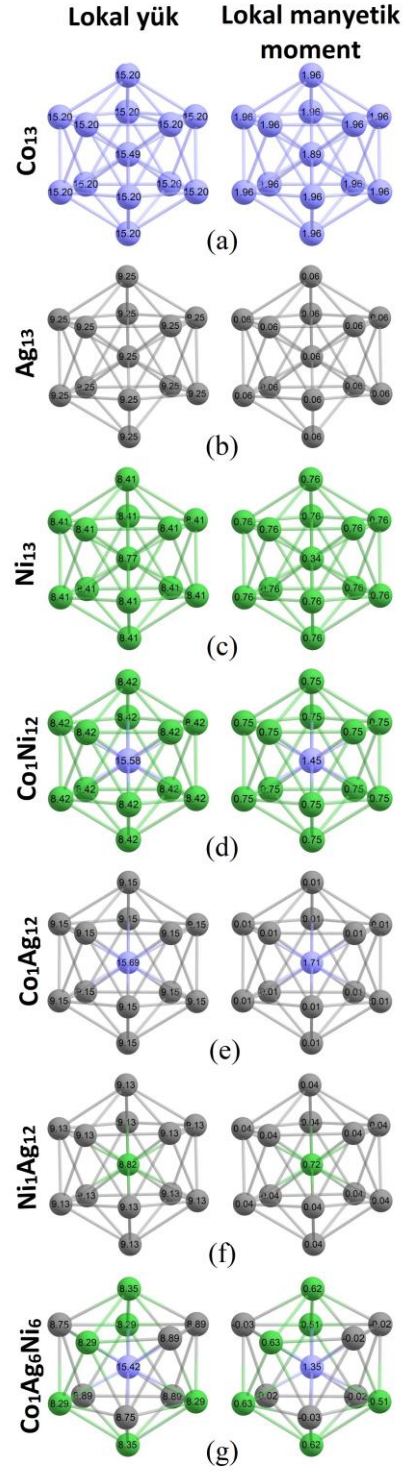
#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, 13 atomdan oluşan  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) üçlü nanoalaşımalarının yapısal, enerjik ve manyetik özellikleri Gupta ve DFT düzeylerindeki hesaplamalar ile teorik olarak incelenmiştir. Gupta düzeyinde, Co atomlarının her iki kompozisyon sisteminde de nanoalaşımaların merkezine yerleşmeyi tercih ettiği görülmüştür. Fe, Ag ve Ni atomları ise nanoalaşımaların yüzeyine yerleşmeyi tercih etmektedirler. Gupta düzeyindeki karışma enerjisi analizine göre  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarının en kararlı kompozisyonu sırasıyla  $Co_1Fe_6Ni_6$  ve  $Co_1Ag_6Ni_6$  olarak elde edilmiştir. Her iki kompozisyon sisteminde de Gupta ve DFT düzeylerinin enerjik olarak birbiri ile uyumsuz olduğu görülmüştür. Nanoalaşımalar, Gupta düzeyinde enerjik olarak karışıma uygunken, DFT düzeyinde karışıma uygun değildirler.  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında manyetik moment, ferromanyetik Fe atomu katkısı ile lineer olarak artarken,  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında ferromanyetik olmayan Ag atomu katkısıyla genellikle lineer olarak azalmaktadır. Tekli, ikili ve üçlü nanokümlerin toplam manyetik momentlerinin ilginç davranışlar sergilediği görülmektedir. Örneğin, tamamen ferromanyetik olmayan atomdan oluşan  $Ag_{13}$  nanoparçacığının, ferromanyetik Co ve Ni atomu katkılı  $Co_1Ag_{12}$  ve  $Ni_1Ag_{12}$  ikili nanoalaşımalarından daha yüksek manyetik momente sahip olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, nanoalaşımın yüzeyine yerleşmiş Co atomlarının lokal manyetik momenti, nanoalaşımın merkezine yerleşmiş Co atomunun lokal manyetik momentinden daha fazladır.  $Co_{13}$ ,  $Fe_{13}$  ve  $Ni_{13}$  nanoparçacıklarında yüzeye yerleşen atomların merkeze yerleşen atomlardan daha fazla manyetik momente sahip olduğu görülmüştür.  $Co_1Fe_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) ve  $Co_1Ag_nNi_{12-n}$  ( $n=0-12$ ) nanoalaşımalarında Fe ve Ag atomu katkısının nanoalaşımın merkezine yerleşen Co atomunun lokal yükünü azalttığı elde edilmiştir.





**Şekil 7** (a) Co<sub>13</sub>, (b) Fe<sub>13</sub>, (c) Ni<sub>13</sub> (d) Co<sub>1</sub>Ni<sub>12</sub>, (e) Co<sub>1</sub>Fe<sub>12</sub>, (f) Fe<sub>1</sub>Ni<sub>12</sub> ve (g) Co<sub>1</sub>Fe<sub>6</sub>Ni<sub>6</sub> nanokümelerin lokal manyetik momentleri ve lokal yükleri.



**Şekil 8** (a) Co<sub>13</sub>, (b) Ag<sub>13</sub>, (c) Ni<sub>13</sub>, (d) Co<sub>1</sub>Ni<sub>12</sub>, (e) Co<sub>1</sub>Ag<sub>12</sub>, (f) Ni<sub>1</sub>Ag<sub>12</sub> ve (g) Co<sub>1</sub>Ag<sub>6</sub>Ni<sub>6</sub> nanokümelerin lokal manyetik momentleri ve lokal yükleri.

## Teşekkür

Bu çalışmada gerçekleştirilen lokal optimizasyonlar Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenen bilgisayar olanakları kullanarak yapılmıştır (Proje no: 2016-22794455-01, 2016-22794455-02). DFT hesaplamaları ise, TÜBİTAK-ULAKBİM TRUBA kaynaklarında gerçekleştirilmiştir.

## 5. Kaynaklar

Abhandlung, G., 2013. Structural and electronic properties of transition metal nanoalloys and magnetic compounds, Doktora Tezi, Universitat Bayreuth,119.

Annalakshmi, M., Balasubramanian, P., Chen, S. and Chen, T., 2019. One pot synthesis of nanospheres-like trimetallic NiFeCo nanoalloy: A superior electrocatalyst for electrochemical sensing of hydrazine in water bodies. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, **296**, 126620.

Bates, M.K., Jia, Q., Doan, H., Liang, W. and Mukerjee, S., 2016. Charge-Transfer Effects in Ni-Fe-Co Mixed-Metal-Oxides for the Alkaline Oxygen Evolution Reaction. *ACS Catalysis*, **6(1)**, 155–161.

Billas, I.M.L., Chatelain, A. and De Heer, W.A., 1994. Magnetism from the Atom to the Bulk in Iron, Cobalt, and Nickel Clusters. *Science*, **265(5179)**, 1682-1684.

Binns, C., 2014. Nanomagnetism: Fundamentals and Applications. Richard E. Palmer (Series Editör), *Elsevier*, 1-32.

Bochicchio, D. and Ferrando, R., 2013. Morphological instability of core-shell metallic nanoparticles. *Physical Review B*, **87**, 165435.

Boroujeni, K.P., Shahrokh, M., Karvani, J., Moradi, N., Farokhnia, A. and Mobini, M., 2019. Synthesis and Study of Catalytic, Anti-Bacterial, Anti-Oxidant, and DNA Cleavage Properties of Ag-Co and Ag-Ni Magnetic Nanoparticles. *Acta Chimica Slovenica*, **66(3)**, 542-551.

Bouzit, F.Z., Nemamcha, A., Moumeni, H. and Rehspringer J.L., 2017. Morphology and Rietveld analysis of nanostructured Co-Ni electrodeposited thin films obtained at different current densities. *Surface and Coatings Technology*, **315**, 172-180.

Calvo, F., 2013. Nanoalloys From Fundamentals to Emergent Applications. *Elsevier*, 1-405.

Çelik, Ö. and Fırat, T., 2018. Synthesis of FeCo Magnetic Nanoalloys and Investigation of Heating Properties for Magnetic Fluid Hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **456**, 11-16.

Ebrahimi, F., Sajjadi, S.A. and Babakhani, A., 2019. On the role of structural variables in magnetic properties of  $\text{Co}_{(1-x)}\text{Ni}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanoferrites. *Ceramics International*, **45**, 20921–20928.

El-Gendy, A.A., 2018. Core/Shell Magnetic Nanoparticles for Biomedical Applications. *Elsevier*, 41–58.

Fernandez, E.M. and Balbas, L.C., 2005. Structural Properties Of Bimetallic Clusters From Density Functional Calculations. *International Journal Of Modern Physics B*, **19**, 2339-2344.

Ferrando, R., 2016. Structure and properties of nanoalloys. Richard E. Palmer (Series Editör), *Elsevier*, 1-327.

Fu, G., Chen, Y., Cui, Z., Li, Y., Zhou, W., Xin, S., Tang, Y. and Goodenough, J. B., 2016. A Novel Hydrogel-derived Bifunctional Oxygen Electrocatalyst for Rechargeable Air Cathodes. *Nano Letters*, **16(10)**, 6516–6522.

Giannozzi, P., Baroni, S., Bonini, N., Calandra, M., Car, R., Cavazzoni, C., Ceresoli, D., Chiarotti, G.L., Cococcioni, M., Dabo, I., Dal Corso, A., De Gironcoli, S., Fabris, S., Fratesi, G., Gebauer, R., Gerstmann, U., Gougoussis, C., Kokalj, A., Lazzeri, M., Martin-Samos, L., Marzari, N., Mauri, F., Mazzarello, R., Paolini, S., Pasquarello, A., Paulatto, L., Sbraccia, C., Scandolo, S., Sclauzero, G., Seitsonen, A.P., Smogunov, A., Umari, P. and Wentzcovitch, R.M., 2009. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *Journal of Physics:Condensed Matter*, **21(39)**, 395502.

Giannozzi, P., Andreussi, O., Brumme, T., Bunau, O., Nardelli, M.B., Calandra, M., Car, R., Cavazzoni, C., Ceresoli, D., Cococcioni, M., Colonna, N., Carnimeo, I., Dal Corso, A., De Gironcoli, S., Delugas, P., DiStasio Jr, R.A., Ferretti, A., Floris, A., Fratesi, G., Fugallo, G., Gebauer, R., Gerstmann, U., Giustino, F., Gorni, T., Jia, J., Kawamura, M., Ko, H., Kokalj, A., Küçükbenli, E., Lazzeri M., Marsili, M., Marzari, N., Mauri, F., Nguyen,

- N.L., Nguyen, H., De La Roza, A., Paulatto, L., Ponce, S., Rocca, D., Sabatini, R., Santra, B., Schlipf, M., Seitsonen, A.P., Smogunov, A., Timrov, I., Thonhauser, T., Umari, P., Vast, N., Wu, X. and Baroni, S., 2017. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO. *Journal of Physics:Condensed Matter*, **29(46)**, 465901.
- Klencsar, Z., Nemeth, P., Sandor, Z., Horvath, T., Sajo, I.E., Meszaros, S., Mantilla, J., Coaquira, J.A.H., Garg, V.K., Kuzmann, E. and Tolnai, G., 2016. Structure and magnetism of Fe-Co alloy nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, **674**, 153-161.
- Kuntová, Z., Rossi, G. and Ferrando, R., 2008. Melting of core-shell Ag-Ni and Ag-Co nanoclusters studied via molecular dynamics simulations. *Physical Review B*, **77**, 205431.
- Nam, G., Son, Y., Park, S.O., Jeon, W.C., Jang, H., Park, J., Chae, S., Yoo, Y., Ryu, J., Kim, M.G., Kwak, S.K. and Cho, J., 2018. A Ternary Ni<sub>46</sub>Co<sub>40</sub>Fe<sub>14</sub> Nanoalloy-Based Oxygen Electrocatalyst for Highly Efficient Rechargeable Zinc–Air Batteries. *Advanced Materials*, **30(46)**, 1803372.
- Panday, S., Jeevanandam P. and Daniel, B.S.S., 2013. Synthesis and magnetic properties of nanocrystalline Co-Ni alloys:A review. *Materials Science Forum*, **736**, 229-240.
- Perdew, J.P., Burke, K. and Ernzerhof, M., 1996. Generalized gradient approximation made simple. *Physical Review Letters*, **77(18)**, 3865-3868.
- Salati, A., Ramazani, A. and Kashi, M.A., 2020. Tuning hyperthermia properties of FeNiCo ternary alloy nanoparticles by morphological and magnetic characteristics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **498**, 166172.
- Sun, C., Lee, J.S.H. and Zhang, M., 2008. Magnetic nanoparticles in MR imaging and drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **60**, 1252–1265.
- Taran, S., Garip, A.K. and Arslan, H., 2016. Theoretical study of the structures and chemical ordering of CoPd nanoalloys supported on MgO(001). *International Journal of Modern Physics C*, **27(11)**, 1650146.
- Taran, S., 2019. 13 atomlu Cu-Au-Pt üçlü metal nanoalaşımların yapısal özellikleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **7**, 1204-1216.
- Taran, S., Garip, A.K. and Arslan, H., 2020a. A theoretical study on chemical ordering of 38-atom trimetallic Pd-Ag-Pt nanoalloys. *Chinese Physics B*, **29(7)**, 077801.
- Taran, S. and Arslan, H., 2020. Stability and magnetic behaviour of 19-,23-and 26-atom trimetallic Pt-Ni-Ag nanoalloys. *Molecular Physics*, **118(23)**, e1818859.
- Taran, S., Garip, A.K. and Arslan, H., 2020b. Investigation of the chemical ordering and structural properties of the trimetallic (PtNi)@Ag nanoalloys. *Journal of Cluster Science*, **32**, 199-208.
- Theofanidis, S.A., Galvita, V.V., Konstantopoulos, C., Poelman H. and Marin, G.B., 2018. Fe-Based Nano-Materials in Catalysis. *Materials*, **11(5)**, 831.
- Toparli, Ç., Ebin, B. and Gürmen, S., 2017. Synthesis, structural and magnetic characterization of soft magnetic nanocrystalline ternary FeNiCo particles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **423**, 133–139.
- Vanderbilt, D., 1990. Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism. *Physical Review B*, **41(11)**, 7892-7895.
- Varas, A., Aguilera-Granja, F., Rogan, J. and Kiwi, M., 2015. Structural, electronic, and magnetic properties of Fe<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Ni<sub>z</sub> (x+y+z=13) clusters: A density-functional-theory study. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **394**, 325–334.
- Wales, D.J. and Doye, J.P.K., 1997. Global optimization by basin-hopping and the lowest energy structures of lennard-jones clusters containing up to 110 Atoms. *The Journal of Physical Chemistry A*, **101(28)**, 5111-5116.
- Yang, Y., Lin, Z., Gao, S., Su, J., Lun, Z., Xia, G., Chen, J., Zhang, R. and Chen, Q., 2017. Tuning electronic structures of non-precious ternary alloys encapsulated in graphene layers for optimizing overall water splitting activity. *ACS Catalysis*, **7(1)**, 469–479.
- Yıldırım, H. ve Arslan, H., 2019. CuAgAu üçlü nanoalaşımların optimizasyonu ve erime dinamiği.

*Balkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*,  
**21(1)**, 336-351.

Yıldırım, H. and Arslan, H., 2020. Size and composition effect on structural properties and melting behaviors of Cu-Ag-Au ternary nanoalloys. *International Journal of Modern Physics C*, **31(6)**, 2050078.

Zeng, L., Cui, X., Chen, L., Ye, T., Huang, W., Ma, R., Zhang, X. and Shi, J., 2017. Non-noble bimetallic alloy encased in nitrogen-doped nanotubes as a highly active and durable electrocatalyst for oxygen reduction reaction. *Carbon*, **114**, 347-355.



## C Vitamininin Karbonik Anhidraz İzoenzimleri (hCA I ve II) Üzerine Etkisi

Yağmur HOŞGÖR<sup>1</sup>, Ekrem TUNCA<sup>1\*</sup>, Metin BÜLBÜL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü, Kütahya, Türkiye

Sorumlu yazar e-posta: ekrem.tunca@dpu.edu.tr  
e-posta: yağmur.hosgor@hotmail.com  
metin.bulbul@dpu.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7556-8379>  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8396-4272>  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-4722-447X>

Geliş Tarihi: 03.03.2021

Kabul Tarihi: 25.09.2021

### Öz

#### Anahtar kelimeler

C vitamini; Karbonik anhidraz; İnhibisyon; Glokom

Metabolik faaliyetlerin sorunsuz bir şekilde yerine getirilmesinde vitaminlerin önemi son derece büyüktür. Suda çözünen bir vitamin olan C vitamini, antioksidan özellik gösterir, nörotransmisyon ve kolajen sentezi gibi pek çok biyolojik süreçte rol alır. Karbonik anhidraz (CA) izoenzimleri ise elektrolit salınımı, pH dengesi, iyon taşınımı ve bunlarla ilişkili birçok süreçte rol alır. Çalışmamızda, C vitamininin, insan eritrositlerinden saflaştırılan hCA I ve hCA II üzerindeki inhibisyon etkileri *in vitro* olarak incelenmiştir. L-Askorbik asidin hCA I ve hCA II izoenzimlerini yarısız inhibisyon mekanizması üzerinden inhibe ettiği,  $K_i$  değerinin sırasıyla  $96.80 \pm 11.19 \mu\text{M}$  ve  $120.46 \pm 22.11 \mu\text{M}$  olduğu belirlenmiştir.

## The Effect of Vitamin C on Carbonic Anhydrase Isoenzymes (hCA I and II)

### Abstract

#### Keywords

Vitamin C; Carbonic anhydrase; Inhibition; Glaucoma

Vitamins play an extremely important role in the smooth functioning of metabolic activities. Vitamin C, which is one of the water-soluble vitamins, has antioxidant properties and plays a role in many biological processes such as neurotransmission and collagen synthesis. Carbonic anhydrase (CA) enzymes play a role in electrolyte release, pH balance, ion transport and many related processes. In our study, the inhibition effects of vitamin C, on hCA I and hCA II purified from human erythrocytes were investigated as *in vitro*. It was determined that L-Ascorbic acid inhibits hCA I and hCA II isoenzymes through its non-competitive inhibition mechanism, and its  $K_i$  value was  $96.80 \pm 11.19 \mu\text{M}$  and  $120.46 \pm 22.11 \mu\text{M}$ , respectively.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

C vitamini (L-Askorbik asit), birçok hayvanın böbrek veya karaciğerinde glukozdan sentezlenen altı karbonlu bir ketolaktondur (Marik 2020). Bununla birlikte, insanlar, diğer primatlar, kobaylar ve meyve yarasaları, C vitamini sentezinin son aşamasını katalize etmekten sorumlu enzim olan L-gulonolakton oksidaz (GULO) enzimini kodlayan gende inaktive edici bir mutasyon barındırdıklarından, C vitamini sentezleyemezler (Marik 2020). Bu nedenle insanlar diyetle C vitamini almalıdırlar. Plazmada C vitamini konsantrasyonu olan  $30-80 \mu\text{M}$ , meyve ve sebzelerden oluşan dengeli bir diyet ile günlük ihtiyaç olan  $75-80 \text{ mg}$  C vitamini

alımından rahatlıkla sağlanabilir (Padayatty and Levine 2016).

C vitamini genellikle, kollajen sentezi ve skorbüt hastalığının önlenmesi için gerekli bir mikrobese olarak kabul edilir. Bununla birlikte C vitamini, bir antioksidan olarak önemli bir rol oynar, çok sayıda biyolojik reaksiyonda, nörotransmisyon ve nöromodülasyonda kritik bir rol üstlenir. C vitamininin, bakteri ölümünü artırarak, konağı oksidan yaralanmadan koruyarak, mitokondriyal ve metabolik fonksiyonu koruyarak, inflamatuvar yanıtı modüle ederek ve organ hasarını sınırlandırarak konak savunmasında önemli rolleri olduğu rapor edilmiştir (Marik 2020, 2018, Moskowitz *et al.* 2018). Son zamanlarda, damar yolu ile askorbik asit

uygulanmasının, kanserli hastalarda olumlu sonuçlar verdiğini gösteren Faz I ve Faz II testlerinin sonuçları yayınlanmıştır. Bu durum C vitamininin önemini bir kat daha artırmaktadır (Ngo *et al.* 2019). Bünyesinde Zn<sup>2+</sup> iyonu bulunduran bir enzim olan karbonik anhidraz (CA, EC 4.2.1.1), karbon dioksitin (CO<sub>2</sub>) hidrasyonu ve bikarbonatın (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) dehidrasyonu reaksiyonlarını katalizler (Mert vd. 2019, Tunca vd. 2020). CA'lar elektrolit salınımı, pH regülasyonu, kemik resorpsiyonu, kalsifikasyon, CO<sub>2</sub> ve çeşitli iyonların transportu, solunum, glukoneogenez, lipogenez, tümör oluşumu çeşitli patojenlerin gelişimi ve virülansı gibi fizyolojik ve patolojik olaylarda görev alırlar (Supuran 2008, Supuran 2016, Alterio *et al.* 2012). Bu süreçlerde yer alan CA izoenzimlerinin birçoğu, ödem (Carta and Supuran 2013), glokom (Masini *et al.* 2013), obezite (Scozzafava *et al.* 2013), kanser (Nocentini and Supuran 2018), epilepsi (Aggarwal *et al.* 2013), vertigo (Sluch vd. 2017) ve osteoporoz (Carradori *et al.* 2015) gibi bir dizi rahatsızlığı tedavi etmek için inhibe olma potansiyeli olan önemli terapötik hedeflerdir. CA inhibitörlerinin, protozoa, mantar ve bakterilerin neden olduğu enfeksiyonlarla mücadelede potansiyel kullanımı da araştırılmaktadır (Supuran 2008).

CA inhibitörleri çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanılmaktadır. CA I ve CA II inhibitörleri olan asetazolamit (AAZ) ve brinzolamit (BRZ) glokom tedavisinde, topiramet epilepsi tedavisinde, AAZ ve metazolamit (MTZ) diüretik ilaçlar olarak kullanılmaktadırlar (Alım *et al.* 2015). Sistemik olarak kullanılan bu ilaçların (AAZ ve MTZ) uyuşukluk, el ve ayak parmaklarında karıncalanma, tat almada bozukluk, bulanık görme ve böbrek taşı oluşumu gibi yan etkileri vardır (Kasımoğulları *et al.* 2010). Yan etkisi daha az olabilecek yeni sentetik bileşiklerin ve doğal kaynaklı bileşiklerin CA üzerine etkileri çeşitli araştırma grupları tarafından incelenmiştir (Balaydın *et al.* 2012, Göçer *et al.* 2016, Arabacı *et al.* 2014).

Bu çalışmada günlük ihtiyacımız olan C vitamininin, kimyasal formu olan L-Askorbik asidin insan eritrositlerinden saflaştırılan hCA I ve hCA II izoenzimleri üzerindeki etkisi *in vitro* olarak incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan L-askorbik asit ve tüm kimyasallar Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Hemolizatin hücre membranlarından ayrımı soğutmalı santirfüj (SIGMA 3K30) ile sağlanmıştır. Afinite saflaştırması peristaltik pompa (ISMATEC REGLO Digital MS-2/6) ile gerçekleştirilmiştir. İnhibitörlü ve inhibitörsüz ortamdaki enzim aktivite çalışmaları UV-Visible spektrofotometre (SHIMADZU UV1700 PharmaSpec) kullanılarak yapılmıştır.

### 2.2 CA izoenzimlerinin saflaştırılması

Antikoagülanlı tüplere alınan kan örnekleri 1500 rpm devirde 20 dk. santrifüjlenerek plazma ayrıldı. Eritrositler izotonik çözelti (%0.9 NaCl) ile birkaç kez yıkandı ve buzlu su ile (1:1.5) hemoliz edildi. Hemolizat, karışımın 4 °C sıcaklıkta, 20000 rpm devirde 30 dk. süreyle santrifüj edilmesi suretiyle ayrıldı. Hemolizatin pH'ı katı TRIS (tris(hidroksimetil)aminometan) kullanılarak 8.7 değerine ayarlandı ve 25.0 mM TRIS-HCl/100 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 8.7) çözeltisi ile dengelenmiş afinite kolonuna (Sepharose® 4B-L-tirozin-*p*-aminobenzensülfonamit) yüklendi. 25.0 mM TRIS-HCl/22.0 mM Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 8.7) çözeltisi ile yapılan yıkama işlemi takiben, hCA I izoenzimi 1000 mM NaCl/25.0 mM Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 6.3) çözeltisi ile, hCA II izoenzimi ise 100 mM NaCH<sub>3</sub>COO/500 mM NaClO<sub>4</sub> (pH 5.6) çözeltisi ile afinite kolonundan elüe edildi (Rickli *et al.* 1964). Saflaştırılan izoenzimlerde protein miktarı belirlendi (Bradford 1976) ve SDS-PAGE analizi yapıldı (Laemmli 1970).

### 2.3 CA enzim aktivitesi ölçümü

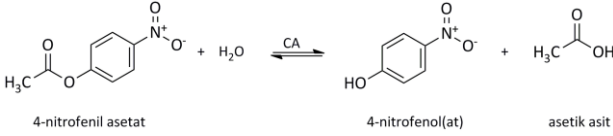
hCA I ve hCA II' nin CO<sub>2</sub> hidrataz aktivitesi pH-stat yöntemi ile belirlendi. Bu yöntemin prensibi, CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O reaksiyonu sonucu açığa çıkan H<sup>+</sup> iyonu nedeniyle, pH' ın 8.15 den 6.15 e düşmesi için geçen sürenin pH metre ve kronometre kullanılarak belirlenmesidir (Şekil 1) (Wilbur and Anderson 1948, Maren 1960).



**Şekil 1.** Karbonik anhidraz enziminin hidrataz aktivitesi reaksiyonu.

Enzim ünitesi ise,  $((t_0 - t_c) / t_c)$  eşitliği kullanılarak hesaplandı. Burada  $t_0$  enzimsiz CO<sub>2</sub> hidrasyon süresi,  $t_c$  ise enzim varlığındaki CO<sub>2</sub> hidrasyon süresidir.

Esteraz aktivitesi ise, substrat olarak kullanılan 4-nitrofenilasetat bileşiğinin, CA katalizörlüğünde, 4-nitrofenol(at) bileşiğine hidrolizi esnasında absorbans değerinde meydana gelen değişimin 348 nm de ölçülmesi ile belirlenmiştir. Ölçümlerde 25 °C sıcaklık, 3 dakikalık süre esas alınmıştır (Şekil 2) (Verpoorte *et al.* 1967).



Şekil 2. Esteraz aktivitesi reaksiyonu.

### 2.4 L-Askorbik asidin IC<sub>50</sub> değerinin ve K<sub>i</sub> sabitinin belirlenmesi

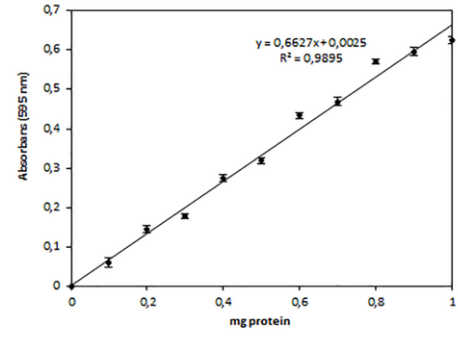
IC<sub>50</sub> değerini belirlemek için, hCA I ve hCA II izoenzimlerinin hidrataz ve esteraz aktiviteleri, farklı L-Askorbik asit konsantrasyonlarında, "Bölüm 2.3" de tarif edildiği şekilde ölçüldü. İnhibitörsüz ortamdaki ölçümlerde enzim aktivitesi %100 kabul edildi, %Aktivite-[L-Askorbik asit] eğrisi çizildi ve eğri denklemleri yardımıyla bileşiklerin IC<sub>50</sub> değerleri belirlendi (İlkimen *et al.* 2015).

İnhibisyon sabiti (K<sub>i</sub>), izoenzimlerin esteraz aktivitesi esas alınarak belirlendi. K<sub>i</sub> değerlerinin belirlenmesi için, enzimli reaksiyon hızını %30, %50 ve %70 oranında azaltan üç farklı L-Askorbik asit konsantrasyonu seçildi ve her bir L-Askorbik asit konsantrasyonu için beş farklı substrat konsantrasyonunda (0.3, 0.4, 0.5, 0.6 ve 0.7 mM) CA enzim aktiviteleri ölçüldü. Aynı ölçümler inhibitörsüz ortamda da tekrarlandı ve Lineweaver-Burk eğrileri çizilerek K<sub>i</sub> sabiti belirlendi (Lineweaver and Burk 1934, Alkaya *et al.* 2018).

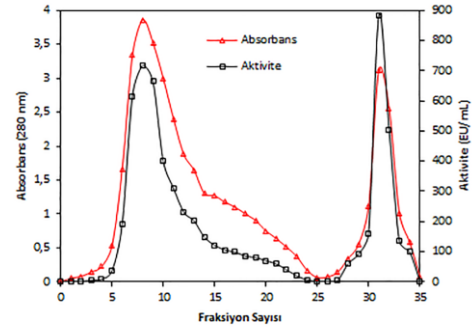
## 3. Bulgular

### 3.1 CA izoenzimlerinin saflaştırılması

hCA I ve hCA II, Sepharose®4B-L-tirozin-p-aminobenzensülfonamid kolonu kullanılarak saflaştırıldı. Elüatlarda kalitatif-kantitatif protein analizi, ve hidrataz aktivitesi ölçümü yapıldı (Şekil 3, Şekil 4).

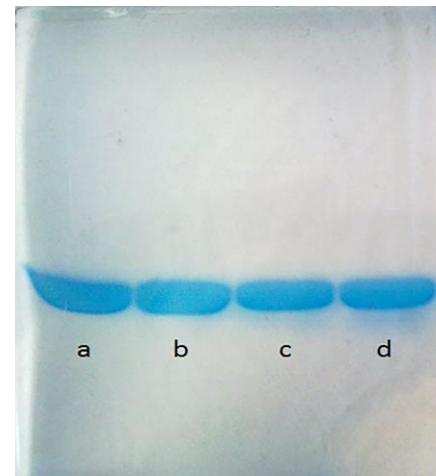


Şekil 3. Protein miktarı standart eğrisi.



Şekil 4. hCA I ve hCA II izoenzimlerinin fraksiyonlara göre absorbanslarındaki ve aktivitelerindeki değişim (1.-25. fraksiyonlar hCA I, 26.-35. fraksiyonlar hCA II)

hCA I izoenzimi, 2076.47 kat saflaştırılmış ve spesifik aktivitesi 1596.71 EU.mg protein<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. hCA II izoenzimi ise 4422.88 kat saflaştırılmış ve spesifik aktivitesi 3401.00 EU.mg protein<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. (Çizelge 1). Ayrıca elüatlarda SDS-PAGE analizi yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. SDS-PAGE analizi (a: Standart hCA I (30 kDa), b: Saflaştırılan hCA I, c: Standart hCA II (30 kDa)d: Saflaştırılan hCA II).

### 3.2 L-Askorbik asidin IC<sub>50</sub> değerinin ve K<sub>i</sub> sabitinin belirlenmesi

L-Askorbik asidin hidrataz ve esteraz IC<sub>50</sub> değerlerinin belirlenmesi için, öncelikle %1.0'lik stok çözeltisi hazırlandı. Daha sonra CA izoenzimlerinin hidrataz ve esteraz aktiviteleri, farklı konsantrasyonlardaki L-Askorbik asit varlığında

“Bölüm 2.3” de tarif edildiği şekilde ölçüldü. Her ölçüm üç kez tekrarlandı ve %Aktivite–[L-Askorbik asit] eğrileri çizilerek L-Askorbik için IC<sub>50</sub> değeri hesaplandı (Çizelge 2, Şekil 6 ve 7). L-Askorbik asidin esteraz K<sub>i</sub> sabitinin belirlenmesi için gerekli ölçümler “Bölüm 2.4” de açıklandığı şekilde yapıldı (Çizelge 2, Şekil 8 ve 9).

Çizelge 1. CA izoenzimlerinin saflaştırılmasına ilişkin veriler.

Saflaştırma Basamağı	Aktivite (EU/mL)	Toplam Hacim (mL)	Protein (mg/mL)	Toplam Protein (mg)	Toplam Aktivite (EU)	Spesifik Aktivite (EU/mg protein)	Verim (%)	Saflaştırma Katsayısı
Hemolizat	118.25	50.00	153.78	7689.00	5912.50	0.77	100.00	1.00
Afinite (hCAI)	718.52	5.00	0.45	2.25	3592.60	1596.71	60.76	2076.47
Afinite (hCAII)	884.26	5.00	0.26	1.30	4421.30	3401.00	74.78	4422.88

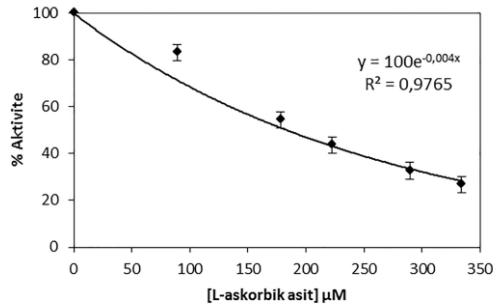
Çizelge 2. L-Askorbik asidin IC<sub>50</sub> değerleri ve K<sub>i</sub> sabitleri.

Bileşik	Hidrataz IC <sub>50</sub> (μM) ±SD <sup>a,b</sup>		Esteraz IC <sub>50</sub> (μM) ±SD <sup>a,b</sup>		K <sub>i</sub> (μM) ±SD <sup>a,b</sup>			
	hCA I	hCA II	hCA I	hCA II	hCA I	İnhibisyon Türü	hCA II	İnhibisyon Türü
AAZ <sup>c</sup>	0.39±0.008	0.20±0.005	0.42±0.004	0.31±0.008	0.26±0.003	Yarışmasız	0.14±0.005	Yarışmasız
L-Askorbik asit	-	-	192.50±33.34	211.75±33.34	96.80 ±11.19		120.46±22.11	

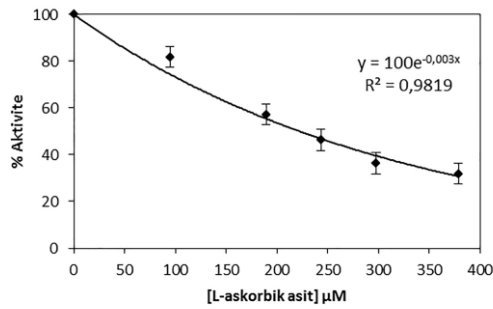
<sup>a</sup>Ortalama±standart sapma değeri (n=3).

<sup>b</sup>p<0.0001

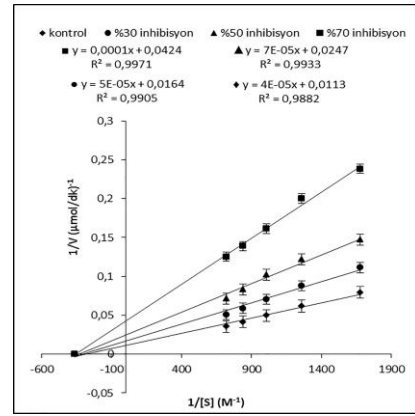
<sup>c</sup>Kontrol bileşiği olarak kullanılmıştır (Yenikaya et al. 2016)



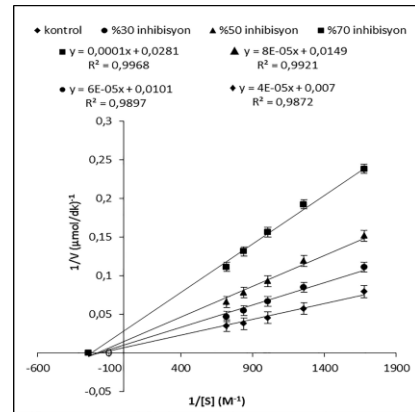
Şekil 6. L-Askorbik asidin hCA I esteraz aktivitesine etkisi.



Şekil 7. L-Askorbik asidin hCA II esteraz aktivitesine etkisi.



Şekil 8. hCA I K<sub>i</sub> sabiti için Lineweaver–Burk grafiği.



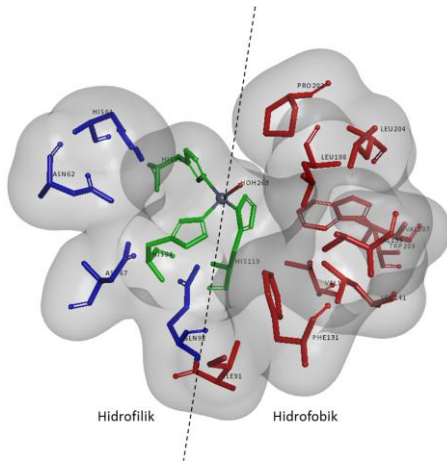
Şekil 9. hCA II K<sub>i</sub> sabiti için Lineweaver–Burk grafiği.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

CA'lar karbon dioksitin bikarbonat ve protona tersinir hidrasyonunu katalize ederek hücre içi ve hücre dışı CO<sub>2</sub>, H<sup>+</sup> ve HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> konsantrasyonlarını düzenler. İnsan CA'ları hava-su arayüzünde gaz değişimi (Henry 2000), CO<sub>2</sub> ve HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>'in membranlar arasında taşınması (Henry 1996), biyosentetik reaksiyonlar, asit-baz dengesi (Frasseto *et al.* 2012), kalsifikasyon (Supuran 2008), onkogenез ve metastatizasyon (Neri and Supuran 2011) gibi çok çeşitli fizyolojik ve patolojik süreçlerle ilişkilendirilmektedir.

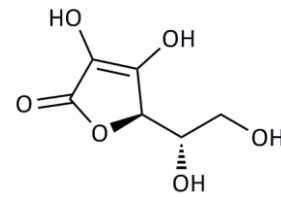
Bu araştırma kapsamında hCA I ve hCA II izoenzimleri, insan eritrosit hücrelerinden Sepharose®4B-L-tirozin-*p*-aminobenzen sülfonamid afinite jeli kullanılarak saflaştırılmıştır. hCA I %60,76 verim ile 2076.47 kat, hCA II ise %74,78 verim ile 4422.88 kat saflaştırılmıştır. Elüe edilen hCA I izoenziminin spesifik aktivitesi 1596.71 EU.mg protein<sup>-1</sup>, hCA II izoenziminin spesifik aktivitesi ise 3401.00 EU.mg protein<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır. Saflaştırılan enzimlerin SDS-PAGE analizleri standart, hCA I (30 kDa, Sigma-Aldrich) ve hCA II (30 kDa, Sigma-Aldrich) varlığında gerçekleştirildi. Şekil 5 de verilen analiz sonucu, hCA I ve hCA II izoenzimlerinin insan eritrositlerinden yüksek saflıkta izole edildiğini göstermektedir.

Memeli CA'larının koni şeklindeki aktif bölge yapısının bir kısmının hidrofobik, bir kısmının ise hidrofilik amino asitlerden oluşmuş olması, bu enzimlerin geniş bir bileşik sınıfı (sentetik ve doğal) ile etkileşime girebilmesini sağlamaktadır (Şekil 10).



Şekil 10.  $\alpha$ -CA izoenzimlerinin aktif bölge yapısı (PDB: 1CA2).

Sentetik CA inhibitörleri arasında sülfonamidler, sülfamatlar, sülfamitler, ditiyokarbamatlar, karboksilik asitler, fenoller, poliaminler ve sülfokumarinler sayılabilir (Alterio *et al.* 2012). Literatürde örnekleri bulunan doğal CA inhibitörlerine ise polifenoller (kafeik asit, ferulik asit, kuersetin, kurkumin, silmarin vb.), bromofenoller, spirobisnaftalin türevleri, kapsaisin ve izoflavon türevi bileşikler örnek verilebilir. Çalışmamızda ise suda çözünen, esansiyel bir vitamin olan ve çok sayıda biyolojik etkinliği ispatlanmış olan C vitamininin (L-Askorbik asit) insan eritrosit CA izoenzimleri olan hCA I ve hCA II üzerindeki inhibisyon etkileri *in vitro* olarak incelenmiştir.



Şekil 11. L-Askorbik asidin kimyasal formülü.

Şekil 11 de görüldüğü üzere, L-Askorbik asit bileşiminde, halka üzerinde bulunan -OH grupları asidik karakterde olup iyonlaşabilmektedirler. Bu durum çözelti pH'ını değiştirdiğinden, ölçüm prensibi pH değişimi olan hidrataz aktivitesi inhibisyon ölçümü sağlıklı bir şekilde yapılamamış olup hidrataz IC<sub>50</sub> değerleri elde edilememiştir.

Esteraz IC<sub>50</sub> değerleri incelendiğinde hCA I için 192.50±33.34  $\mu$ M, hCA II için 211.75±33.34  $\mu$ M olduğu görülmektedir. L-Askorbik asidin hCA I için K<sub>i</sub> değeri 96.80±11.19  $\mu$ M, hCA II için K<sub>i</sub> değeri 120.46±22.11  $\mu$ M dır. Bu değerler kontrol amacıyla kullanılan sentetik AAZ'nin yanında zayıf kalmakla birlikte daha önce çalışmaları yapılan doğal kaynaklı bileşiklerle kıyaslanabilir büyüklüktedir.

Diğer araştırma grupları tarafından çalışmaları yapılan doğal kaynaklı CA inhibitörlerinin hCA I ve hCA II için K<sub>i</sub> değerlerini inceleyelim. Balaydın vd. (2012), bromofenol türevlerinin CA izoenzimleri üzerine etkilerini incelemişler ve hCA I için K<sub>i</sub> değerlerini 1.08 – 4003  $\mu$ M arasında, hCA II için K<sub>i</sub> değerlerini 0.37 – 78.49  $\mu$ M arasında bulmuşlardır. Göçer vd. (2016), spirobisnaftalin türevlerinin CA izoenzimleri üzerine etkilerini incelemişler ve hCA I için K<sub>i</sub> değerlerini 1.60 – 460.42  $\mu$ M arasında, hCA II

için  $K_i$  değerlerini 0.39 – 419.42 arasında bulmuşlardır. Arabacı vd. (2014), kapsaisin bileşiğinin hCA I ve hCA II üzerine etkisini incelemişler ve hCA I için  $K_i$  değerini 696.15  $\mu$ M, hCA II için  $K_i$  değerini 208.37  $\mu$ M olarak belirlemişlerdir.

L-Askorbik asit bileşiğinin CA izoenzimi ile etkileşim şeklinin ise yapısındaki –OH gruplarından dolayı, fenolik bileşiklerin etkileşim şekli olan, çinko(II) iyonuna bağlı su molekülüne bağlanma (Innocenti *et al.* 2008) veya yakın zamanda keşfedilen, çinko(II) iyonuna bağlı su molekülüne komşu olan ve “derin su” olarak adlandırılan su molekülüne bağlanma (D’Ambrosio *et al.* 2020) şeklinde olduğu düşünülmektedir. Ancak kesin bir ifade için X-ışınları analizi gereklidir.

Sonuç olarak, günlük almamız gereken bir vitamin olan C vitamininin, insan CA izoenzimlerinin aktivitesini inhibe edici bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Düzenli olarak taze meyve ve sebze tüketimi ile kolaylıkla temin edebileceğimiz C vitamini, giriş kısmında bahsedilen diğer faydalarının yanı sıra CA aktivitesini de düzenleyerek ileride bu izoenzimler ile ilişkili olarak ortaya çıkabilecek glokom gibi hastalıkların önlenmesine yardımcı olabilir.

#### Teşekkür

Çalışmalarımıza olan katkılarından dolayı Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

Bu çalışma Yağmur HOŞGÖR’ ün 2020 yılı öncesi tamamlanan yüksek lisans tezinden hazırlanmıştır.

#### 5. Kaynaklar

Aggarwal, M., Kondeti, B. and McKenna, R., 2013. Anticonvulsant/antiepileptic carbonic anhydrase inhibitors: a patent review. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **23**, 717–724.

Alım, Z., Kılınç, N., İşgör, M.M., Şengül, B. and Beydemir, Ş., 2015. Some anti-inflammatory agents inhibit esterase activities of human carbonic anhydrase isoforms I and II: an *in vitro* study. *Chemical Biology and Drug Design*, **86**, 857–863.

Alkan Alkaya, Z., İlkimen, H., Yenikaya, C., Tunca, E., Bülbül, M., Tunç, T. and Sarı, M., 2018. Synthesis and characterization of Cu(II) complexes of 2-amino-6-sulfamoylbenzothiazole and their inhibition studies

on carbonic anhydrase isoenzymes. *Polyhedron*, **151**, 199–205.

Alterio V., Di Fiore, A., D’Ambrosio, K., Supuran, C.T. and De Simone, G., 2012. Multiple binding modes of inhibitors to carbonic anhydrases: How to design specific drugs targeting 15 different isoforms. *Chemical Reviews*, **112**, 4421–4468.

Arabacı B., Gülçin, İ. and Alwaseel, S., 2014. Capsaicin: A potent inhibitor of carbonic anhydrase isoenzymes. *Molecules*, **19**, 10103–10114.

Balaydın, H.T., Şentürk, M., Göksu, S. and Menzek, A., Synthesis and carbonic anhydrase inhibitory properties of novel bromophenols and their derivatives including natural products: Vidalol B. *European Journal of Medicinal Chemistry*, **54**, 423–428.

Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, **72**, 248–254.

Carradori, S., Mollica, A., De Monte, C., Granese, A. and Supuran, C.T., 2015. Nitric oxide donors and selective carbonic anhydrase inhibitors: A dual pharmacological approach for the treatment of glaucoma, cancer and osteoporosis. *Molecules*, **20**, 5667–5679.

Carta, F. and Supuran, C.T., 2013. Diuretic with carbonic anhydrase inhibitory action: a patent and literature review (2005–2013). *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **23**, 681–691.

D’Ambrosio, K., Carradori, S., Cesa, S., Angeli, A., Monti, S.M., Supuran, C.T., De Simone, G., 2020. Catechols: a new class of carbonic anhydrase inhibitors. *Chemical Communications*, **56**, 13033–13036.

Frassetto, P., Parisotto, T.M., Peres, R.C.R., Marques, M.R., Line, S.R.P, Nobre dos Santos, M., 2012. Relationship among salivary carbonic anhydrase VI activity and flow rate, biofilm pH and caries in primary dentition. *Caries Research*, **46**, 194–200.

Göçer, H., Aslan, A., Gülçin, İ. and Supuran, C.T., 2016. Spirobisnaphthalenes effectively inhibit carbonic anhydrase. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, **31**, 503–507.



- Henry, R.P. and Swenson, E.R., 2000. The distribution and physiological significance of carbonic anhydrase in vertebrate gas exchange organs. *Respiration Physiology*, **121**, 1–12.
- Henry, R.P., 1996. Multiple roles of carbonic anhydrase in cellular transport and metabolism. *Annual Review of Physiology*, **58**, 523–538.
- Innocenti, A., Vullo, D., Scozzafava, A. and Supuran, C.T., 2008. Carbonic anhydrase inhibitors: interactions of phenols with the 12 catalytically active mammalian isoforms (CA I–XIV). *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, **18**, 1583–1587.
- İlkimen, H., Yenikaya, C., Sarı, M., Bülbül, M., Tunca, E., Dal, H. and Baş, M., 2015. Synthesis and characterization of complexes of a novel proton transfer salt and their inhibition studies on carbonic anhydrase isoenzymes. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, **30**, 195–203.
- Kasımoğulları, R., Bülbül, M., Arslan, B.S. and Gökçe, B., 2010. Synthesis, characterization and antiglaucoma activity of some novel pyrazole derivatives of 5-amino-1,3,4-thiadiazole-2-sulfonamide. *European Journal of Medicinal Chemistry*, **45**, 4769–4773.
- Laemmli, U.K., 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*, **227**, 680–685.
- Lineweaver, H. and Burk, D., 1934. The determination of enzyme dissociation constants. *Journal of the American Chemical Society*, **56**, 658–666.
- Maren, T.H., 1960. A simplified micromethod for the determination of carbonic anhydrase and its inhibitors. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, **130**, 26–29.
- Marik, P.E., 2018. Hydrocortisone, Ascorbic Acid and Thiamine (HAT therapy) for the treatment of sepsis. Focus on ascorbic acid. *Nutrients*, **10**, 1762.
- Marik, P.E., 2020. Vitamin C: an essential “stress hormone” during sepsis. *Journal of Thoracic Disease*, **12**, S84–S88.
- Masini, E., Carta, F., Scozzafava, A. and Supuran, C.T., 2013. Antiglaucoma carbonic anhydrase inhibitors: a patent review. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **23**, 705–716.
- Mert, S., Alım, Z., İşgör, M.M., Anıl B., Kasımoğulları, R. and Beydemir, Ş., 2019. Novel pyrazole-3,4-dicarboxamides bearing biologically active sulfonamide moiety as potential carbonic anhydrase inhibitors. *Arabian Journal of Chemistry*, **12**, 2740–2748.
- Moskowitz, A., Andersen, L.W., Huang, D.T., Berg, K.M., Grossestreuer, A.V., Marik, P.E., Sherwin, R.L., Hou, P.C., Becker, L.B., Cocchi, M.N., Doshi, P., Gong, J., Sen, A. and Donnino, M.W., 2018. Ascorbic acid, corticosteroids, and thiamine in sepsis: a review of the biologic rationale and the present state of clinical evaluation. *Critical Care*, **22**, 283.
- Neri, D. and Supuran, C.T., 2011. Interfering with pH regulation in tumors as a therapeutic strategy. *Nature Reviews Drug Discovery*, **10**, 767–777.
- Ngo, B., Van Riper, J.M., Cantley, L.C. and Yun J., 2019. Targeting cancer vulnerabilities with high-dose vitamin C. *Nature Reviews Cancer*, **19**, 271–282.
- Nocentini, A. and Supuran, C.T., 2018. Carbonic anhydrase inhibitors as antitumor/antimetastatic agents: a patent review (2008–2018). *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **28**, 729–740.
- Padayatty, S.J. and Levine, M., 2016. Vitamin C: the known and the unknown and Goldilocks. *Oral Diseases*, **22**, 463–493.
- Rickli, E.E., Ghazanfar, S.A., Gibbons, B.H. and Edsall, J.T., 1964. Carbonic anhydrases from human erythrocytes. Preparation and properties of two enzymes. *Journal of Biological Chemistry*, **239**, 1065–1078.
- Scozzafava, A., Supuran, C.T. and Carta, F., 2013. Antiobesity carbonic anhydrase inhibitors: a literature and patent review. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **23**, 725–735.
- Sluch, I.M., Elliott, M.S., Dvorak, J., Ding, K. and Farris, B.K., 2017. Acetazolamide: A new treatment for visual vertigo. *Neuro-Ophthalmology*, **41**, 315–320.
- Supuran, C.T., 2008. Carbonic anhydrases: novel therapeutic applications for inhibitors and activators. *Nature Reviews Drug Discovery*, **7**, 168–181.

Supuran, C.T., 2016. Structure and function of carbonic anhydrase. *Biochemical Journal*, **473**, 2023–2032.

Tunca, E., Bülbül, M., İlkimen, H., Saygılı Canlıdınç, R. and Yenikaya, C., 2020. Investigation of the effects of the proton transfer salts of 2-aminopyridine derivatives with 5-sulfosalicylic and their Cu(II) complexes on cancer-related carbonic anhydrases: CA IX and CA XII. *Chemical Papers*, **74**, 2365–2374.

Verpoorte, J.A., Mehta, S. and Edsall, J.T., 1967. Esterase activities of human carbonic anhydrases B and C. *Journal of Biological Chemistry*, **242**, 4221–4229.

Wilbur, K.M. and Anderson, N.G., 1948. Electrometric and colorimetric determination of carbonic anhydrase. *Journal of Biological Chemistry*, **176**, 147–154.

Yenikaya, C., İlkimen, H., Demirel, M.M., Ceyhan, B., Bülbül, M. and Tunca, E., 2016. Preparation of two maleic acid sulfonamide salts and their copper(II) complexes and antiglaucoma activity studies. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **27**, 1706–1714.



**Construction of Soliton Solutions for Chaffee-Infante Equation**Seyma TULUCE DEMIRAY<sup>1,\*</sup>, Ugur BAYRAKCI<sup>1</sup><sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Osmaniye.Corresponding author\* e-posta: seymatuluce@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8027-7290  
e-posta: ubayrakci42@gmail.com ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-1765-2318

Geliş Tarihi: 01.06.2021

Kabul Tarihi: 25.09.2021

**Keywords**

Chaffee-Infante equation; Sine-Gordon expansion method; Soliton solutions; Exact solutions

**Abstract**

In this article, has been studied on the Chaffee-Infante equation and soliton solutions of these equation are examined. In accordance with this purpose, The sine-Gordon expansion method, which is one of the solution methods of nonlinear partial differential equations, was used. Also graphical representation of the obtained results of the specified equation is made using Wolfram Mathematica 12 for certain values and thus the conformity of the founded results has been demonstrated.

**Chaffee-Infante Denklemi için Soliton Çözümlerinin Oluşturulması****Anahtar kelimeler**

Chaffee-Infante denklemi; Sine-Gordon açılım metodu; Soliton çözümler; Tam çözümler

**Öz**

Bu makalede, Chaffee-Infante denklemi üzerinde çalışılmıştır ve bu denklemin soliton çözümleri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemlerin çözüm yöntemlerinden biri olan sine-Gordon açılım yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca belirtilen denklemin elde edilen sonuçlarının grafiksel gösterimi belli değerler için Wolfram Mathematica 12 programı kullanılarak yapılmış ve böylece bulunan sonuçların uygunluğu gösterilmiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

**1. Introduction**

The nonlinear evolution equations (NLEEs) have so important usage areas in many areas such as physics, chemistry, biology, optics, fluid dynamics, hydro magnetic waves and many others. Recently, various methods have been developed by many researchers for NLEEs, which have many uses in mathematics and physics (Akram and Mahak 2018, Alam and Akbar 2014, Qawasmeh and Alquran 2014, Taghizadeh 2012, Tasbozan *et al.* 2016, Tuluçe Demiray *et al.* 2015, Tuluçe Demiray and Bulut 2017a, Tuluçe Demiray and Bulut 2017b, Tuluçe Demiray and Bulut 2019, Wazwaz 2005, Durur *et al.* 2020, Durur and Yokuş 2021, Yokuş *et al.* 2021, Duran 2021). In this study, we will use the sine-Gordon expansion method (SGEM), which is one of the widely used methods to find the solutions of NLEEs (Bulut *et al.* 2016, İlhan *et al.* 2020, Kumar *et al.* 2017). SGEM has been created from traveling wave transformation and sine-Gordon equation

(Yan and Zhang 1999). We will use SGEM to find the soliton solutions of the Chaffe-Infante equation (CIE). CIE is given as:

$$u_{xt} + (-u_{xx} + au^3 + au)_x + mu_{yy} = 0. \quad (1)$$

Where  $a$  and  $m$  arbitrary constants. CIE is a famous reaction duffing equation and used in environmental science, fluid dynamics electronic high-energy physic and so on. Solutions of CIE given by Eq. (1) have been tried recently to be found by many researchers with various methods such as Habiba *et al.* used the improved Kudryashov method (Habiba *et al.* 2019). Tahir *et al.* used the generalized Kudryashov method (Tahir *et al.* 2020). Sakthivel and Chun used the exp-function method (Sakthivel and Chun *et al.* 2010). Akbar *et al.* used the first integral method (Akbar *et al.* 2019). Mao used the trial equation method and canonical-like transformation method (Mao *et al.* 2018). Our aim

in this article is to find the solutions of the CIE through SGEM. In Section 2, SGEM's basic structure is given. In Section 3, Applying SGEM to the CIE some soliton solutions of the equation is founded.

**2. Basic structure of SGEM**

In this chapter we will give the common structure of SGEM. First, we first take into account the sine-Gordon equation

$$v_{xx} - v_{tt} = m^2 \sin(v). \tag{2}$$

Where  $v = v(x, t)$  and  $m$  is a real constant.

Performing the wave transformation  $v(x, t) = V(\xi), \xi = \mu(x - kt)$  to Eq. (2), a nonlinear ordinary differential equation is obtained as follows.

$$V'' = \frac{m^2}{\mu^2(1-k^2)} \sin(V). \tag{3}$$

Integrating Eq. (3) and equalling the integration constant to zero. We get the following equation.

$$\left[ \left( \frac{V}{2} \right)' \right]^2 = \frac{m^2}{\mu^2(1-k^2)} \sin^2 \left( \frac{V}{2} \right). \tag{4}$$

Substituting  $\varphi(\xi) = \frac{V}{2}$  and  $b^2 = \frac{m^2}{\mu^2(1-k^2)}$  in Eq. (4), we get:

$$\varphi' = b \sin(\varphi). \tag{5}$$

If we take  $b = 1$ , we get:

$$\varphi' = \sin(\varphi). \tag{6}$$

From the Eq. (6), we get the following equations.

$$\sin(\varphi) = \sin(\varphi(\xi)) = \frac{2de^\xi}{p^2e^{2\xi} + 1} \Big|_{d=1} = \sec h(\xi), \tag{7}$$

$$\cos(\varphi) = \cos(\varphi(\xi)) = \frac{d^2e^{2\xi} - 1}{p^2e^{2\xi} + 1} \Big|_{d=1} = \tanh(\xi), \tag{8}$$

where  $d$  is considered as the integral steady.

In order to the find solution of the following nonlinear partial differential equation;

$$F(u, u_x, u_t, u_{xx}, u_{tt}, u_{xt}, u_{xxx}, \dots), \tag{9}$$

we handle the equation given below,

$$V(\xi) = \sum_{i=1}^n \tanh^{i-1}(\xi) [B_i \sec h(\xi) + A_i \tanh(\xi)] + A_0. \tag{10}$$

Considering the Eqs. (7) and (8), we can write the Eq. (10) as follows:

$$V(\varphi) = \sum_{i=1}^n \cos^{i-1}(\varphi) [B_i \sin(\varphi) + A_i \cos(\varphi)] + A_0. \tag{11}$$

Here we determine the value of  $n$  in Eq. (11) by means of the balance principle, replace Eq. (11) into Eq. (9) and comparison the terms. Thus we get a system of equations. Solving this obtained system of equations, we obtain results in moving wave solutions of the Eq. (9).

**3 Application of SGEM to the CIE**

We the following transformation to the CIE given in Eq. (1)

$$u(x, y, t) = u(\xi), \xi = kx + ly + wt. \tag{12}$$

Applying the transformation Eq. (12), we obtain the ordinary differential equation.

$$kwu'' - k^3u''' + 3aku^2u' - aku' + ml^2u'' = 0. \quad (13)$$

In Eq. (13) we integrate with respect of  $\xi$  and by taking the integration constant as zero, we obtain.

$$-k^3u'' + (kw + ml^2)u' + ak(u^3 - u) = 0. \quad (14)$$

Balancing the terms  $u''$  and  $u^3$ . We find  $N=1$ . Using the value of  $N=1$  in Eq. (11), we get:

$$u(\varphi) = B_1 \sin(\varphi) + A_1 \cos(\varphi) + A_0, \quad (15)$$

$$u'(\varphi) = B_1 \cos(\varphi) \sin(\varphi) - A_1 \sin^2(\varphi), \quad (16)$$

$$u''(\varphi) = B_1 \cos^2(\varphi) \sin(\varphi) - B_1 \sin^3(\varphi) - 2A_1 \sin^2(\varphi) \cos(\varphi). \quad (17)$$

Placing Eq. (15), (16) and (17) into Eq. (14), we generating trigonometric equations. We obtain an equation system by performing some mathematical operations in these trigonometric equations. Solving the obtained system of equations with the help of Wolfram Mathematica Release 12, we can result:

Case1:

$$A_0 = -\frac{1}{2}, A_1 = -\frac{1}{2}, a = 0, k = 0, l = 0. \quad (18)$$

We get:

$$u_1(x, y, t) = -\frac{1}{2} + \operatorname{sech}[kx + ly + wt]B_1 - \frac{\tanh[kx + ly + wt]}{2}. \quad (19)$$

Case2:

$$A_0 = 0, A_1 = 1, B_1 = 0, a = 2k^2, w = -\frac{l^2m}{k}. \quad (20)$$

We get:

$$u_2(x, y, t) = \tanh[kx + ly + wt]. \quad (21)$$

Case3:

$$A_0 = -\frac{1}{2}, A_1 = -\frac{1}{2}, a = 0, k = 0, m = 0. \quad (22)$$

We get:

$$u_3(x, y, t) = \frac{1}{2}(-1 - \tanh[kx + ly + wt]). \quad (23)$$

Case4:

$$A_0 = \frac{1}{2}, A_1 = -\frac{1}{2}, B_1 = 0, a = 8k^2, l = -\frac{\sqrt{6k^3 - kw}}{\sqrt{m}}. \quad (24)$$

We get:

$$u_4(x, y, t) = \frac{1}{2} \frac{\left(1 - \tanh\left[\frac{kx + ly + wt}{2}\right]\right)^2}{1 + \tanh^2\left[\frac{kx + ly + wt}{2}\right]}. \quad (25)$$

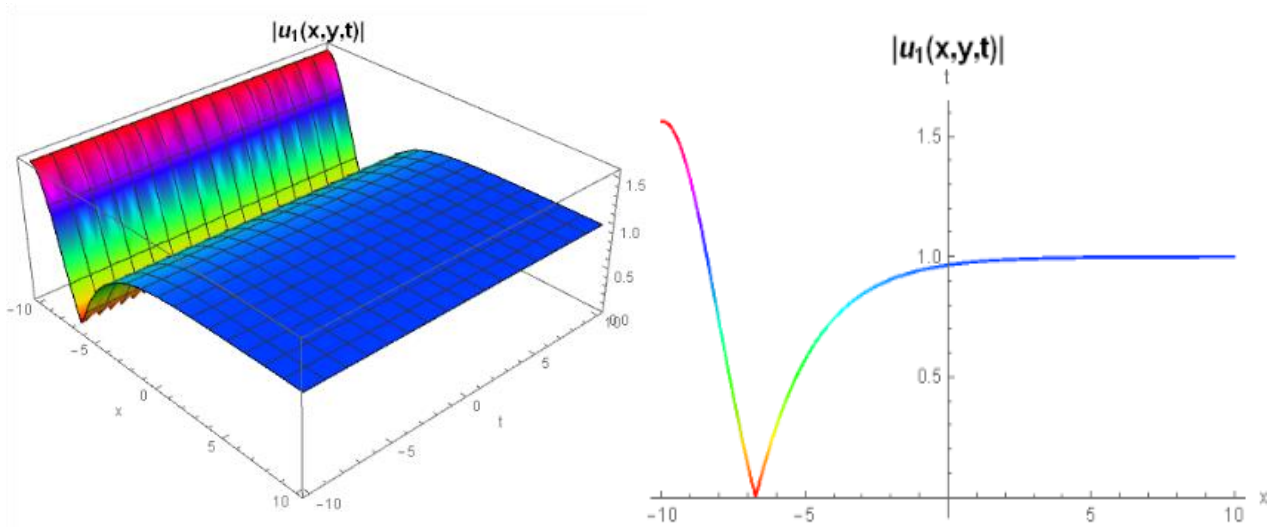


Figure 1. The 3D graph of the Eq. (19) for  $k = 0.5, l = 0.25, w = 3, B_1 = 2, y = 1, -10 < x < 10, -10 < t < 10$  and 2D graph for this values and  $t = 1.5$

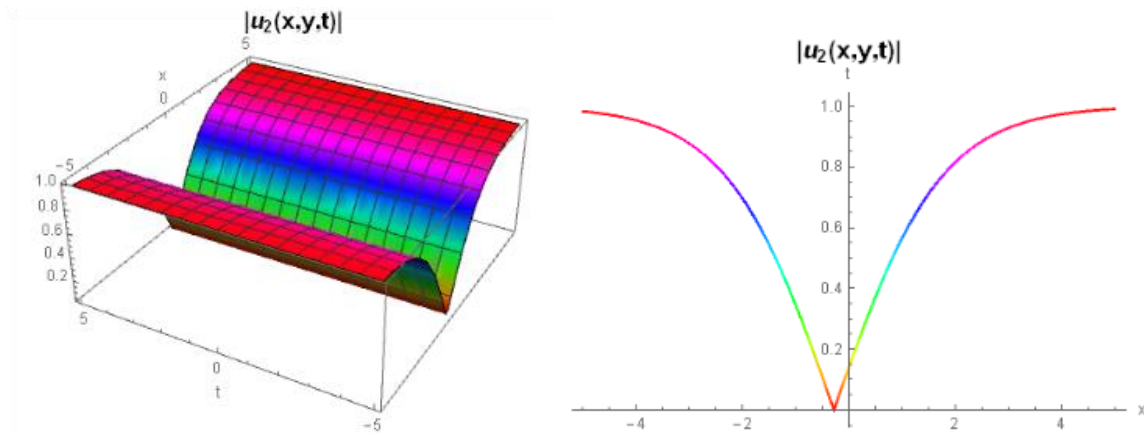


Figure 2. The 3D graph of the Eq. (21) for  $k = 0.5, l = 0.8, w = 1, y = 0.05, -5 < x < 5, -5 < t < 5$  and 2D graph for this values and  $t = 0.1$ .

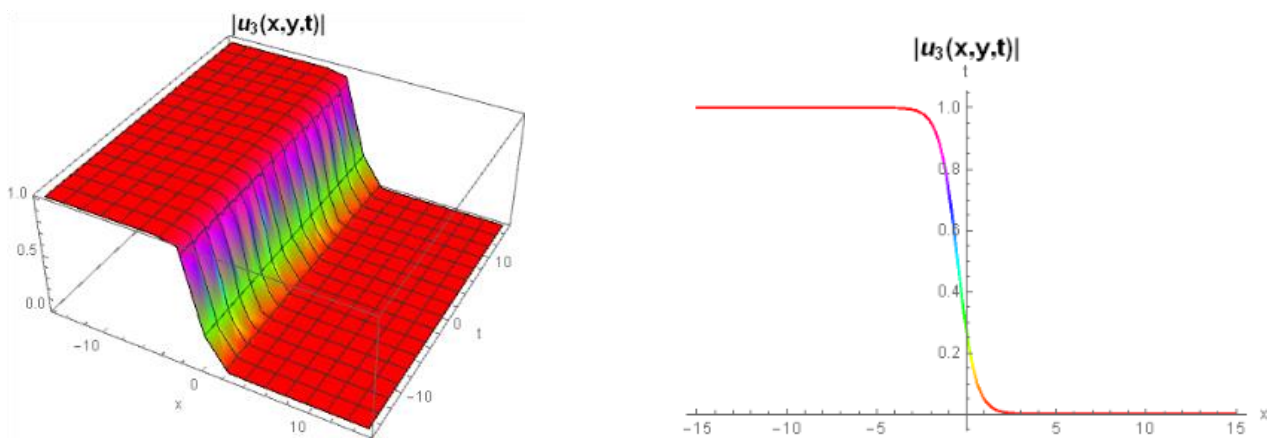
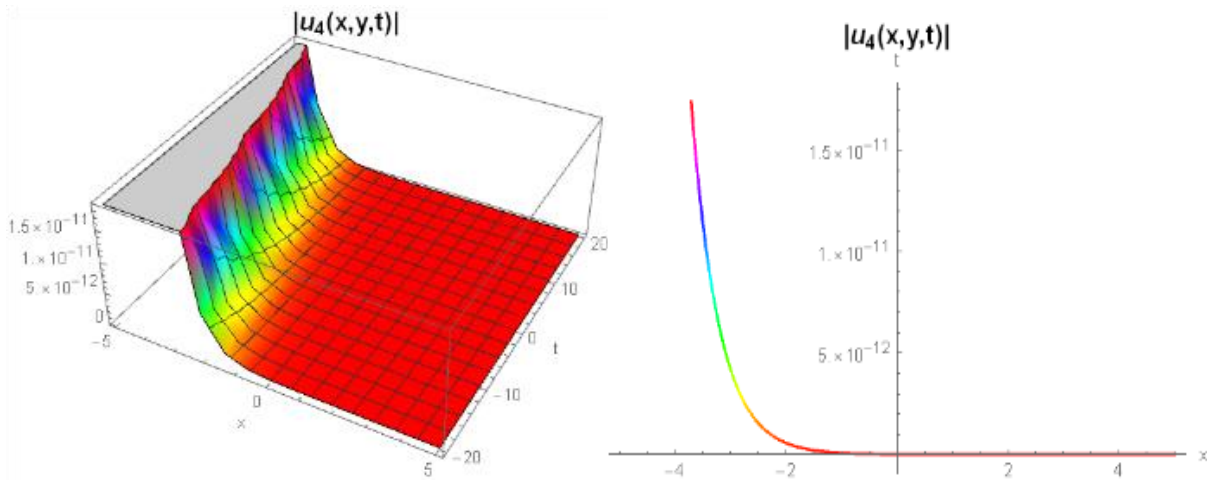


Figure 3. The 3D graph of the Eq. (23) for  $k = 1, l = 0.2, w = 0.5, y = 2, -15 < x < 15, -15 < t < 15$  and 2D graph for this values and  $t = 0.2$ .



**Figure 4.** The 3D graph of the Eq. (25) for  $k = 1, l = 8, w = 0.05, y = 2, -5 < x < 5, -20 < t < 20$  and 2D graph for this values and  $t = 2$ .

#### 4. Discussions

By applying SGEM to the CIE equation, we found some soliton solutions of the equation. Thus, it has been seen that SGEM is a method that provides effective and precise results. In addition, this method is a suitable tool for solving difficult and complex problems encountered in the solution of NLEEs more easily. When we compare the solutions we obtained in this study with previous studies, our (21) solution is similar to the (26) solution given by Sakthivel and Chun and the (23) and (58) solutions given by Akbar *et al.* In addition our (23) solution is similar to the (25) solution given by Sakthivel and Chun, the (33) and (48) solutions given by Akbar *et al.* and the (14), (16) and (18) solutions given by Tahir *et al.* According to our research our (19) and (25) solutions are not given before and are new.

#### 5. Conclusions

In this work, we obtained the soliton solutions of the CIE by applying SGEM. Thus, we obtained new soliton solutions of the CIE. We drew the 2D and 3D graphical representations of these solitons with the help of a Wolfram Mathematica 12. In this way, we checked the correctness of the solutions we found. As far as we know, SGEM has not been applied to the CIE before. The solutions we obtained have not

been presented in previous studies and are new. In the light of the results we have achieved, we consider the sine-Gordon expansion method as an effective method in calculation of NLEEs.

#### 6. REFERENCES

- Akbar, M.A., Ali, N.H.M, Hussain, J., 2019. Optical soliton solutions to the (2 + 1)-dimensional Chaffee–Infante equation and the dimensionless form of the Zakharov equation, *Advances in Difference Equations*, 2019, **1**, 1–18.
- Akram, G., Mahak, N., 2018. Application of the first integral method for solving (1+1) dimensional cubic-quintic complex Ginzburg-Landau equation, *Optik*, 164, 210–217.
- Alam, M.N., Akbar, M.A., 2014. Traveling wave solutions for the mKdV equation and the Gardner equations by new approach of the generalized (G'/G)-expansion method, *Journal of the Egyptian Mathematical Society*, 22, **3**, 402–406.
- Bulut, H., Sulaiman, T.A., Baskonus, H.M., 2016. New solitary and optical wave structures to the Korteweg–de Vries equation with dual-power law nonlinearity, *Opt Quant Electron*, 48, **564**, 1–14.
- Duran, S., 2021. Breaking theory of solitary waves for the Riemann wave equation in fluid dynamics, *International Journal of Modern Physics B*, 35, **9**, 2150130.
- Durur, H., Tasbozan, O., Kurt, A., 2020. New Analytical Solutions of Conformable Time Fractional Bad and

- Good Modified Boussinesq Equations, *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 5, 1, 447–454.
- Durur, H., Yokuş, A., 2021. Discussions on diffraction and the dispersion for traveling wave solutions of the (2+1)-dimensional paraxial wave equation, *Mathematical Sciences*, 1–11.
- Habiba, U., Salam, M. A., Hossain, M. B., Datta, M., 2019. Solitary Wave Solutions of Chaffee-Infante Equation and (2+1)-Dimensional Breaking Soliton Equation by the Improved Kudryashov Method, *Global Journal of Science Frontier Research*, 19, 5, 1–9.
- İlhan, O.A., Bulut, H., Sulaiman, T.A., Baskonus, H.M., 2020. On the new wave behavior of the Magneto-Electro-Elastic(MEE) circular rod longitudinal wave equation, *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 10, 1, 1–8.
- Kumar, D., Hosseini, K., Samadani, F., 2017. The sine-Gordon expansion method to look for the traveling wave solutions of the Tzitzéica type equations in nonlinear optics, *Optik*, 149, 439–446.
- Mao, Y., 2018. Exact solutions to (2 + 1)-dimensional Chaffee–Infante equation, *Pramana-J. Physics*, 91, 9, 1–4.
- Qawasmeh, A., Alquran, M., 2014. Reliable Study of Some New Fifth-Order Nonlinear Equations by Means of G'/G Expansion Method and Rational Sine-Cosine Method, *Applied Mathematical Sciences*, 8, 120, 5985–5994.
- Sakthivel, R., Chun, C., 2010. New Soliton Solutions of Chaffee-Infante Equations Using the Exp-Function Method, Function Method, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 65, 3, 197–202.
- Taghizadeh, N., Mirzazadeh, M., Paghaleh, A.S., 2012. Exact travelling wave solutions of Joseph-Egri(TRLW) equation by the extended homogeneous balance method, *International Journal of Applied Mathematics and Computation*, 4, 1, 96 – 104.
- Tahir, M., Kumar, S., Rehman, H., Ramzan, M., Hasan, A., Osman, M.S., 2020. Exact traveling wave solutions of Chaffee–Infante equation in (2 + 1)-dimensions and dimensionless Zakharov equation, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 44, 2, 1500–1513.
- Tasbozan, O., Cenesiz, Y., Kurt, A., 2016. New solutions for conformable fractional Boussinesq and combined KdV-mKdV equations using Jacobi elliptic function expansion method, *The European Physical Journal Plus*, 131, 244, 1–14.
- Tuluce Demiray, S., Bulut, H., Onargan, G., 2015., An application of generalized tanh function method for the sixth-order Boussinesq (sB) equation and (1+1) dimensional dispersive long wave equation, *Applied Mathematical Sciences*, 9, 16, 773–790.
- Tuluce Demiray, S., Bulut, H., 2017a. Analytical solutions of Phi-four equation, *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 7, 3, 275-280.
- Tuluce Demiray, S., Bulut, H., 2017b. New exact solutions for generalized Gardner equation, *Kuwait J. Sci.*, 44, 1, 1–8.
- Tuluce Demiray, S., Bulut, H., 2019. Soliton solutions of some non-linear evolution problems by GKM, *Neural Computing and Applications*, 31, 287–294.
- Wazwaz, A.M., 2005. The tanh method for generalized forms of nonlinear heat conduction and Burgers–Fisher equations, *Applied Mathematics and Computation*, 169, 1, 321-338.
- Yan, Z., Zhang, H., 1999. New explicit and exact travelling wave solutions for a system of variant Boussinesq equations in mathematical physics, *Physics Letters A*, 252, 6, 291–296.
- Yokuş, A., Durur, H., Abro, K.A., 2021. Symbolic computation of Caudrey–Dodd–Gibbon equation subject to periodic trigonometric and hyperbolic symmetries, *European Physical Journal Plus*, 136, 4, 1–16.

## Araştırma Makalesi / Research Article

# Servikal Kanserlerin Teşhisinde Kullanılan Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi

Tolga ÖZLEN<sup>1</sup>, Ali GÜNEŞ<sup>2</sup><sup>1</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul.<sup>2</sup> İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul.Sorumlu Yazar, e-posta: [tolgaozlen@stu.aydin.edu.tr](mailto:tolgaozlen@stu.aydin.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1468-0049>  
[aligunes@aydin.edu.tr](mailto:aligunes@aydin.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6177-3136>

Geliş Tarihi: 15.01.2021

Kabul Tarihi: 12.10.2021

## Öz

### Anahtar Kelimeler

Serviks Kanseri;  
Servikal Kanserler;  
Makine Öğrenmesi;  
Yapay Zeka

Serviks (Rahim Ağzı Kanseri) ölüme yol açan ve ölüm oranı en yüksek kanser türlerinden biri olarak görülmektedir. Serviks kanseri kadın kanseri arasında meme kanserinden sonra 2. Sırada yer almaktadır. Günümüzde makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımıyla biyomedikal veri kümelerinin analizi yaygınlaşmıştır. Özellikle kanser gibi habis hastalıkların erken teşhisinde tahminleme sistemleri önemli rol oynamaktadır. Serviks kanseri üzerinde belirlenmiş risk faktörlerine yönelik yapılan tahminler tutarlı olabilmektedir. Bu çalışmada serviks kanserinin teşhisinde kullanılan makine öğrenmesi metodlarının başarıları karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan 23 ayrı makine öğrenmesi algoritması, 838 örnek, 32 öznitelik ve 4 hedef değişkenli veri seti üzerinde test edilmiştir. Veri ön işleme, özellik seçimi ve sınıflandırma olmak üzere üç aşamadan oluşan analizde sınıflandırma performansları; sınıflandırma doğruluğu, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonucunda RepTree algoritmasının en başarılı sonuç veren model olduğu belirlenmiştir.

## Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms Used in the Diagnosis of Cervical Cancers

### Abstract

Cervix (Cervical Cancer) is seen as one of the cancer types that causes death and has the highest mortality rate. Cervical cancer is the second most common female cancer after breast cancer. Today, the analysis of biomedical datasets has become widespread with the use of machine learning methods. Prediction systems play an important role in the early diagnosis of malignant diseases such as cancer. Estimates of risk factors for cervical cancer can be consistent. In this study, the success of machine learning methods used in the diagnosis of cervical cancers was compared. 23 different machine learning algorithms used in the study were tested on a data set with 838 samples, 32 features and 4 target variables. Classification performances in the analysis consisting of three stages: data preprocessing, feature selection and classification; Comparisons were made using classification accuracy, precision, sensitivity, and F-criterion metrics. As a result of the analysis, it was determined that the RepTree algorithm was the model that gave the most successful results.

### Keywords

Cervix Cancer;  
Cervical Cancers;  
Machine Learning;  
Artificial intelligence

### 1. Giriş

Bilgisayarlar insanlara göre daha hızlı işlem yapabilmektedir. Geçmişte karar verme süreci gerektiren durumlarda insan zekasına ihtiyaç duyuluyorken, günümüzde geliştirilen farklı Makine öğrenmesi metodları ile bilgisayarlara doğru kararlar verme yeteneği kazandırılmıştır.

Makine öğrenmesi temel olarak, bilgisayarların mevcut veriler üzerinden çıkarım yapmasına, tahminlerde bulunmasına ve tahminler üzerinde yorumlama yapabilmesine olanak sağlayan algoritmalarla oluşur. Kümeleme, sınıflama yöntemleri, karar ağaçları, yapay sinir ağları gibi pek çok teknik ile veriden anlam çıkarımı ve tahminleme yapılabilmektedir (Kolay ve Erdoğan)

2016). Makine öğrenmesi algoritmaları temel olarak 2 ayrı sınıfta incelenir. Denetimli ve denetimsiz olarak nitelendirebilecek makine öğrenmesi algoritmaları farklı amaçlar doğrultusunda kullanılabilir.

Makine öğrenmesi son yıllarda sağlık sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle hastalıkların teşhis ve sınıflandırılmasında sınıflandırma algoritmalarının kullanımı yaygındır. Hastalık teşhisinde kullanılan sınıflandırma algoritmalarına karar destek sistemleri adı verilir. Karar destek sistemlerini oluşturan sınıflandırma algoritmaları konusunda biyomedikal veri kümeleri konusunda günümüze kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Hacıbeyoğlu ve Karakoyun 2014).

Makine öğrenmesi tekniklerinin klinik alanda özellikle kanser teşhisine yönelik kullanımı giderek artarken serviks kanserinin tespitini kolaylaştırmaya yönelik olarak yapılan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Serviks kanseri teşhisinde farklı makine öğrenmesi algoritmaları kullanılmakla birlikte yaygın olarak kümeleme, yapay sinir ağları, destek vektör makineleri, bulanık ve yapay bulanık mantık ve hibrit teknikler kullanılmaktadır (Hacıbeyoğlu ve Karakoyun 2014).

Ölüme yol açan hastalıklardan biri olan kanserler günümüzde mortalite oranı en yüksek hastalıklardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Serviks kanseri kadınların yaşamında en önemli sağlık sorunlarından biridir. Serviks kanseri genel kanser ölümleri açısından üçüncü sıradadır. Serviks kanseri, 2018 yılında tahmini 570.000 vaka ile kadınlarda dördüncü en sık görülen kanser türüdür ve tüm kadın kanserlerinin %7,5'ini temsil etmektedir. 2018 yılında yaklaşık 311.000 kadın serviks kanseri sebebiyle ölmüştür (World Health Organization, 2019). Servikal kanserlerin erken tanı evresinin olması ve bu evrede teşhis edildiklerinde etkin tedavi olanaklarının varoluşu bu kanser türünü erken teşhis noktasında önemli bir tür haline getirmektedir. Erken teşhis edildiğinde bu kanser türüne ait sağ kalım oranları oldukça yüz güldürücüdür (Gözüyeşil vd. 2019). Ancak Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde düzenli tarama ve testlerin eksikliği nedeniyle serviks kanseri hala ciddi bir sorun halinde devam etmektedir (World Health Organization 2018).

## 1.1 Serviks Kanseri

Rahim ağzı kanseri ya da tıbbi adıyla serviks kanseri, rahim bölgesinin serviks denilen alt kısmında görülen bir kanser çeşididir. Serviks, rahmin vajinaya bağlanan boyun şeklindeki kısmıdır. Cinsel yolla bulaşan bir enfeksiyon olan HPV (Human Papilloma Virus) ile ilişkili olduğu düşünülmektedir ( Sonay vd. 2013).

Birçok insan virüse maruz kaldığında bağışıklık sistemi HPV'yi baskılar ve hastalık oluşmasını engeller. Ancak küçük bir grup kadında virüs, yıllarca hayatta kalır. Bu virüsler, serviks yüzeyindeki bazı hücrelerin, kanser hücreleri haline gelmesine neden olan süreci başlatır (Güner vd. 2007).

Serviks kanseri, meme kanserinden sonra kadınlarda en sık görülen kanser çeşididir. Her iki dakikada bir kadının serviks kanseri nedeniyle hayatını kaybettiği düşünülmektedir (Aydoğdu vd. 2018). Günümüzde Servikal kanserlerin gelişiminde Human Papilloma Virus'un (HPV) rol oynadığı bilinmektedir. Serviks kanserlerinin %99.7'si HPV 16-18 virüs tipleri ile ilişkilidir (Güner vd. 2013). Cinsel yönden aktif kişilerin %70'inden fazlası, HPV ile enfekte olmakta ve bunların da %70'inden fazlasının 15-24 yaş arasında olduğu bildirilmektedir (Sonay vd. 2013). Bu sebeple serviks kanserlerinin erken teşhisi önemli bir konu olarak görülmelidir.

Birçok kanser çeşidinde olduğu gibi serviks kanserlerinin gelişiminde rol oynayan çeşitli risk faktörleri belirlenmiştir.

Literatürde belirlenmiş risk faktörleri; Kronik HPV enfeksiyonu, Erken yaşta cinsel ilişki, Çok sayıda cinsel partner, İlk doğum yaşının 20 ve altında olması, Doğum sayısının üç ve üzeri olması, Cinsel yolla geçen hastalığa sahip olunması (özellikle Human Papilloma Virüs tip 16-18, Herpes Simpleks tip II ve HIV), Sigara kullanılması, Yaş, Irk (Siyah kadınlar), Tedavi edilmemiş diğer vajinal enfeksiyonların olması, OKS (Doğum Kontrol Yöntemleri) kullanımı olarak belirlenmiştir (Türkmen vd. 2013).

Çoğu serviks kanseri, rahim ağzının yüzeyindeki hücrelere saldıran insan papilloma virüsünden (HPV) kaynaklanır (Uludağ vd. 2020). En erken kanser öncesi aşamalarında, rutin bir muayene sırasında yapılan Pap smear testi, anormal hücrelerin varlığını tespit edebilir (Uludağ vd. 2020).

Hem kanser öncesi hem de kanserli vakalarda, tanı koymak için rahim ağzından biyopsi alınması gerekir.



Bu biyopsi genellikle ayakta tedavi ortamında yapılabilir. Daha ilerlemiş serviks kanseri olan hastaların, tümörün boyutunu daha iyi tanımlamak ve mesane ve rektum gibi diğer organların veya yapıların dahil olup olmadığını incelemek için anestezi altında bir ameliyathanede biyopsi yapılması gerekebilir (Gök vd. 2021).

Bu çalışmalar serviks kanserinin tedavisinde erken teşhisin önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Serviks kanserlerinin risk analizlerine yönelik makine öğrenmesi metotlarının kullanımı mümkündür. Makine öğrenmesi tekniklerinin risk analizinde ve kanser teşhisinde kullanımı erken tanıda büyük avantaj sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada "Pap Smear" test sonuçlarına ait sayısal verileri sınıflandırmak için makine öğrenmesi teknikleri kullanılmıştır.

## **1.2 Makine Öğrenmesi**

Makine öğrenmesi yapay zekanın bir alt dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Veriler arasındaki örüntülerin taranması ve anlamlı çıkarımların oluşturulması için bilgisayar destekli matematiksel modeller kullanılır. Bu matematiksel modeller her an milyonlarca verinin saklandığı yığınlar üzerinde çeşitli analizler yapmak için kullanılmaktadır. Makine öğrenimi, verilere erişebilen ve kendileri için öğrenmeyi kullanabilen bilgisayar programlarının geliştirilmesine odaklanır (Afrin ve Nahar 2015). Makine öğrenmesi algoritmaları denetimli ve denetimsiz olmak üzere iki kısımda incelenmektedir.

### **1.2.1 Denetimli Makine Öğrenmesi Algoritmaları**

Denetimli makine öğrenmesi algoritmaları, gelecekteki olayları tahmin etmek için etiketli örnekleri kullanarak geçmişte öğrenilenleri yeni verilere uygulayabilir. Bilinen bir eğitim veri setinin analizinden başlayarak, öğrenme algoritması, çıktı değerleri hakkında tahminlerde bulunmak için bir işlev üretmektedir. Sistem, yeterli eğitimden sonra herhangi bir yeni girdi için hedefler sağlamaktadır. Denetimli öğrenme algoritmaları aynı zamanda çıktısını doğru, amaçlanan çıktıyla karşılaştırabilir ve modeli buna göre değiştirmek için hataları bulabilmektedir (Afrin ve Nahar 2015). Tahmin etmeye çalışılan çıktı için bilinen verilerin kullanımı söz konusu ise denetimli öğrenme uygun bir tercih olacaktır.

Denetimli makine öğrenmesi algoritmalarına Knn, Linear Regresyon, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri (DVM), Karar ağaçları ve Rastgele Orman

Algoritmaları ve Sinir Ağları örnek olarak gösterilebilir.

### **1.2.2 Denetimsiz Makine Öğrenmesi Algoritmaları**

Eğitmek için kullanılan verilerin sınıflandırılmadığı veya kümelenemediği durumlarda denetimsiz makine öğrenimi algoritmaları kullanılmaktadır. Denetimsiz öğrenme, sistemlerin sınıflandırılmamış verilerden gizli bir sonuca ulaşmak için bir işlevi nasıl çıkarabileceğini inceler. Sistem doğru çıktıyı bulmaz, ancak verileri araştırır ve sınıflandırılmamış verilerden gizli yapıları ortaya çıkarabilmek için veri kümelerinden sonuç tahminleri yapabilir. Denetimsiz öğrenmenin amacı, veriler hakkında daha fazla bilgi edinmek için verilerin temelini oluşturan yapıyı veya dağılımı modellemektir. Eğitim verisi üzerinde etiketlemenin var olmadığı ya da sınıflandırmanın eksik olduğu durumlarda denetimsiz makine öğrenmesi algoritmalarının kullanımı uygun bir tercih olacaktır.

Denetimsiz öğrenmede en sık kullanılan iki teknik Asal Bileşen Analizi (Principal Component Analysis: PCA) ve Kümeleme (Clustering) yöntemidir.

### **1.3 Serviks Kanserine Yönelik Makine Öğrenmesi Çalışmaları**

Karakoyun ve Hacıbeyoğlu (2014), makine öğrenmesi algoritmalarından K-En Yakın Komşu (K-NN), Naive Bayes (NB), CN2, Rastgele Optimizasyon (RO), Yapay Sinir Ağı (YSA) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) algoritmalarını kullanarak yaptıkları çalışmada, biyomedikal veri kümeleri üzerinde sınıflandırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmanın sonucunda YSA algoritmasının yüksek başarımda sonuçlar verdiği ve küçük ve orta ölçekli veri kümeleri için K-NN algoritmasının daha hızlı çalıştığı görülmüştür.

Huang ve arkadaşları (2013), Naive Bayes (NB), Karar Ağaçları ve Destek Vektör Makinelerini (DVM) kullanarak çeşitli veri kümeleri üzerinde veri sınıflandırma yapmışlardır. Bu çalışmada DVM algoritmasının, uygulanan veri kümeleri için NB ve C4.5 algoritmalarından daha yüksek başarımlı olduğu ancak yapılan istatistiksel testler sonucunda aradaki farkın kayda değer oranlarda olmadığı bulunmuştur (Huang 2003).

Tseng ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada tekrarlayan serviks kanseri olgularının teşhisinde destek vektör makinesi, C5.0 ve aşırı öğrenme makinesini içeren üç makine öğrenme yaklaşımı

kullanmış, çalışma sonucunda C5.0 algoritmasının tekrarlayan olguların keşfinde en başarılı model olduğu bulunmuştur.

Sun ve arkadaşları (2014), Naive Bayes, C4.5 ve Lineer Regresyon algoritmaları kullanılarak serviks kanserlerinin tanımlanmasına yönelik yaptıkları karşılaştırmalı çalışmada, RF algoritmasının %94,44 doğruluk oranı ile en iyi sınıflandırma performansını elde ettiği gösterilmiştir.

Sarwar ve arkadaşları (2015), serviks kanserinin teşhisinde kullanılabilir 15 ayrı algoritmayı iki ayrı veri seti üzerinde incelemiş, yaptıkları çalışmanın sonucunda Karar Ağaçları algoritmasının en başarılı sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Veri seti üzerinde yapılan çalışmada en başarısız sonuç veren algoritmanın Naive Bayes algoritması olduğu gösterilmiştir.

Erkaymaz ve Palabaş (2018), yılında yapmış oldukları çalışmada serviks kanserlerinin teşhisinde kullanılan makine öğrenmesi algoritmalarını analiz etmiş, Naive Bayes (NB), k-En Yakın Komşu (kNN), Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) ve Karar Ağaçları (KA-C4.5) algoritmaları ve rastgele alt uzaylar algoritması arasından elde edilen performans analizine göre K-NN algoritmasının % 95.51 doğruluk oranıyla daha başarılı performans gösterdiği öne sürülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

Makine öğrenmesi metotları ile yapılacak karşılaştırmalı çalışmada serviks kanseri hastalığının sınıflandırılmasında kullanılacak 838 örnek, 32 öznitelik ve 4 hedef değişkenli veri seti 'UC Irvine Machine Learning Repository' den elde edilmiştir (Sarwar vd., 2015). Çalışmada kullanılacak olan 32 adet veri setinden, "İlk tanıdan bu yana geçen süre" ve "Son tanıdan bu yana geçen süre" özellikleri, hastaların kişisel bilgileri nedeniyle özellikler listesinden kaldırılmıştır. Serviks kanserinin teşhisinde en önemli risk faktörleri olan; Yaş, Cinsel Partner Sayısı, İlk Cinsel İlişki Yaşı, Sigara, Hamilelik Sayısı, Doğum Kontrol İlacı Kullanımı veri tipleri analizde kullanılmıştır. Veri setinde 4 hedef değişken kullanılmıştır. Değişkenlerin isimleri Schiller, Cytology, Biopsy, Hinselmann olarak belirlenmiştir. Hinselmann, serviks kanserinin tespiti için asetik asit kullanılarak yapılan kolposkopi sonucunu ifade etmektedir. Lugol iyot kullanılarak yapılan kolposkopi sonucunda elde edilen veriler, Schillers olarak ifade edilmiştir. Serviks kanserinin teşhisinde kullanılan bir diğer yöntem olan Pap-Smear testi sonucu Cytology olarak belirlenmiştir. Biyopsi hedef

değişkeni hastalıklı olduğu düşünülen alandan alınan doku örneklerinin analizi sonucunda serviks kanserinin var olup olmadığını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Verilerin hedef değişkenlerine göre dağılımı çizelgede gösterilmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Hedefe göre değişken dağılımları.

Hedef Değişken	Pozitif		Negatif	
	Sayı	Oran	Sayı	Oran
Schiller	63	9.43%	605	90.57%
Cytology	39	5.84%	629	94.16%
Biopsy	45	6.74%	623	93.26%
Hinselmann	30	4.49%	638	95.51%

Bu çalışmada, RepTree, SGD, SMO, OneR, BayesNet, LwL, DecisionStump, DecisionTable, SimpleLogistic, MultilayerPreceptron, NaiveBayes, Naive Bayes Updateable, RandomForest, Logistic, J48, RandomTree, LbK, Kstar, LibSVM, SGDDText, NaiveBayes, Multinomial Text. InputMappedClassifier, ZeroR gibi 23 sınıflandırma modeli ile Weka 3.4.8 sürümünde sınıflandırma uygulanmıştır (Şeker, 2016). Çalışmada her bir hedef değişken ayrı ayrı değerlendirilmiş ve her biri için doğru sınıflandırma başarı oranları farklı çapraz doğrulama yöntemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Veri ön işleme, özellik seçimi ve sınıflandırma olmak üzere üç aşamadan oluşan analizde algoritmaların sınıflandırma performansları; sınıflandırma performansı (SP), Kappa İstatistiği (KI), Ortalama Mutlak Hata (OMH), Ortalama Hata Karekökü (OHK) metrikleri kullanılarak analiz edilmiştir. SP, KI, OMH, OHK ölçütlerine göre en başarılı sonucu veren üç algoritma farklı katlarda çapraz doğrulama yöntemleri ve yüzdellik ayırma yöntemleri kullanılarak tekrar analiz edilmiştir.

Yapılan analizlere göre en yüksek performansa sahip olan yöntem kesinlik ve duyarlılık ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Doğru Pozitif Oran (TPR), Yanlış Pozitif Oran (FPR), Hassasiyet (PRE), Duyarlılık (Recall), F-Measure (FM), Matthews Correlation Coefficients (MCC), ROC Analizi (ROC), Precision-recall Curve (PRC) ve Sınıf metrikleri analizin sonuçlarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Hedef değişkenlere göre yapılan sınıflandırma işleminin sonucunda tahmin edilen veriler için; kanserli doku(P), sağlıklı doku(N) olarak belirlenmiştir. Çıkan sonuçların ağırlıklı ortalaması (W.Avg) değerlendirilmiştir.

### 3. Bulgular

Serviks kanserine neden olan risk faktörleri detaylı bir şekilde analiz edilmiş, veri seti üzerindeki değerler hedef değişkenlere göre tahmin edilmiştir. Ortalama mutlak hata değerleri, ortalama karesel hatanın karekökü ile korelasyon katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki çizelgede her bir öğrenme yöntemi ve sonuçları gösterilmiştir (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** Makine Öğrenmesi Yöntemleri ve Sonuçları

Algoritma	SP	KI	OMH	OHK
RepTree	96,42%	0.7391	0.0533	0.1659
SGD	96,18%	0.7258	0.0382	0.1954
SMO	96,18%	0.7258	0.0382	0.1954
OneR	96,18%	0.7151	0.0478	0.1979
BayesNet	96,18%	0.666	0.0446	0.1737
LwL	96,18%	0.7258	0.0559	0.1687
DecisionStump	96,18%	0.7258	0.0559	0.1681
DecisionTable	96,18%	0.7258	0.0572	0.1681
SimpleLogistic	96,18%	0.7258	0.1486	0.1967
MultilayerPreceptron	95,82%	0.6506	0.049	0.1833
NaiveBayes	95,58%	0.643	0.0471	0.1799
Naive Bayes Updateable	95,58%	0.643	0.0471	0.1799
RandomForest	95,58%	0.6369	0.0561	0.1781
Logistic	95,35%	0.6475	0.0571	0.1749
J48	95,23%	0.6173	0.0596	0.1989
RandomTree	94,99%	0.5843	0.0501	0.2239
LbK	94,99%	0.5843	0.0512	0.2236
Kstar	94,51%	0.4132	0.0601	0.206
LibSVM	93,91%	0.0992	0.0609	0.2467
SGDText	92,56%	0	0.0944	0.2538
NaiveBayes Multinomial Text.	90,56%	0	0.1578	0.2145
InputMappedClassifier	88,56%	0	0.1585	0.2845
ZeroR	82,56%	0	0.1986	0.3956

Çizelge 2 incelendiğinde en düşük ortalama mutlak hata değerine sahip modelin 0.0385 değeri ile olasılıksal dereceli azaltma algoritması olan SGD ve SMO yöntemleri olduğu görülmektedir. DVM'e benzer bir şekilde çalışan algoritmaların basit ve özellik ölçmeye duyarlı olduğu düşünülmektedir. SGD ve SMO algoritması ile oluşturulan modelin sınıflandırma performansı %96,18 olup, işlem süresi 0.86 saniye olarak ölçülmüştür. SGD ve SMO yöntemlerinin birbirleri üzerinde sonuç açısından farklılığı bulunmamakla birlikte 838 adet özniteliğin, 806 adedini doğru sınıflandırdığı görülmektedir. Çalışmada en kısa sürede sonuç veren yöntem LbK yöntemi olarak belirlenmiştir. Çalışmada ReppTree algoritması en yüksek sınıflandırma performansına sahip olarak ölçülmüştür (%96,42). RepTree algoritmasının sonuçları incelendiğinde 838 örneğin 808 tanesinin doğru sınıflandırıldığı görülmüştür. RepTree, SGD, SMO algoritmaları arasında sınıflandırma performansı ve hata oranları açısından değerlendirildiğinde belirgin bir üstünlük görülmemiştir. SGDDText, NaiveBayes, MultinomialText, InputClassifier ve ZeroR algoritmalarının korelasyonel olarak diğerlerine göre daha zayıf performans gösterdiği belirlenmiştir. ZeroR modelinin en yüksek ortalama hata değerine sahip olduğu söylenebilir. Yöntemin geçerliliği açısından sınıflandırma performansına dikkat etmek gereklidir. RepTree modeline yakın sınıflandırma performansına sahip olan SGD ve SMO yöntemlerinin ortalama mutlak hata değeri daha düşük hesaplanmıştır. Bu da tahmin edilen değer ile gerçek değerlerin birbirine yakınlaştığını ve modellerin daha başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. ReppTree modelinin sınıflara göre ayrıntılı kesinlik ve duyarlılık oranları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** RepTree Algoritması Ayrıntılı sınıflandırma performansı.

	TPR	FPR	PRE	Recall	F-M	MCC	ROC	PRC	Sınıf
N	0,97	0,13	0,99	0,97	0,98	0,75	0,88	0,98	0
P	0,87	0,03	0,67	0,87	0,76	0,75	0,88	0,57	1
W. Avg	0,96	0,12	0,97	0,96	0,97	0,75	0,88	0,96	

Bu çalışmada kullanılan tüm yöntemlerde 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış olup, değerlerin değişmesi durumunda sonuçların nasıl olacağı gözlemlenmiştir. Bu sebeple ReppTree, SGD ve SMO yöntemleri üzerinde 5-40 aralığında farklı çapraz doğrulama katsayıları ve %66'ya %33 ayırımı yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Çıkan sonuçlar Çizelge 4, Çizelge 5 ve Çizelge 6'da görüntülenmektedir.

**Çizelge 4.** RepTree yöntemi için farklı çapraz doğrulama sayıları ve sonuçları.

Yöntem	SP	KI	OMH
5 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0541	0.172
10 Katlı Çapraz Doğrulama	96,42%	0.0533	0.1659
15 Katlı Çapraz Doğrulama	95,94%	0.0575	0.7614
20 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0541	0.172
25 Katlı Çapraz Doğrulama	95,82%	0.0578	0.1795
30 Katlı Çapraz Doğrulama	96.06 %	0.0558	0.1734
35 Katlı Çapraz Doğrulama	95,94%	0.0575	0.7614
40 Katlı Çapraz Doğrulama	96.06 %	0.0558	0.1734
%66'ya %33 Ayırma	95.43%	0.0568	0.1849

**Çizelge 5.** SGD yöntemi için farklı çapraz doğrulama sayıları ve sonuçları.

Yöntem	SP	KI	OMH
5 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
10 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
15 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
20 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
25 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
30 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
35 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
40 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
%66'ya %33 Ayırma	95.78%	0.6779	0.0421

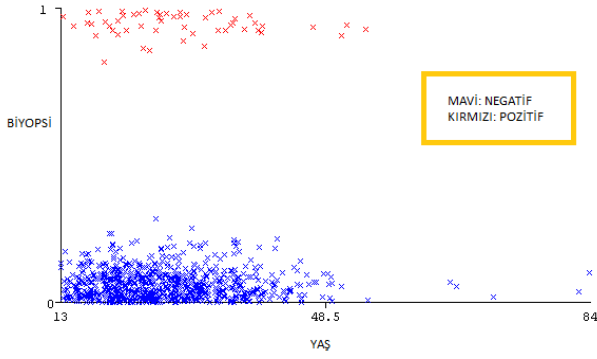
**Çizelge 6.** SMO yöntemi için farklı çapraz doğrulama sayıları ve sonuçları.

Yöntem	SP	KI	OMH
5 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
10 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
15 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
20 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
25 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
30 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
35 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
40 Katlı Çapraz Doğrulama	96,18%	0.0382	0.1954
%66'ya %33 Ayırma	95.78%	0.6779	0.0421

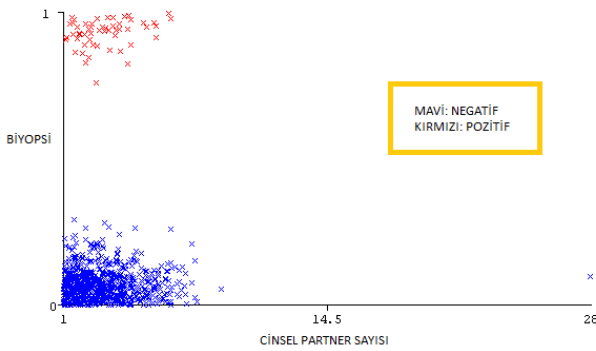
Yukarıdaki çizelgelerde yer alan sonuçlara bakıldığında en başarılı RepTree algoritmasının sonucun 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile oluşturulduğu görülmektedir. Sınıflandırma performansı bakımından 10 katlı çapraz doğrulama yöntemine en yakın sonuçlar veren 5 katlı çapraz doğrulama yöntemidir fakat korelasyonel olarak incelendiğinde 10 katlı çapraz doğrulama metodunun bu makine öğrenmesi yönteminde daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. SGD ve SMO algoritmalarının farklı katlardaki çapraz doğrulama

oranları incelendiğinde sonucun değişmediği görülmektedir. Ayrıca çapraz doğrulama katsayısının azaltılması ya da artırılması gibi yöntemlerin çalışmanın sonucunda etki göstermediği görülmektedir. Bu sebeple çalışma sonucu 10 katlı çapraz doğrulama ile hesaplanmıştır. Genel kanı bu tip çalışmalar için 10 katlı çapraz doğrulama yönteminin iyi sonuçlar verdiğidir.

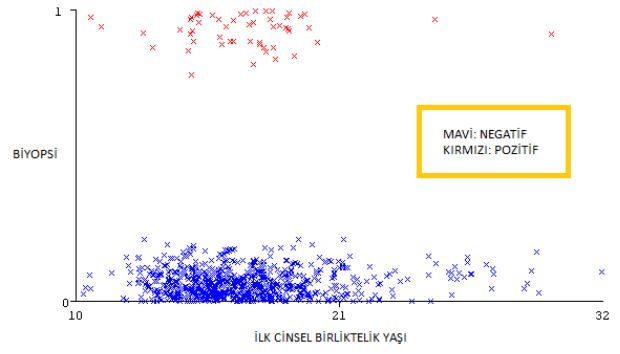
Bu çalışmanın sonucunda serviks kanserlerinin teşhisinde kullanılan risk faktörlerinin analizinde en iyi tahmin modeli olarak Random Tree yöntemi bulunmuştur. Elde edilen tahmin değerleri ve gerçek değerlerin durumunu göstermek adına her bir değişkenin hedef değişkene göre sınıflandırma performansı gösterilmiştir (Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6).



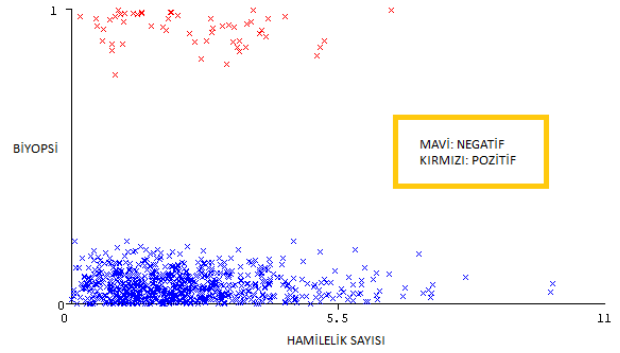
Şekil 1. Yaş/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği



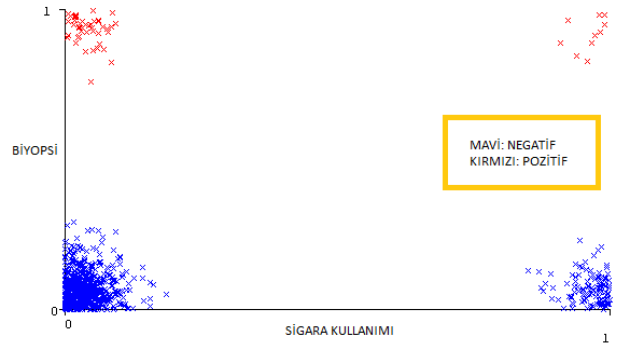
Şekil 2. Cinsel Partner Sayısı/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği



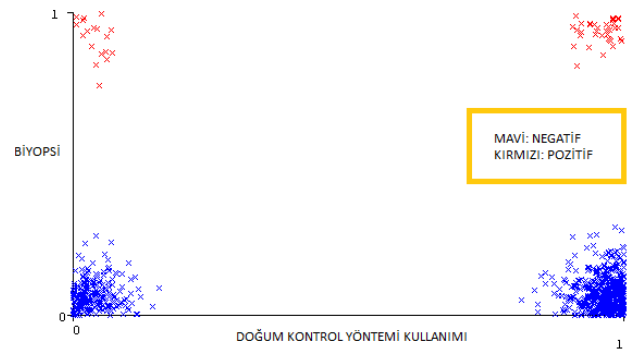
Şekil 3. İlk Cinsel Birliktelik Yaşı/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği



Şekil 4. Hamilelik Sayısı/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği



Şekil 5. Sigara/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği



Şekil 6. Doğum Kontrol Yöntemi Kullanımı/Biyopsi Sınıflandırma Grafiği

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bulgular dikkatlice incelendiğinde Cinsel Partner Sayısı, İlk Cinsel Birliktelik Yaşı, Hamilelik Sayısı, Sigara Kullanımı, Doğum Kontrol Yöntemlerinin kullanımı gibi risk faktörlerinin biyopsi sonucunun kanser çıkması ile doğrudan ilişkisinin olduğu görülmektedir. Gerçek değerler için risk faktörleri analiz edildiğinde tahminlerin ortalama %0,05'lik ortalama mutlak hata değeri ile yaklaşık %96,42 doğruluk oranında yapıldığı gösterilmektedir. Bu çalışma için karar ağacı algoritmalarının ve destek vektör makinesi yöntemlerinin genel olarak diğer makine öğrenmesi algoritmalarına göre daha doğru ve hızlı sonuçlar verdiği söylenebilir. Çalışmada kullanılan OneR, BayesNet, Lwl, DecisionStump, DecisionTable, SimpleLogistic yöntemlerinin de oldukça yüksek doğruluk oranları ile çalıştığı (%96,18) ve bu tip veri kümelerindeki çalışmalar için güvenle kullanılabilmesi düşünülmektedir. Genel olarak destek vektör makineleri tabanlı algoritmaların en yakın komşu ve karar ağaçları tabanlı yöntemlere göre daha başarılı olduğu görülmüştür.

Araştırma sonucunda daha geniş örneklem gruplarından toplanacak verilerin makine öğrenmesi yöntemlerinin başarılarını arttıracığı düşünülmektedir. Araştırma bulguları servikal kanserlerin erken teşhisinde risk faktörlerinin makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilebileceğini göstermiştir. Bu yönüyle tıp hekimlerinin makine öğrenmesi yöntemlerinden faydalanarak serviks kanseri gibi hastalıkların erken teşhisinde önemli bir ipucu yakalamaları mümkündür. Özellikle yüksek katılımlı hastalık taramalarında faydalı bir yöntem olduğu düşünülmektedir.

#### 5. Kaynaklar

Afrin, F., & Nahar, I., 2015. Incremental Learning Based Intelligent Job Search System (*Doctoral dissertation, BRAC University*).

Sarwar A., Ali M., Suri J. And Sharma V., 2015. Performance Evaluation Of Machine Learning Techniques For Screening Of Cervical Cancer, *2nd International Conference On Computing For*

*Sustainable Global Development (Indiacom)*, **2**, 880-886.

Allawi M., Jaafar O., Ehteram M., Mohamad F., El-Shafie A., 2018. Synchronizing Artificial Intelligence Models For Operating The Dam And Reservoir System. *Water Resour Manage* **32**, 3373– 3389.

Alpaydın E., 2004. Introduction To Machine Learning. *The Mit Press*, 1-15.

Aydoğdu S., Özsoy Ü., 2018. Serviks kanseri ve HPV, *Kadın Cinsel Sağlığı*, **20**, 25–29.

Durmaz, S , Ozvurmaz, S , Adana, F , Kurt, F . ,2021. Kadınlarda Serviks Kanserinin Tanısına İlişkin Tutum ve Düzenli Jinekolojik Muayene İlişkisinin Kesitsel Olarak Değerlendirilmesi. *Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Dergisi* , **5 (1)** , 26-36.

Erkaymaz E., Palabaş T., 2018. Classification Of Cervical Cancer Data And The Effect Of Random Subspace Algorithms On Classification Performance, *Signal Processing And Communications Applications Conference*, **26**, 1-4.

Good, I. J., 1965. The Estimation Of Probabilities: An Essay On Modern Bayesian Methods. *M.I.T. Press 1965* , **30**, 182-199.

Gök, S. , Gök, B. , Ceylan D. A. , 2021. HPV-16/18 pozitif kadınların takibinde kolposkopi eşliğinde alınan servikal biyopsinin önemi. *Pamukkale Tıp Dergisi* , **14(1)**, 253-261.

Gözüyeşil, E. , Ariöz, D. , Ünal, K. , 2019. Kadınların Serviks Kanserinden Korunma Ve Erken Tanıya Yönelik Tutumlarının Değerlendirilmesi. *Sted / Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi* , **28 (4)** , 229-238.

Sun, G., Li S., Cao Y., Lang F., 2017. Cervical Cancer Diagnosis Based On Random Forest. *Int J Performability Eng*, **13(4)**, 446-457.

Güner, H., Taşkiran, Ç., 2007. Serviks Kanseri Epidemiyolojisi Ve Human Papilloma Virüs. *Türk Jinekoloji Ve Obstetri Derneği Dergisi* **4(1)**,11-19.

Hacıbeyoğlu, M., Karakoyun, M., 2014. Biyomedikal Veri Kümeleri İle Makine Öğrenmesi Sınıflandırma Algoritmalarının İstatistiksel Olarak Karşılaştırılması. *Deü Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri*, **16**, 30-41

Huang, J., Lu, J., Ling, C.X, 2003. Comparing Naive Bayes, Decision Trees, And Svm With Auc And Accuracy, *Third Ieee International Conference On Data Mining*, 553–556.

- Kanbur, A., Çapık, C., 2011. Servikal Kanserden Korunma, Erken Tanı-Tarama Yöntemleri Ve Ebe/Hemşirenin Rolü. *Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Fakültesi Hemşirelik Dergisi*, **18 (1)** 61-72.
- Karkalos, N., Efkolidis, N., Kyratsis, P., Markopoulos, A. , 2019. A Comparative Study Between Regression And Neural Networks For Modeling Al6082-T6 Alloy Drilling. *Machines* **7(1)**,13.
- Kolay, N., Erdoğan, P., 2016. The Classification Of Breast Cancer With Machine Learning Techniques. *In Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting*, **1**, 1-4.
- Kretschmann, E., Fleischmann, W. , Apweiler R., 2001. Automatic rule generation for protein annotation with the C4.5 data mining algorithm applied on SWISS-PROT. *Bioinformatics*, **17**, 920–926.
- Li, J., Liu, H., Ng, S.K. and Wong, L. , 2003. Discovery of significant rules for classifying cancer diagnosis data. *Bioinformatics*, **19**, 93–102.
- Lu, L. , Zhu, Z., 2014. Prediction Model For Eating Property Of Indica Rice. *Journal Of Food Quality*, **37**, 274-280.
- Lu, W., Wang, W., Leung, A., Lo, S., Yuen, R., Xu, Z. And Fan., H., 2002. Air Pollutant Parameter Forecasting Using Support Vector Machines. *In Proceedings Of The 2002 International Joint Conference On Neural Networks*. **1**, 630-635.
- Malhotra, M., Sharma, S. and Nair, S. S. , 1999. Decision Making Using Multiple Models. *European Journal Of Operational Research*, **114**, 1-14.
- Quinlan, J. R., 1993. C4.5: Programs For Machine Learning. Morgan Kaufmann Publishers, 110-116.
- Sevli, O., 2019. Göğüs Kanseri Teşhisinde Farklı Makine Öğrenmesi Tekniklerinin Performans Karşılaştırması. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, **16**, 176-185.
- Sonay Kurt A, Canbulat N, Savaşer S., 2013. Adölesan Dönem Cinselliğiyle Öne Çıkan Serviks Kanseri Ve Risk Faktörleri. *Bakırköy Tıp Dergisi*, **9**, 59–63.
- Şeker, S. E., 2016. Weka ve veri madenciliği, Draft2Digital Yayıncılık, **1**, 18-27.
- Tobler, J.B., Molla, M.N., Nuwaysir, E.F., Green, R.D. and Shavlik, J.W., 2002. Evaluating machine learning approaches for aiding probe selection for gene-expression arrays. *Bioinformatics*, **18**, 164–171.
- Tseng, C., Lu, C., Chang, C. Et Al. , 2014. Application Of Machine Learning To Predict The Recurrence-Proneness For Cervical Cancer. *Neural Comput & Applic*, **24**, 1311–1316.
- Türkmen, A. S. , Canbulat Şahiner, N., Savaşer, S. , 2013. Adölesan Dönem Cinselliğiyle Öne Çıkan Serviks Kanseri Ve Risk Faktörleri. *Bakırköy Tıp Dergisi*, **2**, 59-63.
- Uludağ, G. , Gamsızkan, Z. and Sungur, M. A. , 2020. Kadınların Serviks Kanseri ve Taraması İle İlgili Sağlık İnançlarının Değerlendirilmesi . *Düzce Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi* , **10 (3)** , 357-362.
- Vapnik, V., 1995. The Nature Of Statistical Learning Theory. *Springer*, 57-75.
- World Health Organization, 2019. Human papillomavirus (HPV) and cervical cancer. Retrieved from [https://www.who.int/en/newsroom/factsheets/detail/human-papillomavirus-\(hpv\)-and-cervical-cancer](https://www.who.int/en/newsroom/factsheets/detail/human-papillomavirus-(hpv)-and-cervical-cancer) (18.07.2021)
- World Health Organization, 2018. *Global Cancer Observatory*. Retrieved from: <http://gco.iarc.fr/> (18.07.2021)

# Home-Based Working During Covid-19 Pandemic: Experience of Turkish Software Professionals

Gül TOKDEMİR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çankaya Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara

Corresponding Author e-mail: gtokdemir@cankaya.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2441-3056>

Geliş Tarihi: 01.05.2021

Kabul Tarihi: 29.09.2021

## Abstract

### Keywords

Software professionals;  
Covid-19 pandemic;  
Home-based working;  
Perceived productivity

This study explores the home-based working experience of software professionals during Covid-19 pandemic. Through an online survey, it examines the challenges of home based working in relation to characteristics of such work settings. Furthermore, it investigates the relation between home-based working characteristics and self-reported productivity via bivariate analysis. The results of this study show that it was mostly easy to adopt to the home-based new work setting while most of the software practitioners stated that they worked longer hours during the pandemic period. Housework and kids were reported as the two primary interruptions in home based setting. Additionally, afternoons and mornings were mentioned as the most productive work intervals for software professionals.

## Covid-19 Salgını Sırasında Evden Çalışma: Türk Yazılım Profesyonellerinin Deneyimleri

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Yazılım uzmanları;  
Covid-19 pandemisi;  
Evden çalışma;  
Algılanan verimlilik

Bu çalışma, Covid-19 salgını sırasında yazılım profesyonellerinin evden çalışma deneyimlerini araştırmaktadır. Bir anket aracılığıyla, bu tür çalışma ortamlarının özellikleriyle ilişkili olarak evden çalışmanın zorlukları incelenmiştir. Ayrıca, iki değişkenli analiz yoluyla, ev tabanlı çalışma özellikleri ile üretkenlik arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, yazılım profesyonellerinin pandemi döneminde daha uzun saatler çalıştıklarını ve evden çalışma ortamına adapte olmanın çoğunlukla kolay olduğunu göstermektedir. Evden çalışma ortamlarında ev işleri ve çocukların en önemli kesinti nedeni olduğu bildirilmiştir. Ayrıca yazılım profesyonelleri için öğleden sonraları ve sabahların en verimli çalışma aralıkları olduğu belirtilmiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Introduction

Software development process requires concentration and independent working for long hours (Meyer *et al.* 2019). Accordingly, interruptions in work environments during these extended working periods may occur, which result in nonproductive outputs such as increase in anxiety, error rate and decrease in performance.(Mark *et al.* 2008, Parnin and Rugaber 2011, Bailey *et al.* 2000). Especially, distractions as short interval interruptions result in negative mental states associated with annoyance, anxiety, frustration, and hence bring augmented levels of

possible errors, stress, pressure related to cost and time (Adamczyk and Bailey 2004, Cutrell *et al.* 2000, Mark *et al.* 2008).

In general, interruption disturb the flow of the activities, and the status of concentration whilst performing a software development task, which negatively affects productivity in parallel (Meyer *et al.* 2017). Besides interruptions, work environment factors also affect the level of performance; in relevant literature, it is acknowledged that factors such as layout, distance between offices, privacy level, control of heating, lighting, ventilation, and noise, workspace density, architecture, and light do



have a role in manifested volatility of performance (Leaman and Bordass 1999, Oldham 1988). From a similar point of view, and regarding the software development process, DeMarco and Lister revealed that there is a correlation between work environment factors and software developer performance (DeMarco and Lister 1985).

Focusing on recent times, primarily on Covid-19 pandemic, as many knowledge workers in diverse sectors, software professionals started working from home, sharing the same environment with other family members during working days. As expected, this experience posed new challenges in software professionals' daily work activities.

In this sense, this study aims to explore the characteristics of home-based work setting of software professionals during Covid-19 pandemic and furthermore intends to bring a widened perspective on software professionals' home-based working and self-reported productivity during this pandemic.

In this respect, the study elaborates on previous studies, and through a survey, provides valuable insights to management of the software companies and software professionals in reducing the undesirable effects of crisis situations on software professionals' work performance by the analysis of its outcomes.

## 2. Background

The nature of software development process requires long hours of concentration (Meyer *et al.* 2019). In this respect, work environments/settings, planning of working hours, allocation of resources, team working dynamics, co-worker relationships, interruptions/distractions are all crucial factors for software professionals. These factors influence performance of software professionals and affect levels of productivity in their work tasks.

Recently, due to Covid-19 pandemic and the changing nature of work settings, the importance of these factors have been highlighted more often and attracted more attention from relevant literature as strict measures taken for Covid-19 pandemic forced software professionals to start working from home,

i.e. remote work or telework, sharing the same environment with other members of the family, partners, etc. during working hours. As expected, this situation posed new challenges in software professionals' daily work activities.

Working away from regular office place, from anywhere, is termed as remote work or telework. In remote work, employees may work from any location as long as they have a persistent internet connectivity. This way of working has several advantages for professionals, besides its challenges.

For example, telework is found to reduce stress and hence improve positive work outcomes (Conradie and de Klerk 2019). Golden and Veiga mentioned in their study that working from home may result in improved productivity as employees face less distraction caused by co-workers (Golden and Veiga 2008).

On the other hand, it is acknowledged that this way of working has a tendency to increase stress levels of professionals as they try to keep in place the boundaries already settled previously between work and family responsibilities, though disappearing in these new work settings (Hill *et al.* 1998). As working hours are not clearly defined in telework settings, work and private life domains may overlap resulting in challenges (Raghuram and Wiesenfeld 2004), accordingly reducing limited resources of the individuals, cycle wise resulting in adverse outcomes such as stress, anxiety or burnout. Thus, telework/remote working arrangements is considered as a challenge in managing time, and separating work and private life (IOSH, 2014)(IOSH, 2014)(IOSH, 2014)(IOSH, 2014) and professional duties (Nakrošienė *et al.* 2019) during daytime. In addition, it may cause frequent interruptions and working longer hours (Johnson *et al.* 2007).

And consequently, telework or remote work, especially in the case of home based working during Covid-19 pandemic, increased the number of interruptions for software professionals, a situation which is to be considered as a negative effect for workers as interruptions in work environment may result in less productive outputs such as increase in

anxiety, error rate and decrease in performance (Mark *et al.* 2008, Parnin and Rugaber 2011, Bailey *et al.* 2000).

In general, information workers of both small and large scale organizations have to implement multitasking, work in multiple teams and projects (González and Mark 2004) which may cause several interruptions during the daily work activities. This may result in the probability of making mistakes in a task performed that causes repeating the task or totally skipping it (Brumby *et al.* 2013, Li *et al.* 2008) and affect stress and productivity of knowledge workers (Czerwinski *et al.* 2004, Mark *et al.* 2016). The interruption that occurs at an unexpected point during the execution of a task may cause negative effects (Iqbal *et al.* 2005) usually reducing attention paid for the task at hand (Kushlev *et al.* 2016). Reduction in productivity because of interruptions such as unavoidable task switching is shown by a field study, which may be caused by depletion of cognitive resources, the redundancy of work in returning back to the task (Mark *et al.* 2015).

Factors related to work environment may also affect the level of performance in daily work activities. In related studies, it is acknowledged that layout, distance between offices, privacy level, control of heating, lighting, ventilation, and noise, workspace density, architecture, and light do have a role in manifested volatility of performance (Leaman and Bordass 1999, Oldham 1988).

Regarding productivity, software engineering research showed remarkable interest in how to improve levels of productivity; contributing factors and their effects in software processes (Palvalin 2017, Wagner and Murphy-Hill 2019). In general, not specific to Covid-19 pandemic, productivity is perceived as a concept that is difficult to express by both researchers and experts (Sadowski *et al.* 2019) for software development. In software development process though, it is a key issue ensuring that resources are utilized effectively and efficiently for the desired software product.

Previous research explored factors effecting productivity of software professionals where several drivers of productivity are listed for

knowledge workers such as physical environment, virtual environment, social environment and individual work practices (Palvalin 2017) and specifically for software professionals as well (Wagner and Murphy-Hill 2019). One of the factors is identified as uninterrupted time for the task (DeMarco and Lister 2013). In their comparative study, Parnin and Rugaber mentioned that resuming tasks after interruption is a serious problem for software workers (Parnin and Rugaber 2011). The physical work environment is another important factor affecting productivity of software professionals (DeMarco and Lister 1985).

As software development includes high level of complex activities demanding high concentration, improving physical work environments is expected to enhance productivity. In their multiple step research at Microsoft, Johnson *et al.* (2019) found that having a work environment free from interruptions is an important factor for productivity.

In the recent years, companies expect software workers to dedicate longer working hours, handle heavier workloads, and work overtime (Meyer *et al.* 2017). Usually, software professionals work at uneven hours. Non-stop work schedule for a duration of two hours, without any break, causes performance to reduce abruptly (Rodriguez *et al.* 2018). Performance of the developers' peaks in the evening (before midnight) and then drops after the day changes. Developers may feel to possess more resources to complete a task energetically in specific times of the day. Some developers feel more dynamic in the early morning while others in normal working periods (Tsunoda *et al.* 2006). Productivity degrades in the early morning and subsequent long working periods (Harrington 2001).

Within the boundaries of the key components for productivity as mentioned above, we studied pandemic forced home-based working characteristics and self-reported productivity of software professionals. In that respect we explored the home-based working factors (i.e. easy adaptation to home-based working, giving enough breaks, being disturbed during the home-based working, technical infrastructure issues, working more compared to past and having interruptions in

the home-based working environment), preferred working times, interruptions and perceived productivity for the software professionals during Covid-19 pandemic.

### 3. Method

#### 3.1 Participants

A total of 321 participants were enrolled in the study. All participants were software professionals working at different companies in Turkey. Within our method of analysis, the exclusion criteria were: (1) full-time home-based workers (2) repeated responses from the same participant (3) non-home-based workers.

#### 3.2 Research procedure

A qualitative research design was used for this study. A survey was sent to participants via social networking channels in order to gather their perception about productivity, work pressure and home-based working arrangement. Ethical committee report was obtained from Çankaya University Science and Engineering Sciences Scientific Research and Publication Ethics Committee that covers informed consent form, and the samples of the data collection tools.

In total, 362 participants completed the survey. 321 valid feedbacks were collected and analyzed through SPSS software. The variables were namely; home-based working factors, namely, easy adaptation to home-based working, giving enough breaks, being disturbed, having infrastructure issues, working more, having interruptions and self-reported productivity. All variables were categorical. To explore the relationships between output and independent variables, bivariate analysis with chi square test was applied and significance was checked ( $p \leq .005$ ).

#### 3.3 Variables

In the survey, we asked participants questions about home-based working characteristics with 2 level answer “yes” or “no”. Answers to the following questions were collected for home-based working experience during pandemic: easy adaptation to home-based working (*easyAdaptationtoHome*

*Work*), “It was easy to adopt to home-based working during pandemic”; giving enough breaks (*giveEnoughBreaks*) “I give enough breaks during home-based working”, being disturbed (*beingDisturbed*) “I am being disturbed during home-based working”; having infrastructure issues (*InfrastructureIssues*), “I experience infrastructural problems in home-based working”; working more (*workingMore*) “I am working more compared to past”; having interruptions (*haveInterruptions*) “I have to handle interruptions during home-based working”. Similarly, for self-reported productivity, we asked: “I am more productive during home-based working period compared to past” with 2 level answer “yes” or “no”. Additionally, types of interruptions software professionals experienced (Figure 1) and their productive working time intervals were collected through multi-level questions.

### 4. Results

Among participants, around one third of the participants (69%) were males and 48% were single. 63% did not have any children and only 21% of all participants were living alone (Table 1).

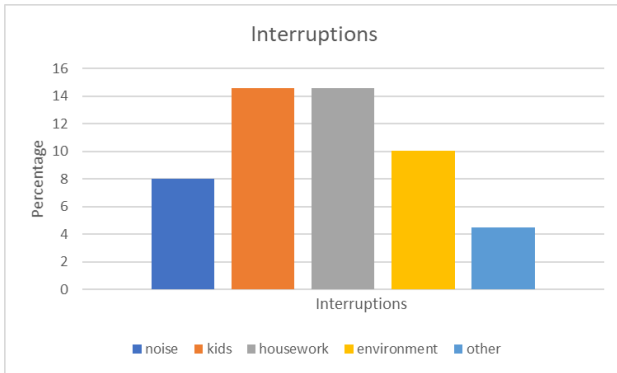
**Table 1.** Demographics of the participants

Variable (n)	n	%
Gender		
male	220	68.5
female	101	31.5
Marital status		
single	155	48.3
married	151	47.0
other	15	4.7
Children		
None	203	63.2
at least 1	118	36.8
Home living		
alone	68	21.2
not alone	253	78.9

Based on survey results, most of the software professionals (85%) reported to adopt to this new working arrangement easily. 26% of the respondents experienced problems related to the infrastructure during home-based working. 75% of the software professionals were being disturbed during their working periods at home and 40% experienced interruptions during their daily work tasks. While 74% reported to give enough work

breaks during their daily tasks, 63% reported working more compared to their previous usual work settings within office environments (Figure 2).

Regarding productivity concern at homes, results showed that those who adopted to the home-based working setting easily, reported to be more productive.

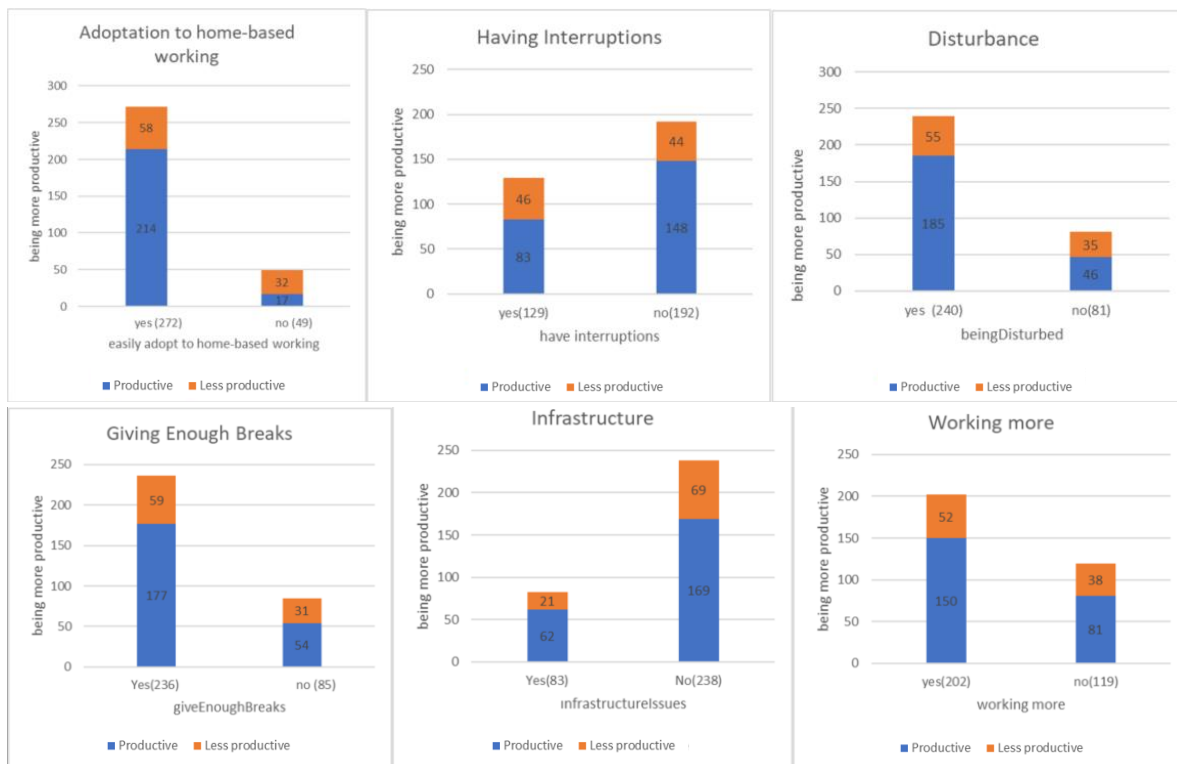


**Figure 1.** Interruption types during Covid-19 home-based working.

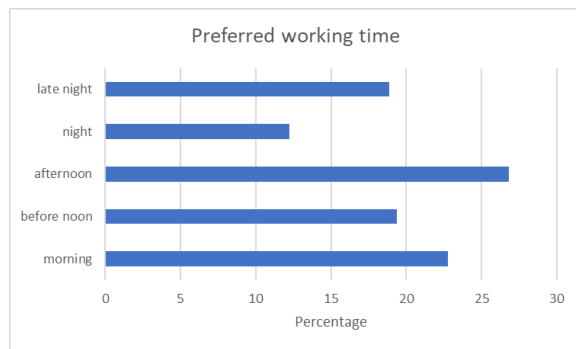
productive work time is firstly afternoon hours, and morning hours which is followed by mornings (Figure 3). On the other hand, in terms of interruptions housework and kids were reported as the two leading interruptions in home based settings (Figure 1).

The two-way Chi-square test with two variables resulted in correlation values as given in Table 2. According to the results of the two-way Chi-square test with two variables, there is a significant relationship between self-reported productivity and variables of *easyAdaptationtoHomeWork* ( $X^2(1, N = 321) = 39.81, p < .000$ ), *giveEnoughBreaks* ( $X^2(1, N = 321) = 38.59, p < .000$ ), *beingDisturbed* ( $X^2(1, N = 321) = 12.361, p < .000$ ), *infrastructureIssues* ( $X^2(1, N = 321) = 17.23, p < .000$ ), *haveInterruptions* ( $X^2(1, N = 321) = 8.52, p < .004$ ).

In terms of preferred working time intervals, software professionals reported that their most



**Figure 2.** Examining the types of interruptions software professionals handled during their work day, mostly they were arising from kids and routine housework.



**Figure 3.** Preferred working time during Covid-19 home-based working.

The results of the two-way Chi-square test with two variables also revealed that, there is no significant relationship between self-reported productivity and *workingMore* variable.

**Table 2.** Correlations between independent variables and self-reported productivity.

Variable (n)	%	morePro ductive	less productive	p*	Pearson Chi Square <sup>a</sup>
<i>easyAdaptationtoHomeWork</i>					
yes (272)	84.7	214	58	.000	39.8
no (49)	15.3	17	32		
<i>giveEnoughBreaks</i>					
yes(236)	73.5	177	59	.000	326.1
no (85)	26.5	54	31		
<i>beingDisturbed</i>					
yes (240)	74.8	185	55	.000	12.4
no(81)	25.2	46	35		
<i>infrastructureIssues</i>					
Yes(83)	25.9	62	21	.000	322.4
No(238)	74.1	169	69		
<i>haveInterruptions</i>					
yes(129)	40.2	83	46	.000	328.2
no(192)	59.8	148	44		
<i>workingMore</i>					
yes(202)	62.9	150	52	.233	1.4
no(119)	37.1	81	38		

<sup>a</sup>Chi square test and fishers' exact test

### 5. Discussion and Conclusion

Due to strict Covid-19 pandemic measures, though country wide measures showed an alteration around the world, the common case was that mostly work settings were houses for software professionals and thus home based working was considered as the only ideal setting in general. Hence this study intended to explore the software professionals' home-based working experience and their self-reported productivity during pandemic forced home-based arrangement. For this purpose, the study examined the characteristics of home-based working including; adaptation, breaks, being

disturbed during the home-based working, infrastructure issues, working hours, interruptions and productivity in the working environment through an online survey conducted via social media platforms of software professionals.

Responses of software professionals show that adoption to the new work setting due to pandemic was mostly easy for software professionals, yet they still had to handle interruptions, that increased in frequency mainly as a result of working in an environment shared with all family members.

In terms of working hours, most of the software practitioners reported that they worked longer hours during this pandemic period. Two main underlying reasons appeared to be dominant for this case could be the difficulty in balancing work and life responsibilities in home-based settings and in relation, the increased amount of work load in comparison to pre-Covid usuals accordingly.

Furthermore, in terms of interruptions housework and kids were reported as the two primary ones in home based settings. It is well acknowledged that being at home with all the family members brings in extra responsibilities during work hours. Consequently, switching between work and house responsibilities may diminish the resources an individual possesses and hence may result in stress and low work performance. When individuals experience work-life imbalance, they may suffer from critical consequences such as low satisfaction (Mesmer-Magnus and Viswesvaran 2005), deteriorated health and wellbeing (Allen *et al.* 2000) and low performance at work (Gilboa *et al.* 2013), all of which naturally have impacts on productivity within every aspect of works carried out.

Additionally, focusing on productivity during work intervals, afternoons and mornings were reported as the most productive work intervals for software professionals. Working late at nights was mentioned to be less productive.

The results of the feedbacks furthermore show that productivity is correlated with software professionals' easy adaptation to home-based working, giving enough breaks, being disturbed

during the home-based working, infrastructure issues, and having interruptions in the home-based working environment.

This study sheds light into fundamental challenges of software professionals in home based working settings. And as of practical implications, above mentioned findings represent only a small portion of issues software company management teams and/or professionals should consider in order to enhance performance and productivity.

Thus, while limitations do exist, it is believed that a deeper understanding of home-based work setting characteristics could guide software professionals for better home-based work setting experience.

## 6. References

- Adamczyk, P. D., and Bailey, B. P., 2004. If not now, when? *Proceedings of the 2004 Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '04*, 271–278.
- Allen, T. D., Herst, D. E., Bruck, C. S., and Sutton, M., 2000. Consequences associated with work-to-family conflict: a review and agenda for future research. In *Journal of occupational health psychology*, **5**, 2, 278–308.
- Bailey, B. P., Konstan, J. A., and Carlis, J. V., 2000. Measuring the effects of interruptions on task performance in the user interface. *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, **2**, 757–762.
- Brumby, D. P., Cox, A. L., Back, J., and Gould, S. J. J., 2013. Recovering from an interruption: Investigating speed-accuracy trade-offs in task resumption behavior. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **19**(2), 95–107.
- Conradie, W. J., and de Klerk, J. J., 2019. To flex or not to flex? Flexible work arrangements amongst software developers in an emerging economy. *SA Journal of Human Resource Management*, **17**(1), 1-12.
- Cutrell, E. B., Czerwinski, M., and Horvitz, E., 2000. Effects of instant messaging interruptions on computing tasks. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 99–100.
- Czerwinski, M., Horvitz, E., and Wilhite, S., 2004. A diary study of task switching and interruptions. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 175–182.
- DeMarco, T., and Lister, T., 1985. Programmer Performance and the Effects of the Workplace. *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, 268–272.
- DeMarco, T., and Lister, T., 2013. *Peopleware: Productive Projects and Teams*, 3rd ed.. Addison-Wesley Professional.
- Gilboa, S., Shirom, A., Fried, Y., and Cooper, C. L., 2013. A Meta-Analysis of Work Demand Stressors and Job Performance: Examining Main and Moderating Effects. In *From Stress to Wellbeing*, **1**, 188–230.
- Golden, T. D., and Veiga, J. F., 2008. The impact of superior-subordinate relationships on the commitment, job satisfaction, and performance of virtual workers. *Leadership Quarterly*, **19**(1), 77–88.
- Harrington, J. M., 2001. Health effects of shift work and extended hours of work. In *Occupational and Environmental Medicine*, **58**, 1, 68–72.
- Hill, E. J., Miller, B. C., Weiner, S. P., and Colihan, J., 1998. Influences of the Virtual Office on Aspects Of Work And Work/Life Balance. *Personnel Psychology*, **51**(3), 667–683.
- Iqbal, S. T., Adamczyk, P. D., Zheng, S., and Bailey, B. P., 2005. Towards an Index of Opportunity: Understanding Changes in Mental Workload during Task Execution. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '05*.
- Johnson, B., Zimmermann, T., and Bird, C., 2019. The Effect of Work Environments on Productivity and Satisfaction of Software Engineers. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1–1.
- Kushlev, K., Proulx, J., and Dunn, E. W., 2016. “Silence your phones”: Smartphone notifications increase inattention and hyperactivity symptoms. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 1011–1020.

- Leaman, A., and Bordass, B., 1999. Productivity in buildings: The “killer” variables. *Building Research and Information*, **27**(1), 4–19.
- Li, S. Y. W., Blandford, A., Cairns, P., and Young, R. M., 2008. The Effect of Interruptions on Postcompletion and Other Procedural Errors: An Account Based on the Activation-Based Goal Memory Model. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **14**(4), 314–328.
- Mark, G., Gudith, D., and Klocke, U., 2008. The cost of interrupted work: More speed and stress. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 107–110.
- Mark, G., Iqbal, S., Czerwinski, M., and Johns, P., 2015. Focused, aroused, but so distractible: A temporal perspective on multitasking and communications. *CSCW 2015 - Proceedings of the 2015 ACM International Conference on Computer-Supported Cooperative Work and Social Computing*, 903–916.
- Mark, G., Iqbal, S. T., Czerwinski, M., Johns, P., and Sano, A., 2016. Email duration, batching and self-interruption: Patterns of email use on productivity and stress. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, 1717–1728.
- Mesmer-Magnus, J. R., and Viswesvaran, C., 2005. Convergence between measures of work-to-family and family-to-work conflict: A meta-analytic examination. *Journal of Vocational Behavior*, **67**(2), 215–232.
- Meyer, A., Barr, E. T., Bird, C., and Zimmermann, T., 2019. Today was a Good Day: The Daily Life of Software Developers. *IEEE Transactions on Software Engineering*, **47**(5), 863 - 880.
- Meyer, A. N., Barton, L. E., Murphy, G. C., Zimmermann, T., and Fritz, T., 2017. The Work Life of Developers: Activities, Switches and Perceived Productivity. *IEEE Transactions on Software Engineering*, **43**(12), 1178–1193.
- Oldham, G. R., 1988. Effects of Changes in Workspace Partitions and Spatial Density on Employee Reactions: A Quasi-Experiment. *Journal of Applied Psychology*, **73**(2), 253–258.
- Palvalin, M., 2017. How to measure impacts of work environment changes on knowledge work productivity – validation and improvement of the SmartWoW tool. *Measuring Business Excellence*, **21**(2), 175–190.
- Parnin, C., and Rugaber, S., 2011. Resumption strategies for interrupted programming tasks. *Software Quality Journal*, **19**(1), 5–34.
- Raghuram, S., and Wiesenfeld, B., 2004. Work-nonwork conflict and job stress among virtual workers. *Human Resource Management*, **43**(2–3), 259–277.
- Rodriguez, A., Tanaka, F., and Kamei, Y., 2018. Empirical study on the relationship between developer’s working habits and efficiency. *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, 74–77.
- Tsunoda, M., Monden, A., Kakimoto, T., Kamei, Y., and Matsumoto, K. I., 2006. Analyzing OSS developers’ working time using mailing lists archives. *Proceedings - International Conference on Software Engineering*, 181–182.
- Wagner, S., and Murphy-Hill, E., 2019. Factors That Influence Productivity: A Checklist. In: Sadowski C., Zimmermann T. (eds) Rethinking Productivity in Software Engineering. Apress, Berkeley, CA, 69–84.

### 6.1. Internet References

- IOSH., 2014. Home office, mobile office. *iosh*, 17. <https://www.iosh.com/media/1507/iosh-home-office-mobile-office-full-report-2014.pdf>

# Uydu İmgelerine Derin Öğrenme Tabanlı Süper Çözünürlük Yöntemlerinin Uygulanması

Ayşe CENGİZ<sup>1</sup>, Derya AVCI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Elazığ.

Sorumlu yazar, e-posta: aayscengiz@gmail.com  
davci@firat.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3829-3243>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9708-3425>

Geliş Tarihi: 28.11.2020

Kabul Tarihi: 12.10.2021

## Öz

Askeri ve sivil hayatta önemli tüm uygulamalar için kullanılan görüntünün çözünürlüğünün yüksek olması çok önemlidir. Uydu imgeleri barındıran çalışmalarda süper çözünürlük ile iyileştirilmiş imgelerin kullanımı bina tespiti gibi uygulamalarda gereklidir. Düşük çözünürlüklü görüntünün giriş olarak verildiği süper çözünürlük algoritmalarında çeşitli iyileştirme adımları neticesinde çıktı olarak yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilir. Bu çalışmada kullanıma açık uydu görüntülerinden alınan 6 sınıfa ayrılmış toplam 900 imge üzerinde, derin öğrenme tabanlı evrimsel sinir ağları ile süper çözünürlük iyileştirilmesinin performansı analiz edilmiştir. Veri seti üzerinde derin öğrenme için test ve eğitim verileri ayrılmıştır. Verilere DenseNet201, SqueezeNet, Vgg16 olmak üzere toplam 3 derin öğrenme mimarisi ayrı ayrı uygulanmıştır. Süper çözünürlük adımı öncesinde ve sonrasında doğru sınıflandırılmış veri oranının kontrolü için evrimsel sinir ağları uygulanmıştır. Sınıflandırma sonuçları karşılaştırılmış, sınıflandırma sonucunda evrimsel sinir ağları öğrenme özellikleri süper çözünürlük sayesinde iyileştirilmiştir. Sınıflandırılma başarısı 6 sınıflandırılma mimarisi için en düşük %2,4 ve en yüksek %3,6 oranında artırılmış olduğu kanıtlanmıştır.

## Anahtar kelimeler

Süper Çözünürlük;  
Evrimsel Sinir Ağları;  
Derin Öğrenme;  
Softmax

## Application of Deep Learning Based Super Resolution Methods To Satellite Images And Improvement Of Images

### Abstract

High resolution of the image used for all important applications in military and civil life is very important. In works with satellite images, the use of images enhanced with super resolution is necessary in applications such as building detection. In the super resolution algorithms where the low-resolution image is given as input, high resolution image is obtained as a result of various improvement steps. The performance of super resolution improvement with deep learning based convolutional neural networks on 900 images taken from available satellite images was analyzed. Test and training data are reserved for deep learning on the dataset. A total of 3 softmax functions (DenseNet201, SqueezeNet, Vgg16) were applied to the data separately. Evolutionary neural networks were applied to control the number of correctly classified data before and after the super resolution step. The classification results are compared and as a result of the classification, the learning properties of the convolutional neural networks are increased by super resolution. Classification success has proven to be increased by the lowest 2.4% and the highest 3.6% for the 6 classification architectures.

### Keywords

Super Resolution;  
Convolutional Neural  
Network; Deep  
Learning; Softmax

### 1. Giriş

Nihai Uydu görüntüleri günümüzde adres sorgulama, alan inceleme, şehir planlama, tarım gibi birçok alanda aktif kullanılmaktadır. Dünya'nın topografik ölçümlerini mümkün kılan büyük miktarda yüksek çözünürlüklü (uzamsal çözünürlük)

uydu görüntüleri uydular sayesinde elde edilmiştir. Bununla birlikte, yüksek uzamsal çözünürlüğe sahip uydu görüntüleri, görüntü sınıflandırmada birçok sorun ortaya çıkarmaktadır. Mekansal çözünürlüğün artmasıyla birlikte, dünya yüzeyinde bulunan daha fazla ayrıntı uydu görüntülerinde ortaya çıkmakta ve



aynı tür sahnelerde yer alan nesnelere, yüksek çözünürlükteki görüntüler arasında farklı ölçeklerde ve oryantasyonlarda görülebilmektedir.

Uydu imgelerine yakınlaştırma yapılırken çözünürlük düştüğü için net görüntü elde etmek zordur ve düşük çözünürlükte görüntü kalitesi azaldığı için sınıflandırma yapıldığı zaman iyi bir performans elde edilemez. Düşük çözünürlükte yanlış sınıflandırma yapılması önlenemeyeceği için önce imge çözünürlüğü artırılmalı ve sonra sınıflandırma işlemi yapılmalıdır. Süper çözünürlük (SR) aynı görüntünün bir veya daha çok düşük çözünürlüklü halinden yüksek çözünürlüklü görüntüleri elde etme yöntemidir. Süper çözünürlük yüksek piksel yoğunluğuna sahiptir. Çözünürlüğü artan imgelerin doğru sınıflandırılma oranı artmaktadır (Chopade ve Patil 2015).

Son yıllarda, yüksek çözünürlüklü görüntünün yeniden yapılandırılması için birçok yeni algoritma önerilmiştir. Görüntünün tek kare süper çözünürlüğü için ana yaklaşımlardan biri, düşük frekanslı görüntüden yüksek frekanslı bilgilerin çıkarıldığı ve ilk görüntüde ayrıntılı bilgi için tahminin yapıldığı görüntünün enterpolasyonudur (Chopade ve Patil 2015).

Süper çözünürlük için ayrıntıları eklemeyen piksel sayısını artıran standart enterpolasyon tekniklerine (piksel replikasyonu, bilinear, bi-kübik, lineer enterpolasyon) dayanan birçok yöntem mevcuttur. Görüntü önceliklerine göre, tek görüntü süper çözünürlük algoritmaları dört tipe kategorize edilebilir. Bunlar tahmin modelleri, kenar tabanlı yöntemler, görüntü istatistiksel yöntemleri ve yama tabanlı (veya örnek tabanlı) yöntemlerdir. Bu yöntemler Yang vd. (2014) çalışmasında kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Bunlar arasında, örnek tabanlı yöntemler (Glasner vd. 2009, Kim vd. 2010, Timofte vd. 2013, Yang vd. 2013) en gelişmiş performansa ulaşmaktadır. Dahili örnek tabanlı yöntemler öz-benzerlik özelliğinden yararlanır ve giriş görüntüsünden örnek yamalar oluşturur. İlk olarak Glasner vd. (2009) çalışmasında uygulamayı hızlandırmak için bazı geliştirilmiş varyantlar (Freedman ve Fattal 2011,

Yang vd. 2010) önerilmektedir. Harici örnek tabanlı yöntemler (Timofte vd. 2013, Bevilacqua vd. 2012, Chang vd. 2004, Dai vd. 2015, Freeman vd. 2000, Schuler vd. 2015, Yang vd. 2012, Yang vd. 2008, Yang vd. 2010, Zeyde vd. 2012) harici veri kümelerinden düşük / yüksek çözünürlüklü yamalar arasında bir harita öğrenir. Seyrek kodlama temelli yöntem ve çeşitli gelişmeleri (Timofte vd. 2013, Yang vd. 2012, Timofte vd. 2014) günümüzde en gelişmiş SR yöntemleri arasındadır. Bu yöntemlerde, yamalar optimizasyonun odağıdır; yama çıkarma ve toplama aşamaları, ön / son işlem olarak kabul edilir ve ayrı olarak ele alınmaktadır (Chao vd. 2015)

## 2. Materyal ve Metot

Uydu imgelerinin belirlenmiş sınıflara göre toplanması, derin makine öğrenmesi yardımı ile sınıflandırılması, süper çözünürlük algoritmalarının uygulanması ve süper çözünürlük ile iyileşmiş imgelerin tekrar sınıflandırılması adımları için çeşitli işlemler ve araçlar kullanılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı uydu imgelerinin sınıflandırılma performansını arttırmak üzere imgelere derin öğrenme tabanlı süper çözünürlük yöntemleri uygulamaktır. Bu çalışmada uydu imgelerine süper çözünürlük adımları uygulayarak evrimsel sinir ağları yardımı ile sınıflandırmak üzere imgeler kullanılmıştır. Ana sınıflar belirlenirken uydu imgelerinden yararlanılmış ve ayırt edici özellikleri bulunan cami, ev, hastahane, okul, park ve stadyum olmak üzere toplamda 6 sınıf belirlenmiştir.

Sınıflandırma performansının etkilerini görme amaçlı olarak veri seti, Türkiye'deki çeşitli illerden cami, ev, hastahane, okul, park ve stadyum sınıflarına ait, her sınıf için 150 imge açık erişim imkânı bulunan Google Earth (Int kyn. 1) kullanılarak manuel olarak toplanmıştır. Toplamda 900 imge üzerinde derin öğrenme tabanlı sınıflandırma ve süper çözünürlük algoritmaları uygulanmıştır.

Şekil 1' de bu çalışmada kullanılan veri setine ait uydu imgelerinden bazıları verilmiştir.



Şekil 1. Veri setine ait uydu imgeleri

Evrişimsel sinir ağları için eğitim ve test olmak üzere iki ana bölüme ayırdığımız verilerin işlenmesi için Matlab 2020a yazılımı kullanılmıştır. Derin makine öğrenmesi uygulamaları için 16 GB RAM bulduran intel i7 3.1 Ghz işlemcili Macbook Pro kullanılmıştır. Windows işletim sistemi gerektiren dosyadan imge okuyan ve imge üzerinde iyileştirmelerde bulduktan sonra yeni imgeyi klasöre kaydeden süper çözünürlük algoritması için intel i5 işlemcili 8 GB RAM bulduran bilgisayar kullanılmıştır. Genel yaklaşım gereği mevcut veri, eğitim için %70 ve test için %30 oranında kümelere bölünmüştür. Softmax sınıflandırıcı katmanlarının eğitim ve sonuç verileri Matlab yazılımı ile çıkarılmış sonrasında süper çözünürlük yöntemi için tekrar Matlab yazılımı üzerinden sınıflara bağlı olarak tüm imgeler iyileştirilmiştir. Süper çözünürlük algoritmasının uydu imgelerini iyileştirerek daha iyi bir sınıflandırma yaptığını kanıtlamak amacı ile süper çözünürlük adımından sonra iyileştirilmiş imgeler bir kez daha evrişimsel sinir ağları yardımı ile sınıflandırılmıştır. Bu işlemler sonucunda oluşan grafikler, test süreleri, doğruluk değerleri, karmaşıklık matrisleri ile sınıflandırma performansı kontrolü için gerekli analiz bilgileri, bulgular ve tartışma bölümünde açıklanmıştır.

Derin evrişimsel sinir ağlarına dayalı modelin performansı üç farklı derin öğrenme mimarisi parametresi kullanılarak ayrı ayrı test edilmiştir. Toplamda 900 imge ilk önce evrişimsel sinir ağları yardımı ile softmax fonksiyonları olan DenseNet201 Simonyan vd. (2014), SqueezeNet Mateen vd. (2019) ve VGG16 Zhang (2019) ile sınıflandırılmıştır. Derin öğrenme mimarilerinden öznitelik çıkarılarak bu öznitelikler SVM, KNN, karar ağaçları, Naive bayes gibi sınıflandırıcılarla sınıflandırılmıştır. Karmaşıklık matrisleri ve öğrenme grafikleri elde edildikten sonra imgeler üzerine süper çözünürlük algoritması uygulanmıştır.

Matcovnet kütüphanesine ihtiyaç duymayan, mevcut süper çözünürlük algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği kanıtlanmış olan süper çözünürlük yöntemi kullanılarak imgelerin çözünürlüğünü arttırılmıştır (Jia-Bin vd. 2015). Çözünürlük işlem adımından sonra imgelerin doğru sınıflandırılmalarındaki oranı gözlemleyebilmek için süper çözünürlük işlemi uygulanan imgeler tekrar evrişimsel sinir ağları, SVM, KNN ile sınıflandırılmıştır. Sonuçları bulgular ve tartışma bölümünde açıklanmıştır.

### 3. Bulgular

Uydu imgelerinin süper çözünürlük ile iyileştirilmesini amaçlayan bu çalışmada öncelikle uydu imgeleri kullanılarak süper çözünürlük algoritması uygulanmıştır. Şekil 2’de çalışmada kullanılan uydu imgesi, Şekil 3’te uydu imgesine süper çözünürlük uygulanmış imge verilmiştir.



Şekil 2. Uydu imgesi



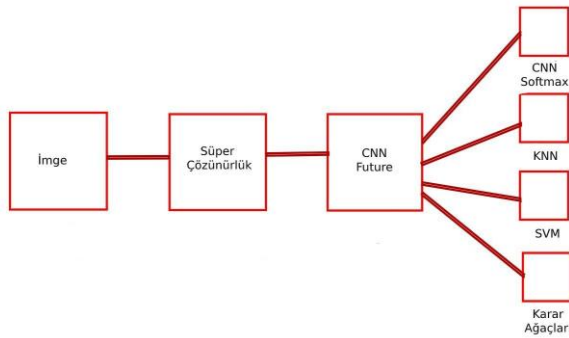
**Şekil 3.** Uydu imgesine süper çözünürlük uygulanmış imge

Çizelge 1’de veri setinde kullanılan cami, ev, hastahane, okul, park ve stadyum sınıflarına ait, her sınıf için bir imgenin büyüme faktörü X2 altında tepe sinyal gürültü oranı(PSNR) ve yapısal benzerlik endeksi(SSIM) metrikleri verilmiştir.

**Çizelge 1.** Görüntü Metrikleri Tablosu

Veri seti sınıfları	PSNR	SSIM
Veri seti 1	38,04	0,96
Veri seti 2	34,48	0,92
Veri seti 3	38,07	0,96
Veri seti 4	38,12	0,95
Veri seti 5	38,32	0,94
Veri seti 6	38,17	0,96

Süper çözünürlük algoritması sonucunda oluşan iyileşmeyi doğru analiz edebilmek için görüntüler üzerinde süper çözünürlük yöntemleri kullanılmadan önce ve sonra derin evrimsel sinir ağları, SVM, KNN ile sınıflandırma yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.** Uygulanan yöntemler

Kullanılan ilk evrimsel sinir ağı mimarisi DenseNet201 evrimsel sinir ağı mimarisi softmax

yapısı %95,93 doğruluk oranına ulaşıldıktan sonra doğru tanıma oranını arttırma amaçlı imgelere süper çözünürlük uygulanmıştır. Uygulanan süper çözünürlük algoritması sonucunda elde edilen yeni imgeler tekrar sınıflandırılmıştır. İmgelerin çözünürlüklerinin arttırılması doğru tanıma oranını arttırmış %96,30 başarı oranı ile doğru tanıma yapıldığı gözlemlenmiştir.

Bir başka uygulamada DenseNet201 ile özellik çıkarımı yapılmış ve 1000 özellik çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler SVM, KNN, Naive Bayes gibi sınıflandırıcılara verilmiş ve başarı oranları süper çözünürlük öncesi ve sonrası oluşan değerler gözlemlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar süper çözünürlük önce ve sonrası şeklinde Çizelge 2.’de verilmiştir. En başarılı sonuç DenseNet201-Quadratic SVM ile %98,4 oranında elde edilmiştir. Süper çözünürlük kullanılarak %3,2 ‘lik başarı artışı sağlanmıştır.

**Çizelge 2.** DenseNet201 Sonuç Tablosu

Uygulanan Sınıflandırıcılar	Süper Çözünürlük Öncesi Doğruluk Oranları	Süper Çözünürlük Sonrası Doğruluk Oranları
DenseNet Softmax	%95,93	%96,30
DenseNet201-Cubic SVM	%95,7	%98,3
DenseNet201-Quadratic SVM	%95,2	<b>%98,4</b>
DenseNet201-Linear SVM	%93,8	%95,7
DenseNet201-Medium Guassian SVM	%95,2	%97,3
DenseNet201-Coarse Guassian SVM	%86,5	%89,7
DenseNet201-Fine KNN	%93,5	%96,8
DenseNet201-Medium KNN	%85,4	%88,9
DenseNet201-Cosine KNN	%88,1	%88,0
DenseNet201-Cubic KNN	%84,6	%88,8
DenseNet201-Weighted KNN	%88,7	%93,1
DenseNet201-Subspace KNN	%89,2	%94,4
DenseNet201-Bagged Trees	%94,0	%97,1
DenseNet201-Kernel Naive Bayes	%87,6	%89,2

DenseNet201 mimarisine ait en iyi sınıflandırma başarısını gösteren Quadratic SVM sonucunda oluşturulmuş karmaşıklık matrisleri süper çözünürlük algoritması imgelere uygulanmadan önce yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 5’ te ve süper çözünürlük algoritması imgelere uygulandıktan sonra yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 6’da verilmiştir. DenseNet201 mimarisi için en yüksek yanlış sınıflandırılma oranı eve ait imgelerin %6,2’sinin okul

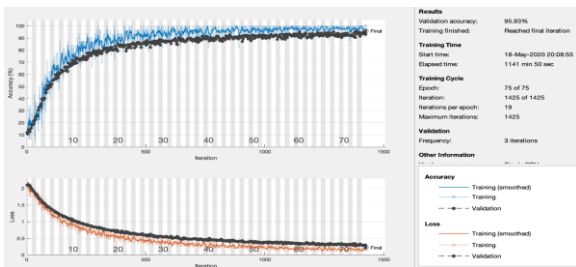
sınıfına tanınması iken bu oran SR ile %1,3'e düşmüştür. Şekil 7'de DenseNet201 süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği, Şekil 8'de DenseNet201 süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği verilmiştir.

Cami	100.0%	1.9%		2.7%	0.9%	
Ev		92.4%	1.0%	6.2%		
Hastahane			98.1%	2.7%	0.9%	
Okul		4.8%	1.0%	87.5%		1.0%
Park				0.9%	98.1%	
Stadyum		1.0%				99.0%
PPV	100.0%	92.4%	98.1%	87.5%	98.1%	99.0%
FDR		7.6%	1.9%	12.5%	1.9%	1.0%
	Cami	Ev	Hastahane	Okul	Park	Stadyum

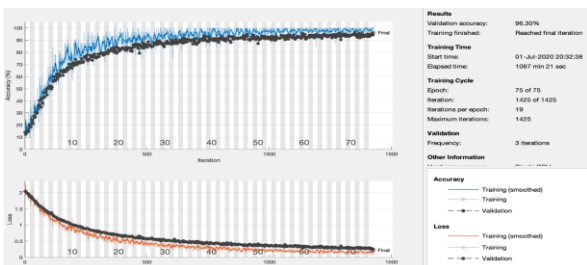
Şekil 5. DenseNet201 SR öncesi karmaşıklık matrisi

Cami	100.0%	0.7%		0.7%		
Ev		98.1%	0.7%	1.3%	0.7%	
Hastahane			98.7%	0.7%		
Okul		1.3%	0.7%	97.4%		
Park		1.3%			99.3%	
Stadyum		0.7%				100.0%
PPV	100.0%	98.1%	98.7%	97.4%	99.3%	100.0%
FDR		3.9%	1.3%	2.6%	0.7%	
	Cami	Ev	Hastahane	Okul	Park	Stadyum

Şekil 6. DenseNet201 SR sonrası karmaşıklık matrisi



Şekil 7. DenseNet201 süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği



Şekil 8. DenseNet201 süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği

Diğer bir uygulamada SqueezeNet evrimsel sinir ağı mimarisi softmax sınıflandırma %92,22 doğruluk oranına ulaşıldıktan sonra doğru tanıma oranını arttırma amaçlı imgelere süper çözünürlük uygulanmıştır. Uygulanan süper çözünürlük algoritması sonucunda elde edilen yeni imgeler tekrar sınıflandırılmıştır. İmgelerin çözünürlüklerinin arttırılması sınıflandırma doğruluğunu arttırmış %93,70 başarı oranı ile doğru tanıma yapıldığı gözlemlenmiştir.

Bir diğer uygulamada SqueezeNet ile özellik çıkarımı yapılmış ve 1000 özellik çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler SVM, KNN, Naive Bayes gibi sınıflandırıcılara verilmiş ve başarı oranları süper çözünürlük öncesi ve sonrası oluşan değerler gözlemlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar süper çözünürlük önce ve sonrası şeklinde Çizelge 3.'te verilmiştir. En başarılı sonuç SqueezeNet-Quadratic SVM sonucunda %98,8 oranında elde edilmiştir. Süper çözünürlük kullanılarak %2,9 'luk başarı artışı sağlanmıştır.

Çizelge 3. SqueezeNet Sonuç Tablosu

Uygulanan Sınıflandırıcılar	Süper Çözünürlük Öncesi Doğruluk Oranları	Süper Çözünürlük Sonrası Doğruluk Oranları
SqueezeNet Softmax	%92,22	%93,70
SqueezeNet-Cubic SVM	%95,6	%98,4
SqueezeNet-Quadratic SVM	%95,9	<b>%98,8</b>
SqueezeNet-Linear SVM	%93,5	%94,6
SqueezeNet-Medium Guassian SVM	%92,9	%97,0
SqueezeNet-Coarse Guassian SVM	%85,9	%86,3
SqueezeNet-Fine KNN	%89,7	%96,8
SqueezeNet-Medium KNN	%84,1	%86,1
SqueezeNet-Coarse KNN	%75,7	%74,6
SqueezeNet-Cosine KNN	%72,7	%82,0
SqueezeNet-Cubic KNN	%80,0	%86,4
SqueezeNet-Weighted KNN	%86,0	%92,4
SqueezeNet-Subspace KNN	%88,7	%96,6
SqueezeNet-Bagged Trees	%88,3	%90,9

SqueezeNet mimarisine ait en iyi sınıflandırma başarısını gösteren Quadratic SVM sonucunda oluşturulmuş karmaşıklık matrisleri süper çözünürlük algoritması imgelere uygulanmadan önce yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 9'da ve süper çözünürlük algoritması imgelere



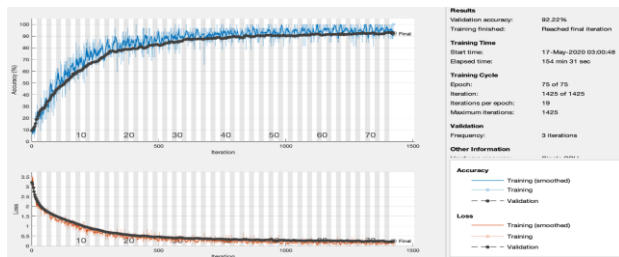
uygulandıktan sonra yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 10'da verilmiştir. SqueezeNet mimarisi için en yüksek yanlış sınıflandırılma oranı okula ait imgelerin %9,0'unun ev sınıfına tanınması iken bu oran SR ile %5,9'a düşmüştür. Eve ait imgelerin park, hastaneye ait imgelerin park ve okul, okula ait imgelerin stadyum

Cami	99.0%	0.9%	1.9%	1.0%	0.9%	
Ev	1.0%	90.1%		4.0%		
Hastahane			96.3%		0.9%	
Okul		9.0%	0.9%	94.0%		
Park			0.9%		96.3%	
Stadyum				1.0%	1.9%	100.0%
PPV	99.0%	90.1%	96.3%	94.0%	96.3%	100.0%
FDR	1.0%	9.9%	3.7%	6.0%	3.7%	
	Cami	Ev	Hastahane	Okul	Park	Stadyum

Şekil 9. SqueezeNet SR öncesi karmaşıklık matrisi

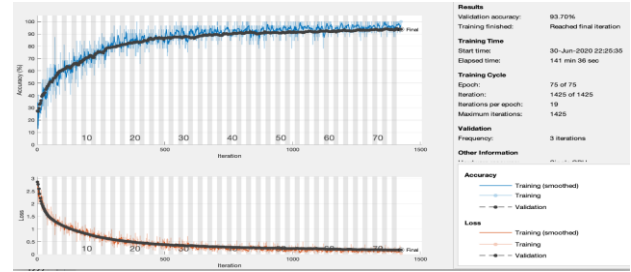
Cami	99.3%	0.7%	2.0%	0.7%	0.6%	
Ev	0.7%	92.8%		4.1%	1.3%	
Hastahane			98.0%			
Okul		5.9%		95.3%		
Park		0.7%			96.1%	
Stadyum					1.9%	100.0%
PPV	99.3%	92.8%	98.0%	95.3%	96.1%	100.0%
FDR	0.7%	7.2%	2.0%	4.7%	3.9%	
	Cami	Ev	Hastahane	Okul	Park	Stadyum

Şekil 10. SqueezeNet SR sonrası karmaşıklık matrisi



Şekil 11. SqueezeNet süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği

sınıfına yanlış tanınması tamamen ortadan kalkmıştır. Şekil 11'de SqueezeNet süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği, Şekil 12'de SqueezeNet süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği verilmiştir.



Şekil 12. SqueezeNet süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği

Bir başka uygulamada Vgg16 evrimsel sinir ağı mimarisi softmax sınıflandırma %95,56 doğruluk oranına ulaşıldıktan sonra doğru tanıma oranını artırma amaçlı imgelere süper çözünürlük uygulanmıştır. Uygulanan süper çözünürlük algoritması sonucunda elde edilen yeni imgeler tekrar sınıflandırılmıştır. İmgelerin çözünürlüklerinin artırılması doğru tanıma oranını arttırmış %96,30 başarı oranı ile doğru tanıma yapıldığı gözlemlenmiştir.

Bir başka uygulamada Vgg16 ile özellik çıkarımı yapılmış ve 1000 özellik çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler SVM, KNN, Naive Bayes gibi sınıflandırıcılara verilmiş ve başarı oranları süper çözünürlük öncesi ve sonrası oluşan değerler gözlemlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar süper çözünürlük önce ve sonrası şeklinde Çizelge 4.'te verilmiştir. Vgg16-Quadratic sonucunda %97,1 oranında yüksek başarı elde edilmiştir. Süper çözünürlük kullanılarak %3,6 'lık başarı artışı sağlanmıştır.

Çizelge 4. Vgg16 Sonuç Tablosu

Uygulanan Sınıflandırıcılar	Süper Çözünürlük Öncesi Doğruluk Oranları	Süper Çözünürlük Sonrası Doğruluk Oranları
Vgg16 Softmax	%95,56	%96,30
Vgg16-Cubic SVM	%93,2	%96,7
Vgg16-Quadratic SVM	%93,5	<b>%97,1</b>
Vgg16-Linear SVM	%90,6	%93,3
Vgg16-Medium Guassian SVM	%92,4	%95,3
Vgg16-Coarse Guassian SVM	%81,4	%83,1
Vgg16-Fine KNN	%86,8	%92,3

Vgg16-Medium KNN	%78,9	%79,7
Vgg16-Coarse KNN	%64,9	%67,4
Vgg16-Cosine KNN	%79,0	%80,6
Vgg16-Cubic KNN	%79,7	%79,0
Vgg16-Weighted KNN	%83,0	%85,6
Vgg16-Subspace KNN	%87,3	%91,8
Vgg16-Kernel Naive Bayes	%80,3	%80,3

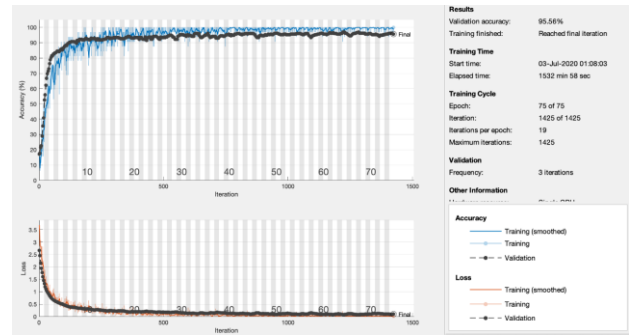
VGG16 mimarisine ait en iyi sınıflandırma başarısını gösteren Quadratic SVM sonucunda oluşturulmuş karmaşıklık matrisleri süper çözünürlük algoritması imgelere uygulanmadan önce yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 13'te ve süper çözünürlük algoritması imgelere uygulandıktan sonra yapılan sınıflandırma sonucu oluşturulmuş karmaşıklık matrisi Şekil 14'te verilmiştir. VGG 16 mimarisi için en yüksek yanlış sınıflandırılma oranı eve ait imgelerin %5,6'sının okul sınıfına tanınması iken bu oran SR ile %1,3'e düşmüştür. Eve ait imgelerin park, parka ait imgelerin stadyum, okul ve cami sınıfına yanlış tanınması tamamen ortadan kalkmıştır. Şekil 15'te VGG16 süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği, Şekil 16'da VGG16 süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği verilmiştir.

Cami	97.8%	5.4%	4.3%	1.9%	1.0%	
Ev	2.2%	97.4%			5.6%	
Hastahane			91.3%			
Okul		4.5%	2.6%	88.9%	1.0%	
Park		0.9%	1.7%	2.8%	97.1%	
Stadyum		1.8%		0.9%	1.0%	100.0%
PPV	97.8%	87.4%	91.3%	88.9%	97.1%	100.0%
FDR	2.2%	12.6%	8.7%	11.1%	2.9%	

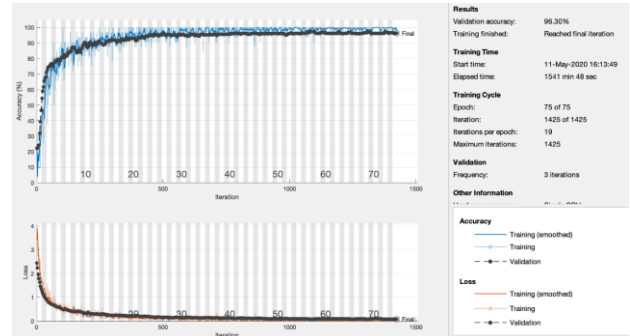
Şekil 13. VGG16 SR öncesi karmaşıklık matrisi

Cami	99.3%	3.2%	0.6%	1.3%		
Ev	0.7%	93.0%		1.3%		
Hastahane			96.8%			
Okul		3.2%	1.3%	94.7%		
Park			1.3%	1.3%	100.0%	
Stadyum		0.6%		1.3%		100.0%
PPV	99.3%	93.0%	96.8%	94.7%	100.0%	100.0%
FDR	0.7%	7.0%	3.2%	5.3%		

Şekil 14. VGG16 SR sonrası karmaşıklık matrisi



Şekil 15. VGG16 süper çözünürlük öncesi genel doğruluk ve kayıp grafiği



Şekil 16. VGG16 süper çözünürlük sonrası genel doğruluk ve kayıp grafiği

Karmaşıklık matrisleri ile 3 sınıf üzerinde imgelerin doğru ve yanlış sınıflandırılması üzerinde durulmuştur. Süper çözünürlük sonucu imge netleştiği için öz nitelik çıkarımı artmaktadır. Bu nedenle doğru sınıflandırılma oranı artmıştır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Uydu imgelerine süper çözünürlük algoritmalarının uygulanması ve giriş, çıkış imgelerinin evrişimsel sinir ağları mimarileri ile sınıflandırılarak sınıflandırılma doğruluk oranlarının artırılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan uygulamaların karşılaştırılması ile DenseNet201 mimarisi için %95,2 iken süper çözünürlük sonrası %3,2 artarak %98,4 oranında başarıma ulaşılmıştır. SqueezeNet mimarisi için %95,9 iken süper çözünürlük sonrası %2,9 artarak %98,8 oranında başarıma ulaşılmıştır. VGG16 mimarisi için %93,5 iken süper çözünürlük sonrası %3,6 artarak %97,1 oranında başarıma ulaşılmıştır.

Uygulanan sinir ağları ile görüntü sınıflandırma sürecinde, doğruluk oranları %100'e yaklaşmıştır. Evrişimsel sinir ağı mimarilerinden DenseNet201, SqueezeNet ve VGG-16 görüntüler üzerine uygulanmış ve sonucunda test süreleri, doğruluk oranları Tablo 4'te verilmiştir. DenseNet201 için doğruluk değeri %95,2 iken süper çözünürlük sonrası sınıflandırma sonucu doğruluk oranı %98,4 olmuştur. SqueezeNet için doğruluk değeri %95,9 iken süper çözünürlük sonrası sınıflandırma sonucu doğruluk oranı %98,8 olmuştur. VGG-16 için doğruluk değeri %93,5 iken süper çözünürlük sonrası sınıflandırma sonucu doğruluk oranı %97,1 olmuştur.

Çizelge 5'te üzerinde imgelere uygulanan sınıflandırma mimarilerinden en iyi sınıflandırmaların doğruluk oranları ve test süreleri ile imgelere süper çözünürlük uygulandıktan sonra elde edilen süper çözünürlük doğruluk oranları ile süper çözünürlük test süreleri verilmiştir. Uygulanan evrişimsel sinir ağları çeşitlerinde görüldüğü gibi süper çözünürlük işlemi sonrası doğruluk değerlerinde artış olmuştur.

**Çizelge 5.** Evrişimsel Sinir Ağları Mimarilerine Ait Sonuç Tablosu

Evrişimsel Sinir Ağı Mimarileri	S.Ç. Öncesi Doğruluk Oranı	S.Ç. Öncesi Test Süresi	S.Ç. Sonrası Doğruluk Oranı	S.Ç. Sonrası Test Süresi
<b>DenseNet201</b>				
Quadratic SVM	%95,2	1.7387	<b>%98,4</b>	1.7228
<b>SqueezeNet</b>				
Quadratic SVM	%95,9	0.50443	<b>%98,8</b>	0.48742
<b>Vgg16</b>				
Quadratic SVM	%93,5	1.204	<b>%97,1</b>	0.61612

Yapılan uygulamalar sonucunda sınıflandırılma başarısı 3 mimari için en düşük %2,9 ve en yüksek %3,6 oranında artırılmış olduğu kanıtlanmıştır. Süper çözünürlük algoritması uygulanan uydu görüntüleri üzerinde evrişimsel sinir ağları yöntemlerinin özellik çıkartması artmıştır. Özellik çıkartma aşamasının geliştirilmesi ile karmaşıklık matrislerinde doğru pozitif sınıflandırma artmış ve doğru sınıflandırma performansı olumlu etkilenmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Bevilacqua, M., Roumy, A., Guillemot, C., Morel, M.L.A. 2012. Low-complexity single-image super-resolution based on nonnegative neighbor embedding, *British Machine Vision Conference*.
- Chang, H., Yeung, D.Y., Xiong, Y. 2004. Super-resolution through neighbor embedding, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-1.
- Chao D., Chen C. L., Kaiming H., Xiaoou T. 2015. Image Super-Resolution Using Deep Convolutional Networks, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38,2, 295-307.
- Chopade P. B., Patil P. M. 2015. Image super resolution Scheme based on wavelet transform and its performance analysis, *International Conference on Computing, Communication and Automation*, 1182-1186.
- Dai, D., Timofte, R., Van Gool, L. 2015. Jointly optimized regressors for image super-resolution, *Eurographic*, 95-104.

- Freedman, G., Fattal, R. 2011. Image and video upscaling from local self-examples, *ACM Transactions on Graphics*, 30,2, 12.
- Freeman, W.T., Pasztor, E.C., Carmichael, O.T. 2000. Learning low-level vision, *International Journal of Computer Vision*, 40,1, 25–47.
- Glasner, D., Bagon, S., Irani, M. 2009. Super-resolution from a single image, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 349–356.
- Jia-Bin H., Abhishek S., and Narendra A., 2015, Single Image Super-Resolution from Transformed Self-Exemplars, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 5197-5206.
- Kim, K.I., Kwon, Y. 2010. Single-image super-resolution using sparse regression and natural image prior, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32,6, 1127–1133.
- Mateen M., Wen J., Song S.N., Huang Z. 2019. Fundus Image Classification Using VGG-19 Architecture with PCA and SVD, *Symmetry*.
- Schulter, S., Leistner, C., Bischof, H. 2015. Fast and accurate image upscaling with super-resolution forests, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3791–3799.
- Simonyan K., Zisserman A. 2014. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *arXiv*, 1409.1556.
- Timofte R., De Smet, Van Gool L. 2013. Anchored neighborhood regression for fast example-based super-resolution, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 1920–1927.
- Timofte, R., De Smet, V., Van Gool, L. 2014. A+: Adjusted anchored neighborhood regression for fast super-resolution, *IEEE Asian Conference on Computer Vision*, 111–126.
- Yang, C.Y., Huang, J.B., Yang, M.H. 2010. Exploiting self-similarities for single frame super-resolution, *IEEE Asian Conference on Computer Vision*, 497–510.
- Yang, C.Y., Ma, C., Yang, M.H. 2014. Single image super resolution: A benchmark, *European Conference on Computer Vision*, 372–386.
- Yang, J., Lin, Z., Cohen, S. 2013. Fast image super-resolution based on in-place example regression, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1059–1066.
- Yang, J., Wang, Z., Lin, Z., Cohen, S., Huang, T. 2012. Coupled dictionary training for image super-resolution, *IEEE Transactions on Image Processing*, 21,8, 3467–3478.
- Yang, J., Wright, J., Huang, T., Ma, Y. 2008. Image super-resolution as sparse representation of raw image patches, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–8.
- Yang, J., Wright, J., Huang, T.S., Ma, Y. 2010. Image super-resolution via sparse representation, *IEEE Transactions on Image Processing*, 19,11, 2861–2873.
- Zeyde, R., Elad, M., Protter, M. 2012. On single image scale-up using sparse-representations, *Curves and Surfaces*, 711–730.
- Zhang J. 2019. A full convolutional network based on DenseNet for remote sensing scene classification, *Mathematical Biosciences and Engineering*, 6, 5, 3345–3367.

#### **İnternet kaynakları**

1-<http://www.google.com/int/tr/earth>, (01.04.2020)



AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055201 (1078-1085)

AKU J. Sci. Eng.21 (2021) 055201 (1078-1085)

DOI: 10.35414/akufemubid.893694

Araştırma Makalesi / Research Article

## PID Control of an Inverted Pendulum with Experimental Friction Model Estimation

Ayhan GÜN<sup>1</sup>, Abdurrahman KARAMANCIOĞLU<sup>2</sup><sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya.<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

e-posta: Sorumlu yazar: ayhan.gun@dpu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4223-2518>  
akaraman@ogu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2898-186X>

Geliş Tarihi: 09.03.2021

Kabul Tarihi: 07.10.2021

### Keywords

Inverted Pendulum;  
PID; Duty Cycle; Digital  
Signal Processor;  
Stability

### Abstract

An inverted pendulum system is designed, implemented, and stabilized on a short path. Proportional-Integral-Differential (PID) control algorithm is embedded on a digital signal processing card to achieve the stabilization in a real time. DC-motor dynamics of the inverted pendulum system and cart-track friction are unknown and their effects are taken into account by the incremental duty cycle approach. Experimental tests, conducted for various experimental conditions, have shown that the inverted pendulum system reached the desired state in the presence of friction and various external disturbances.

## DeneySEL SÜRTÜNME Modeli Kestirimiyle bir Ters Sarkacın PID Kontrolü

### Anahtar kelimeler

Ters Sarkaç; PID;  
Serbest Çevrim; Sayısal  
İşaret İşleme; Kararlılık

### Öz

Bu çalışmada, kısa bir hat üzerinde ters sarkaç sistemi tasarlanıp, uygulanmış ve kararlı bir şekilde kontrol edilmiştir. Kararlılığı sağlamak için gerçek zamanlı sayısal bir işaret işleme kartına Oransal-İntegral-Diferansiyel (PID) kontrol algoritması yerleştirilmiştir. Ters sarkaç sisteminin DC motor dinamiği ve araç yolu sürtünmesi bilinmemektedir ve sürtünme etkileri artırılan serbest çevrim yaklaşımı ile dikkate alınmıştır. Sürtünme ve dış gürültü varlığında farklı deney koşulları için yapılan testler ters sarkacın istenen denge durumuna ulaştığını göstermiştir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Introduction

The inverted pendulum problem is one of the benchmark problems in dynamics and has been studied extensively in the control literature. In this work, an inverted pendulum and its control system have been designed, implemented, and tested. The inverted pendulum system has a single input, which is the force created by the DC motor voltage, and two outputs, which are the angle of the pendulum and position of the cart. In the literature numerous control algorithms are applied to the inverted pendulum systems, and many satisfactory results are reported. In the inverted pendulum systems, the

pendulum is attached to the cart via hinge. The cart is designed to move only in the forward and backward directions on the sliding path. The cart motion affects the motion of the pendulum so that the pendulum moves either in the clockwise direction or in the counterclockwise direction, depending on the cart's motion. The control objective for the inverted pendulum system is to move the cart to a pre-specified position while keeping the pendulum balanced. This problem is called the inverted pendulum stabilization problem. In this work the control objective is achieved under the PID control in the presence of frictions and

external disturbances. Some significant studies, in which inverted pendulum systems are addressed, are summarized next. In (El-Hawwary *et al.* 2006), an experimental setup is described and stability of the system is achieved under the adaptive fuzzy control. Intelligent control methods including fuzzy logic and neural network methods have been used for inverted pendulum systems in (Hung *et al.* 1997, Magana *et al.* 1998). A more challenging inverted pendulum problem, a double inverted pendulum problem, is studied in (Cheng *et al.* 1996). In another work, the mobile inverted pendulum is developed and tested by using an intelligent control algorithm (Jung and Kim 2008, Tao *et al.* 2008) are suggested the inverted pendulum and cart system is effectively approximated by a Takagi–Sugeno (T-S) fuzzy model in a small range of angle near its equilibrium state. An adaptive state controller was developed for a stable, and in the same time optimal balancing of an inverted pendulum and a switching mechanism between swinging and balancing algorithm is proposed by (Muskinja and Tovornik 2006). The basic proportional-integral-derivative (PID) control algorithms are implemented in an FPGA chip and a neural network controller is implemented in a DSP board by (Jung and Kim 2007, Gani *et al.* (2014) took a fuzzy logic based approach for controlling the inverted pendulum. Finally in (Kharola *et al.* 2016), aimed to stabilize an inverted pendulum system on a sloping surface using PID and fuzzy logic controllers. A very common use of the inverted pendulum systems is for the educational purposes to illustrate validity of various algorithms. In this study, cart position and pendulum angle data are supplied to the PID controller to generate control signals for balancing the inverted pendulum. The control signal takes the unmodeled system dynamics, including the static and dynamic frictions, into account. In particular, overcoming the static friction is based on increasing the PWM duty cycle of the voltage applied to the DC motor. That is, at certain duty cycle, the average voltage value corresponding to the minimum voltage that overcomes the static friction is obtained. After overcoming the static friction, the dynamic friction becomes effective in the motion of the cart. In this

phase of the motion the PID controller embedded in the DSP card takes over the control.

## 2. Overall System Description

The mechanical description and block diagram of the inverted pendulum system designed and implemented are shown in Figures 1 and 2 respectively. The pendulum is hinged to the cart in a way that it can move only in the clockwise and counterclockwise directions in the  $x$ - $y$  plane. Direction of the pendulum motion is controlled by adjusting the DC motor voltage that generates the force applied to the cart. The cart is mounted on a DC motor with belt. Position of the cart and angular position of the pendulum are measured by two incremental encoders mounted on the motor and pendulum respectively.

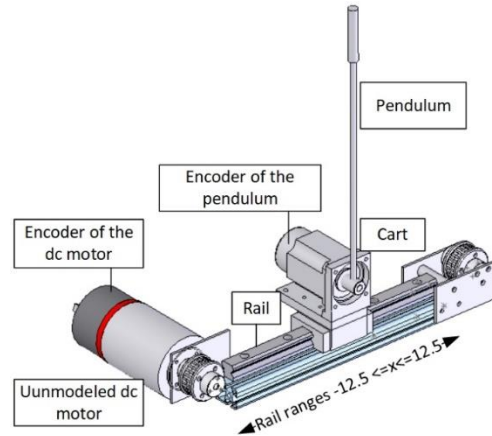


Figure 1. Mechanical description of the inverted pendulum (Gün,A. 2007)

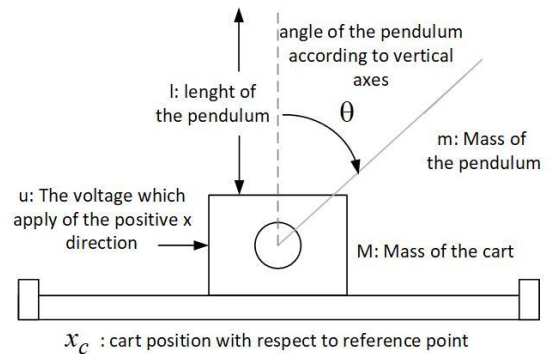


Figure 2. Block diagram representation of the Inverted pendulum system (Int Kyn. 3)

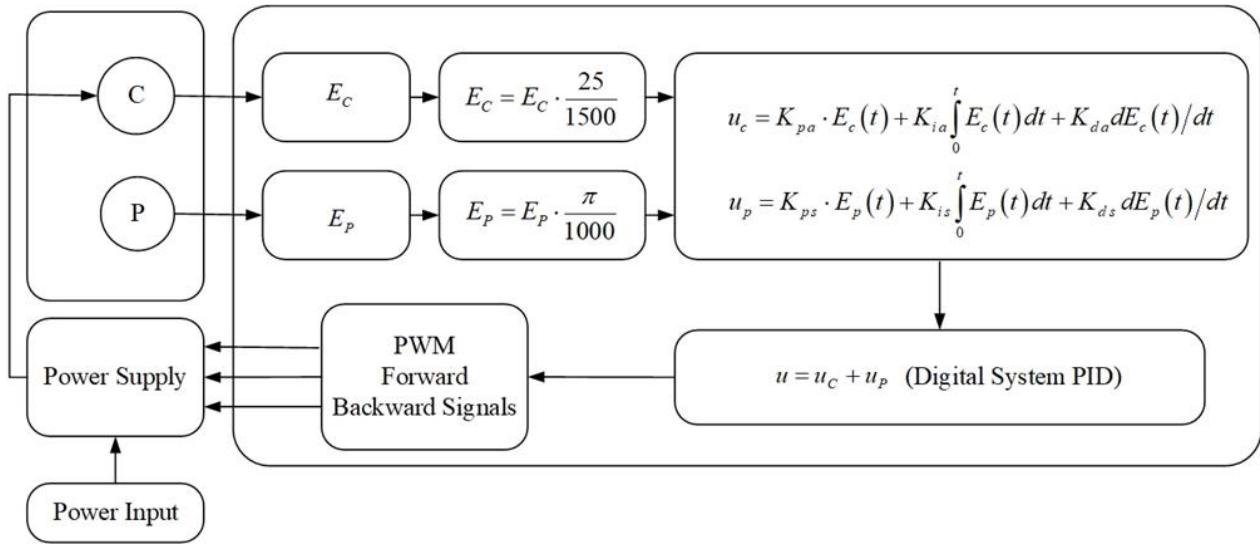


Figure 3. PID control block diagram (Wang, 2011)

### 3. PID Control

PID control is a classical control algorithm used extensively in many control applications. The block diagram representation of the PID controller for the inverted pendulum system is shown in Figure 3. In the diagram  $E_c$  and  $E_p$  represent the error signals for the cart position and the pendulum angle. They are defined by

$$E_p = \theta_d - \theta \tag{1}$$

and

$$E_c = x_d - x_c \tag{2}$$

where  $\theta_d$  and  $\theta$  are the desired and actual angles of the pendulum, and  $x_d$  and  $x_c$  are the desired and the actual positions of the cart respectively. Using the error signals, intermediate PID control inputs are computed by

$$u_p = K_{pp} \cdot E_p(t) + K_{ip} \cdot \int_0^t E_p(t) dt + K_{dp} \frac{dE_p(t)}{dt} \tag{3}$$

and

$$u_c = K_{pc} \cdot E_c(t) + K_{ic} \cdot \int_0^t E_c(t) dt + K_{dc} \frac{dE_c(t)}{dt} \tag{4}$$

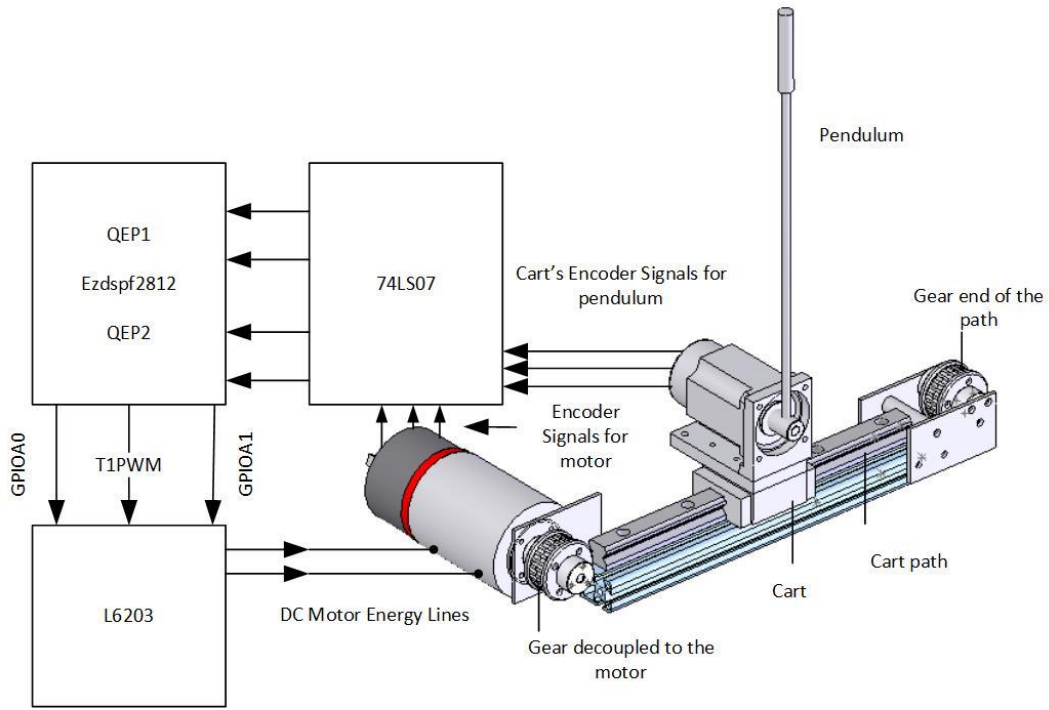
where  $K_{pp}$ ,  $K_{ip}$ ,  $K_{dp}$ ,  $K_{pc}$ ,  $K_{ic}$  and  $K_{dc}$  are the PID gains. The PID control input for the overall system is the sum of  $u_p$  and  $u_c$ .

$$u = u_c + u_p \tag{5}$$

The value of  $u$  is used to calculate the duty cycle of the PWM signal applied to the cart. It will, in the sequel, be presented that the duty cycle is proportional to the  $u$  value.

### 4. Hardware Implementation

In this work, TI TMS320F2812DSP DSP electronics card is used as the controller hardware and PID algorithm is embedded in this card. The hardware diagram of the overall system is shown in Figure 4. The controller TMS320F2812DSP generates PWM signals for the DC motor drivers and receives signals from encoders. Signals received from encoders are processed to determine the pendulum angle and cart position. The actual picture of the hardware implementation is shown in Figure 5.



**Figure 4.** Inverted pendulum hardware diagram(Gün, A. 2007)

from encoders. The block diagram of the mechanism of encoders is shown in Figure 6.

This system has two encoders. The one for the pendulum produces 1000 pulses per revolution; and the one for the motor produces 2000 pulses per revolution. The length of the cart movement range is 25 cm, which can be viewed as  $\pm 12.5$  cm from the center of the track. This is a challengingly short track length (Asaetal.2008). The inverted pendulum and the cart are required to reach their desired states and keep these states thereafter. The numbers stored at  $u_p$  and  $u_c$  can be interpreted as the angles in radians and distance from the center of track in centimeters by considering formulas for their ranges.

$$\theta \in \left( -N_p \cdot \frac{\pi}{1000} \text{ rad}, N_p \cdot \frac{\pi}{1000} \text{ rad} \right)$$

and

$$x \in \left( -N_c \cdot \frac{12.5}{750} \text{ cm}, N_c \cdot \frac{12.5}{750} \text{ cm} \right)$$

where  $N_p$  and  $N_c$  are encoder outputs for pendulum and cart respectively. The pendulum and cart direction information are sent to Ezdspf2812 DSP board through 74LS07 buffer which are reading



**Figure 5.** Hardware implementation of the inverted pendulum (Gün,A. 2007)

### 5. DC Motor Driver Circuit

L6203 DMOS full bridge driver circuit is used as the DC motor driver. Figure 7 shows the circuit layout of this driver which has the feature that prevents the instant voltage variations in fast switching application. The direction information of the motor is fed to IN1 and IN2 digital inputs. The L6203 driver consists of power transistors which are capable of carrying maximum 5 Amps.

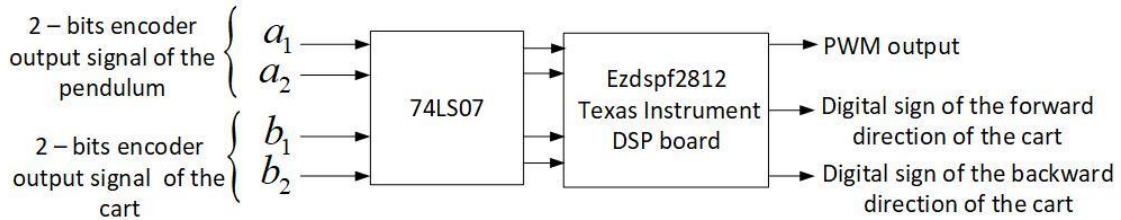


Figure 6. The block diagram of the encoder mechanism(Int Kyn. 2)

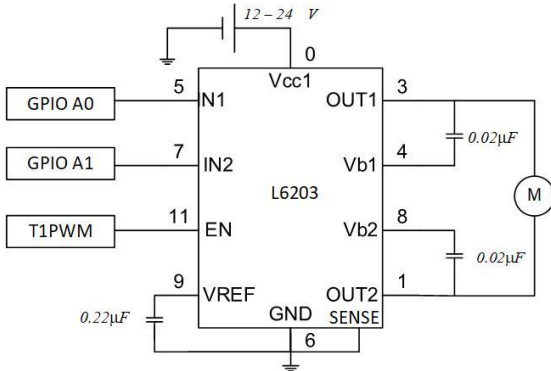


Figure 7. The circuit layout to prevent instant voltage variations in fast switching applications

(Int Kyn. 1)

### 6. Experiments

The practical inverted pendulum system is designed and setup on the sliding rail as shown in Figure 8. The DC motor voltage and duty cycle limits should be defined to overcome the frictional losses, which are essential to carry out duty cycle tests. Andrew (2005) development of a speed control system using matlab and simulink, implemented with a digital signal processor, M.S. thesis, Dept.Electr. Comput. Eng., Central Florida Univ., Orlando,Florida, USA. Duty cycle tests are illustrated in Figure 9. The highest PWM signal period which is embedded into TMS320F2812DSP with program is adjusted to 20 kHz for inverted pendulum system and tested for different duty cycles to move the cart. Duty cycle and average voltage are calculated with the following equations:

$$a = \frac{P}{T} \tag{6}$$

where  $P$  is the register content corresponding to the logical one level applied to the L6203 power circuit,  $T$  is the register content corresponding to the period of the PWM signal, and  $a$  is the duty cycle ratio. The complete period in the system corresponds to the register value 7500. Duty cycle ratio is experimentally found approximately 63% to accelerate motor under the static frictions. Figure 9 also illustrates lower duty cycles which couldn't overcome the static friction. The equation below yields average DC motor input voltage:

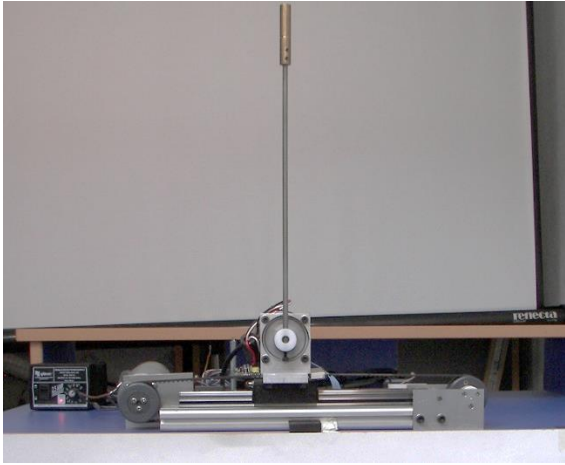
$$v(t) = a(t) \cdot V_o \tag{7}$$

where  $V_o$  is constant voltage which the power circuit outputs when the duty cycle is at one level. The PID constants of the control system are tuned to their right values by the trial and error method. To determine the performance of the inverted pendulum system two experiments will be conducted. In both experiments, the initial pendulum angle is selected as zero. The inverted pendulum variables and their values are given in Table 1. The first experiment is designed to illustrate consequences of utilizing the PID control algorithm alone. The experiment starts upon a disturbance applied to the pendulum by hand.

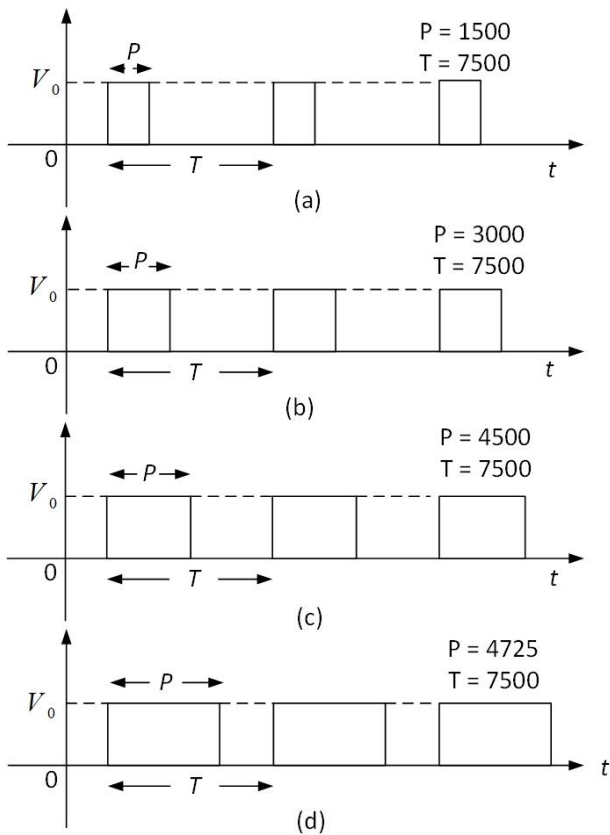
Table 1. Experimental variables and their values

Experimental variables	Value	Unit
DC motor voltage(maximum )	15	Volt
Mass of the cart	1	kg
Mass of the pendulum	0.1	kg
Initial position of the pendulum ( vertical)	0	Radian
Length of the pendulum	35	cm
Length of the path	25	cm
Initial position of the cart (horizontal)	0 (midway of the rail)	cm





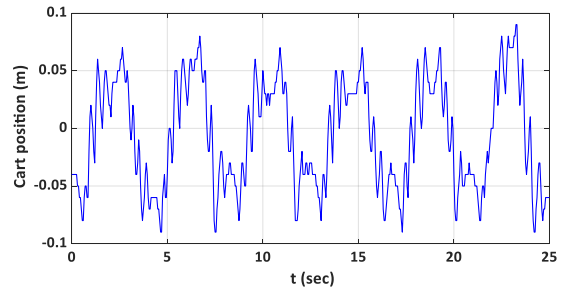
**Figure 8.** The Inverted pendulum designed on the sliding rail (Gün,A. 2007)



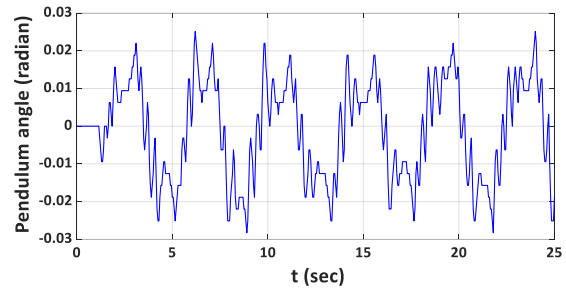
**Figure 9.** The DC Motor duty cycle tests graphs; in (a), (b), and (c) the DC motor cannot overcome the static friction; in (d) the minimum duty cycle so that the motor overcomes the static frictions

The system was in rest until the PID program in Ezdspf2812 was executed. In this experiment, there is no use of pendulum angle apart from inputting it to the PID controller. Immediately after the excitation of the pendulum by hand (small strike to

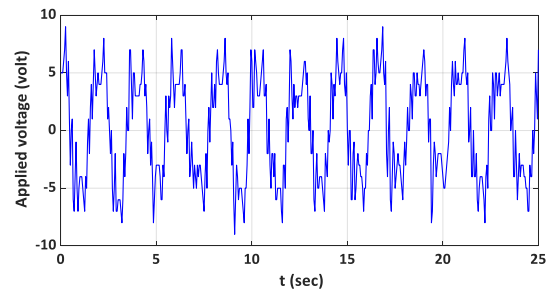
the pendulum), the change of the pendulum angle produces an error. This error drives the PID algorithm described by Equations (1 - 5). Using the output of this algorithm the PWM signal is determined. If PWM signal is positive, IN1 input of the DC motor driver should be active and other input should be passive, in the opposite case (i.e. when the PWM signal is negative), then IN2 input of the DC motor driver should be active and other input should be passive as shown in Figure 7. In this experiment, it has been observed that the cart oscillates between  $x_1 = -7$  cm and  $x_1 = +7$  cm, and the pendulum angle varies in between  $x_3 = -0.02$  radian and  $x_3 = +0.02$  radian. The oscillations are due the friction effects which we will eliminate in the second experiment. The experimental results are shown in Figures 10-12.



**Figure 10.** Time response of the cart position

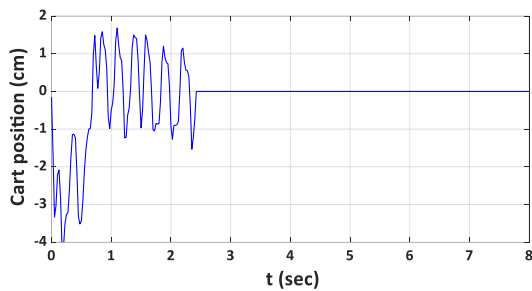


**Figure 11.** Time response of the pendulum angle

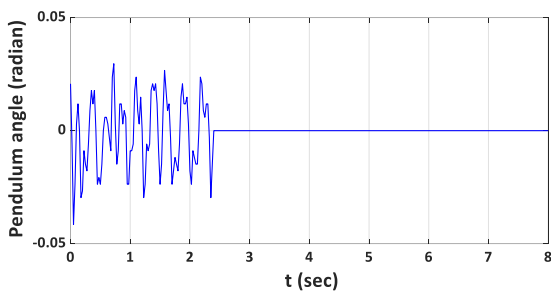


**Figure 12.** Time response of the applied voltage

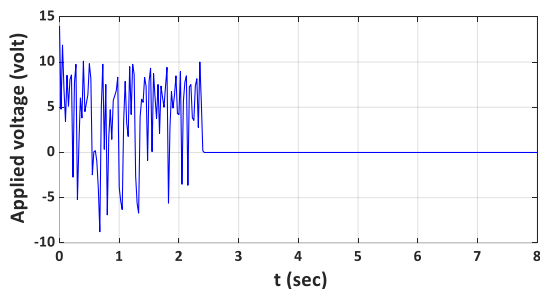
In the second experiment it is aimed to eliminate the oscillations. It also starts with applying a small disturbance to the pendulum by hand. Besides the PID algorithm, upon detecting the cart position and pendulum angle in a very close neighborhood of the desired state, the motor input is set to zero volt. This may be called the small angle approach along with the PID control. As a result, the system oscillates about 3 seconds before reaching the equilibrium state. The cart position, pendulum angle and applied motor voltage versus time are shown in Figures 13-15 respectively.



**Figure 13.** Time response of the cart position in Experiment 2



**Figure 14.** Time response of the pendulum angle in Experiment 2



**Figure 15.** Motor voltage versus time in Experiment 2

## 7. Conclusion

In this study, an experimental implementation of an inverted pendulum control system is presented. Inverted pendulum angle and cart position are measured using encoders. By means of these encoders PID controllers are driven to stabilize the inverted pendulum system. It has been shown that the small angle approach improved the performance of the PID controller, so that the stabilization is achieved in the presence of unknown frictions.

## 8. References

- Andrew, K. 2005. Development of a speed control system using matlab and simulink, implemented with a digital signal processor. M.S. thesis, Dept. Electr. Comput. Eng., Central Florida Univ., Orlando, Florida, USA, 95.
- Asa, E., Benjanarasuth, T., Nundrkwang, S., Ngamwiwit, J., and Komine, N., 2008. Implementatin of Swinging-up and Stabilizing Controllers for Inverted Pendulum on Cart System. *2008 International Symposium on Communicatios and Information Technologies*, Lao, China, 504-507.
- Cheng, F., Zhong, G., Li, Y. and Xu, Z. 1996. Fuzzy Control of a Double Inverted Pendulum. *Fuzzy Sets Syst*, **79**, 315–321.
- El-Hawwary, M. I., Elshafei A. L., Emara, H. M., and Fattah H. A. A. 2006. Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem. *IEEE Trans. Control Syst. Technology*, **14(6)**, 1135-1144.
- Gani, A., Açıkgöz, H., Kılıç, E. and Şit, S., 2014. Ters sarkacın bulanık mantık esaslı denetimi. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, ELECO'14*, 347-350.
- Gün, A. 2007. Yetersiz uyarımlı bir elektromekanik sistem gerçekleşmesi ve denetimi. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 129.
- Hung, T. H., Yeh M. F. and Lu, H. C., 1997. A PI-Like Fuzzy Controller Implementation for the Inverted Pendulum System. *IEEE Int. Conf. Intell. Process. Syst.*, Beijing, China, 218–222.
- Jung, S., and Kim, S. S. 2008. Control Experiment of a Wheel-Driven Mobile Inverted Pendulum using Neural Network. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, **14(6)**, 297-303.

Jung, S., and Kim, S. S. 2007. Hardware Implementation of a Real-Time Neural Network Controller with a DSP and an FPGA for Nonlinear Systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **54 (1)**, 265-271.

Kharola, A., Patin, P., Raiwani, S. And Rajput, D., 2016. A comparison study for control and stabilisation of inverted pendulum on inclined surface (IPIS) using PID and fuzzy controllers. *Recent Trends in Engineering and Material Sciences*, **8**, 187-190.

Magana, M. E. and Holzapfel, F. 1998. Fuzzy-Logic Control of an Inverted Pendulum with Vision Feedback. *IEEE Trans. Educ.*, **41 (2)**, 165–170.

Muskinja, N. and Tovornik, B. 2006. Swinging Up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **53(2)**, 631-639.

Tao C. W., Taur, J. S. T., Hsieh, W. and Tsai, C. L. 2008. Design of a Fuzzy Controller with Fuzzy Swing-Up and Parallel Distributed Pole Assignment Schemes for an Inverted Pendulum and Cart System. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, **16(6)**, 1277-1288.

Wang, J.-J., 2011., Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **19**, 440-449.

### ***İnternet kaynakları***

1. <https://www.st.com/en/motor-drivers/l6203.html>  
(13.03.2020)
2. <https://www.ti.com/product/TMS320F2812>  
(27.03.2021)
3. <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum&section=SystemModeling>  
(15.07.2020)



AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055202 (1086-1096)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055202 (1086-1096)

DOI: 10.35414/akufemubid.836620

Araştırma Makalesi / Research Article

# Amorf Çekirdekli Transformatörün Çoklu Fizik Yöntemiyle Elektromanyetik - Sıcaklık Analizi

Atabak NAJAFI<sup>1</sup>, İres İSKENDER<sup>2</sup>*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir<sup>1</sup>  
Çankaya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara<sup>2</sup>*

Sorumlu yazar e-posta: ataberk.najafi@ogu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0319-7032><sup>1</sup>  
ires@cankaya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1968-1857><sup>2</sup>

Geliş Tarihi: 06.12.2020

Kabul Tarihi: 04.10.2021

## Öz

### Anahtar kelimeler

Sıcaklık dağılımı; Amorf çekirdek; Sonlu elemanlar analizi; Elektromanyetik kuplaj

Bu makalede, Amorf nüveli transformatörün sıcaklık analizini detaylı incelemek için, ısı transferi, akışkan akışı ve elektromanyetik analizlerini kapsayan çok disiplinli bir yaklaşım kullanılmıştır. Transformatörün bobini ve çekirdeğindeki güç kayıpları incelenip, sıcaklık ve akışkan akış analizleri elektromanyetik bir model ile birleştirilmiştir. Önerilen yöntem, Amorf çekirdekli gibi özel transformatörlerde, önceki noktasal sıcaklık bilgisine ya da sıcaklık Gradyan değerlerine ihtiyaç duymadan, sıcaklık değişimini detaylı olarak tahmin edebilmektedir. Teorik çalışma sonuçları uluslararası standartlara göre Dyn11, 34.5/0.4-kV, 630-kVA'lık amorf çekirdekli transformatör üzerine uygulanan deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Teorik ve pratik çalışma sonuçlarının karşılaştırılması, sonuçların büyük bir uyum içinde olduğunu göstermekte olup, kullanılan yöntem genç mühendislere güç transformatörlerin sıcaklık analiz çalışmalarında faydalı bir araç oluşturmaktadır.

## Electromagnetic-Temperature Analysis of Amorphous Core Transformer by Multiple Physics Method

### Abstract

### Keywords

Temperature distribution; Amorphous core; Finite element analysis; Electromagnetic coupling

To investigate the thermal analysis of the amorphous core transformer in detail, a multidisciplinary approach including heat transfer, fluid flow and electromagnet analysis has been used in this study. Thermal and fluid flow analysis have been combined with an electromagnetic model to study specific power losses in the coil and core. The proposed methodology is able to predict thermal distribution in detail in specific transformers such as amorphous core transformers, without requiring prior knowledge of nodal temperature or temperature gradient values. The results of the numerical study were confirmed by experimental results performed on a Dyn11, 34.5/0.4-kV, 630-kVA, transformer with amorphous core through thermal tests carried out according to the International Standards for oil immersed transformers. Comparison of theoretical and experimental results obtained in the study are in a good agreement and it will provide a useful tool for young engineers in thermal analyzing the power transformers.

## 1.Giriş

Enerji konusu dünyada olduğu gibi ülkemizde de önemli bir yere sahiptir. Elektrik şebekesinde kullanılan önemli bileşenlerden birini dağıtım ve güç transformatörleri oluşturmaktadır. Ülkemizde 500000 üzerinde farklı güç değerlerine sahip dağıtım transformatörleri kullanılmaktadır. Transformatörler üzerinde meydana gelen kayıplar elektrik şebekesinin verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Transformatörlerde meydana gelen kayıplar temel olarak iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Bu kayıplardan biri iletken kayıpları ve diğeri ise nüve kayıplarıdır. İletken kayıpları temel olarak elektriksel yüke bağlı olup yükün artmasıyla artar ve yükün düşmesiyle azalır. Nüve kayıplar veya boştaki kayıplar yükten bağımsız olarak transformatörlerde sürekli olarak meydana gelmektedir. Buna göre transformatörlerde nüve kayıplarının azaltılması önemlidir. Ülkemizde üretilen transformatörlerin hemen hemen hepsinin nüvesi silisli saclardan yapılmaktadır. Amorf nüve kayıpları silisli sac'lı nüve kayıplarına nazaran %70 daha azdır. Çin ve ABD gibi bazı ülkelerde silisli sac'lı nüvelerin yerine Amorf nüvelerin kullanılması yavaş yavaş artmaktadır. Buna göre bu makalenin temel amacı Amorf nüve'li transformatörlerde meydana gelen kayıplardan dolayı transformatörlerde oluşan sıcaklık artışının incelenmesi veya transformatörün sıcaklık analizidir. Makalede yapılan analizde Sonlu Elemanlar Yöntemi olarak tanınan SEY programı kullanılmıştır. Demir (Fe) esaslı amorf alaşımlar, mekanik özelliklerinin yanı sıra manyetik özelliklerinden dolayı da oldukça ilginçtirler. Bu alaşımlar hâlihazırda modern transformatör çekirdeklerinde kullanılan nano yapıli laminasyon şeritleri için kullanılmaktadırlar. Amorf şeritlerin kalınlıkları genellikle onlarca mikron arasında değişmekte olup yüksek hızlı soğutma yöntemiyle üretilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), diğeri sayısal yöntemler gibi elektrik makinelerinin ve transformatörlerin sıcaklık analizinde yoğun olarak uygulanmaktadır. Bu yöntem, test sonuçlarından elde edilen sabitler ve analitik formülleri içeren yarı deneysel yöntemlerin yerini alma amacıyla makinenin geometrik şeklini dikkate

olarak daha geliştirilmiştir (Amoivalis et al.2009). Aina vd.(2019)'da tavllanmış Fe78Si13B9 amorf alaşım çekirdeğinin, manyetik indüksiyon yoğunluğu, çekirdek kayıpları ve manyetik geçirgenliği gibi dinamik manyetik karakteristikler sistematik olarak farklı çalışma sıcaklıkları altında incelenmiştir. Yeni amorf yapıli elementlerin tanınması ve bileşim uyumlandırması ile, Wang vd .(2015)'de yüksek Fe içerikli mükemmel manyetik özelliğine sahip Fe83C1(Si,B,P)16 amorf alaşımları başarılı bir biçimde geliştirilmiştir. Son zamanlarda, cam şekillendirme yeteneği ile Fe tabanlı metalik cam yığınları (BMG), yüksek kırılma direnci ve daha yumuşak manyetik özelliklerinin araştırılması amacıyla, camsı alaşım (Fe0.75 B0.2 Si 0.05)96Nb4 'e eklenerek etkisi değerlendirilmiştir. (Fe0.75-xDyx B0.2Si0.05)96Nb4 (x=0-0.07) camsı alaşımları, çapları 4 mm'ye kadar olan 65x10-6 gibi yüksek λs değerine sahip camsı alaşımlı çubuklar olarak dökülebilmektedir. Bu sayede iyi mekanik özelliklerle yumuşak manyetik özellikler birleştirilmektedir (Li et al.2014). Azuma vd .(2020)'de demir bazlı amorf ve nano-kristalin Yumuşak manyetik alaşımların geçmişi gözden geçirilip ve bu malzemelerdeki transformatörler gibi manyetik cihazlarda son zamanlardaki ilerlemeler rapor edildi. Ayrıca Daha düşük oranlı transformatörler için, daha ince bir demir bazlı amorf alaşım şeridin, sarılmış nüvenin köşelerindeki eğilme gerilimi azaltılması nedeniyle ve daha küçük girdap akımı kaybı nedeniyle çekirdek kaybı için bir avantaja sahip olduğu gösterilmiştir.

Dianchun vd. (2000) ' de, kuru tip transformatörlerde sonlu farklar yöntemi yardımıyla kararlı durumda katman tipi sargıların sargı sıcaklık dağılımlarını incelemiştir. Zhang ve Li (2006]'da, disk tipi sargılarda ısı transferi problemini çözebilmek için sonlu hacim yöntemini kullanan sayısal bir modeli ortaya koyarak hem radyal hem de aksel doğrultudaki sıcaklık değişiminin 10° C'i aşabileceğini ve bu nedenle disk sargısı için iki boyutlu (aksel simetrik) bir sıcaklık modelin gerekli olduğunu göstermişlerdir. Zhang ve Li (2020)'de sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan uyarma altında 5kVA / 4.5 kHz amorf yüksek

frekanslı transformatörün (HFT) titreşim ve gürültünün ölçümü ve analizini gerçekleştirilmiştir. Ölçülen titreşim ve gürültü verilerini karşılaştıran ve analiz eden sonuçlar, sinüzoidal olmayan uyarma altındaki HFT'nin titreşiminin, sinüzoidal uyarmanınkinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir.

Diğer bir çalışmada El Wakil vd.(2006)'da, sonlu hacim metodu kullanılarak çekirdek ve sargıyı içeren bir transformatörün 2D simülasyonu incelenmiştir. 25 MVA'lık transformatörün ONAF soğutma performansı üzerindeki hava akışı yönü ve fan ofsetinin etkisi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi kullanılarak Paramane vd.(2014)'de incelenmiştir. Tsili vd. (2012)'de sunulan 3 boyutlu yinelemeli birleştirilmiş modelde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve bu yöntem transformatörün sıcaklık performansını yöneten termo-hidrolik denklemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Transformatör kayıpları ve sıcaklık değerleri, transformatörün değişken yüküne ve harmonik içeriğine göre tam olarak tahmin edilir. Tahmini değerler kullanılarak, sıcak nokta sıcaklığı standartlara göre hesaplanır (IEEE Standard C57.91-1995). Moonhee vd.(2010) 'da, kuru tip trafo için Sonlu elemanlar yöntemine (FEM) dayalı indüklenen akımlardan dolayı folyo sargısındaki düzgün olmayan sıcaklık dağılımlarını hesaplamak için elektromanyetik ile birleştirilerek bir sıcaklık model kullanılmıştır.

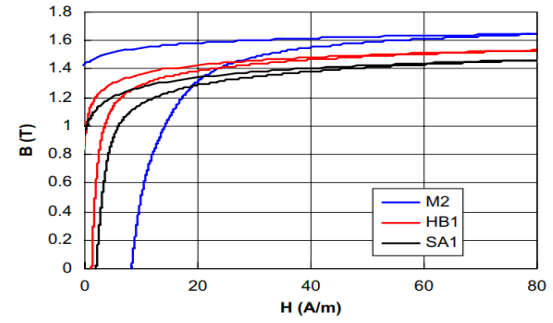
Bu makalede yağlı tip amorf çekirdekli transformatörün sıcaklık performansının analizini daha dikkatli yapmak için ısı transferi, akışkan akışı ve elektromanyetik analizleri birleştirilmiştir. Makale şu şekilde planlanmıştır: Bölüm 2'de, 630 kVA amorf çekirdekli transformatörün elektromanyetik analizi sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak sunulmaktadır. Bölüm 3'te, transformatörün sıcaklık performansının analizi için birleştirilmiş elektromanyetik-sıcaklık modeli incelenmiş ve ilgili sonuçlar yorumlanmıştır. 3D sonlu elemanlar yöntemine dayanarak simülasyon sonuçları 4. bölümde deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Transformatörün deneysel çalışmaları ve prototip imalatı Ankara'da TEK TRAFÖ işletmesinde yapılmış, yorum ve sonuçlar bölüm 5'te sunulmuştur.

## 2. Analizler

### 2.1. Elektromanyetik Analiz

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), akışkanlar dinamiği, katı ve yapısal mekanikler, ısı iletkenlik, manyeto statik ve elektromanyetik gibi türev ve integral denklemlerini çözen sayısal bir yöntemdir. SEY'in ana fikri, karmaşık diferansiyel denklemlerle fiziksel problemleri alt problemlere ayırmak ve bu denklemleri doğrusal sistemlerde çözmektir. Bu makalede Dyn11, 34.5/0.4-kV, 630-kVA amorf nüveli dağıtım transformatörünün manyetik ve sıcaklık incelemeleri yapılmıştır. Manyetik akı dağılımının incelenmesi üç boyutlu SEY'ye dayanarak aşağıdaki POISSON denkleminin çözümüyle gerçekleştirilmiştir (Najafi ve Iskender 2014).

Şekil 1. Amorf ve kristalin silikon çeliğin B-H eğrisi



$$\frac{\partial}{\partial X} \left( R \frac{\partial A}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( R \frac{\partial A}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( R \frac{\partial A}{\partial Z} \right) = \frac{-ni}{S_c} \quad (1)$$

Bu denklemde, A manyetik potansiyel vektörü, R nüve sacının manyetik direnci, n sarım sayısı, i akım ve  $S_c$  iletken kesitine işaret etmektedir. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı transformatör analizinde dinamik ve statik analiz olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır. Statik analiz çalışmasında, denklem (1)'de mıknatıslanma akımının değeri bilinmelidir. Ancak başlangıç durumundan kararlı duruma kadar olan sürede akımı elde etmek için transformatörün dinamik analizi yapılmalıdır. Bu yüzden, gerilim kaynaklarını giriş olarak modellenmesi gerekmektedir. Transformatör sargılarının içinden geçen akıma bağlı olarak oluşturduğu manyetik alan denklemini aşağıdaki gibidir (Najafi ve Iskender 2016):

$$\nabla^2 A - \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu J_0 = 0 \quad (2)$$

Bu denklemde,  $\mu$  manyetik geçirgenlik,  $\sigma$  elektriksel iletkenlik ve  $J_0$  uygulanan akım yoğunluğudur. Nüvede, denklem (2) den elde edilen akı yoğunluğunun dağılımı (A) aşağıda verilen denklemlerden elde edilmektedir:

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

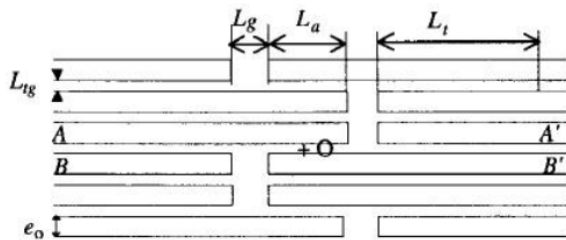
Şekil.1 amorf Metglass 2605(HB1), amorf 2605(SA1) alaşımı ve kristal M2 dereceli silikon çelik için B-H eğrisini göstermektedir. Bu makalede 2605(SA1) amorf alaşım kullanılmıştır. Bu tür amorf alaşımlar için doyma akı yoğunluğu yaklaşık 1,42 T'dir. Kullanılan Amorf ve M5 Çekirdeğin teknik özellikleri Çizelge 1 de verilmektedir.

**Çizelge 1.** 2605(SA1) Amorf ve M5 Çekirdeğin teknik özellikleri

Şekil 2'de gösterildiği gibi Tek çekirdekli(Unicore) teknoloji, amorf çekirdek transformatörü

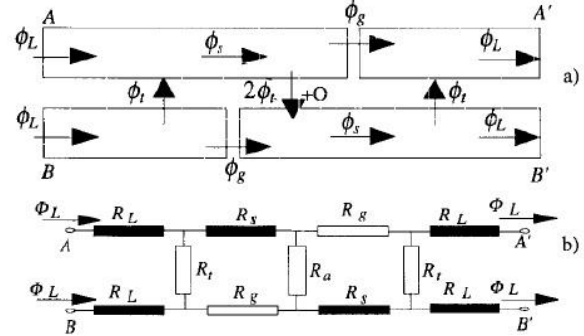
Özellikler	Amorf metal	M5 çelik
Yoğunluk	7.18	7.65
Özgül direnç	130.00	45.00
Tipik çekirdek kaybı (50 Hz, 1.4 Tesla)	1.56	2.03
Kalınlık	25 $\mu\text{m}$	0.30 mm
Uzay faktörü	0.86	0.97
Kırılgenlik	Yüksek	Düşük
Mevcut form	Ribbon foil (142.2 mm, 172.2mm&213.4 mm)	Sheet Roll
Tavlama sıcaklığı	360	810
Tavlama atmosferi	Atıl gaz	Atıl gaz
Özel gereksinimi	tavlama Magnetic field annealing	----

tasarlamak için kullanılmıştır. Bu yöntemde dayanarak, C ve E tip çekirdekli transformatörlere kıyasla akı dağılımı iyileştirilecektir.



**Şekil 2.** Amorf şerit bağlantılarının şematik gösterimi

Şekil 3, amorf şerit bağlantı noktalarındaki manyetik akı dağılımını ve eşdeğer elektrik devre modelini göstermektedir. Rg, şerit bağlantı boşluğu manyetik direnci olarak tanımlanır, Rs, amorf bir şeridin başka bir amorf şeritle örtüşme manyetik direnci ve Rt, iki amorf şerit arasındaki boşluk manyetik direncidir.

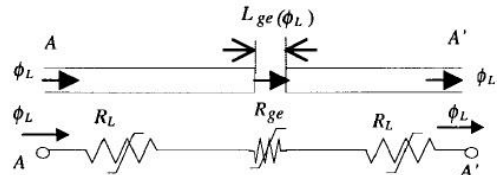


**Şekil 3.** a) Amorf şerit bağlantı akı dağılım şeması b) eşdeğer elektrik devre şeması

Şekil 3'de gösterilen tüm manyetik direnç değerleri denklem 4 ile bulunur.

$$R = \frac{vL}{S} \quad (4)$$

Amorf şerit bağlantılarının geometrisi dikkate alınarak, doğrusal olmayan ve doğrusal hava boşluğunun elektrik devre modeli çizilmelidir. Doğrusal olmayan hava boşluğu eşdeğer devresi Şekil 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Doğrusal olmayan hava boşluğu eşdeğer devresi

Şekil 3 ve 4'de A-A noktaları arasındaki amper yasası uygulandığında denklem 4 ve 5 elde edilir.

$$\int_A^{A'} Hdl = 2R_L Q_L + R_S Q_S + R_g Q_g \quad (4)$$

$$\int_A^{A'} Hdl = 2R_L Q_L + \frac{L_{ge}}{\mu_0 S_L} Q_L \quad (5)$$

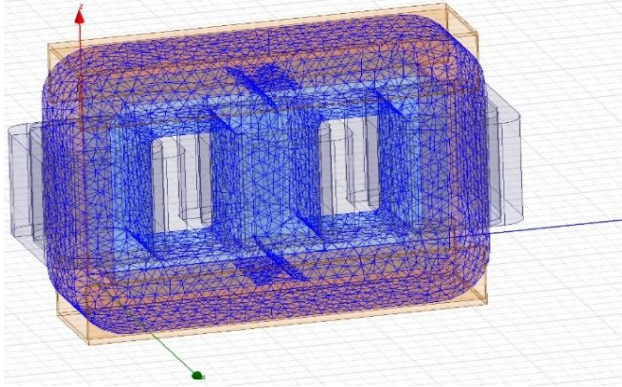
$L_{ge}$ , minimum ve maksimum değerler arasında salınır. Akı yoğunluğunun oldukça düşük olduğu durumlarda  $L_a$ ,  $L_t$  ve  $L_g$  değerleri denklem 6'daki gibidir.

$$\int_A^A Hdl = 2R_L Q_L + \frac{L_{ge-min}}{\mu_0 S_L} Q_L \quad (6)$$

Akı değeri küçük olduğunda Lt oldukça büyük olacak ve 1/Lt sıfıra yakın olacağı için denklem 7 olarak elde edilir.

$$L_{ge-min} = e_0 L_{tg} \frac{2}{L_a} \quad (7)$$

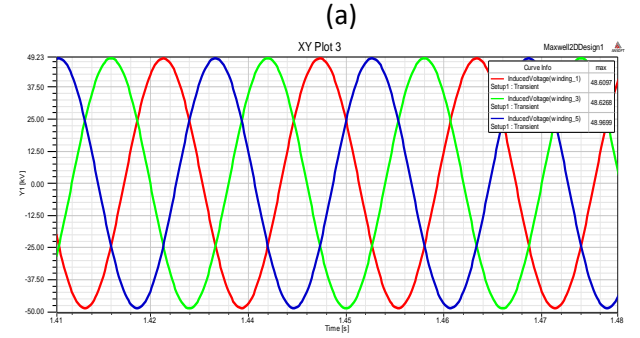
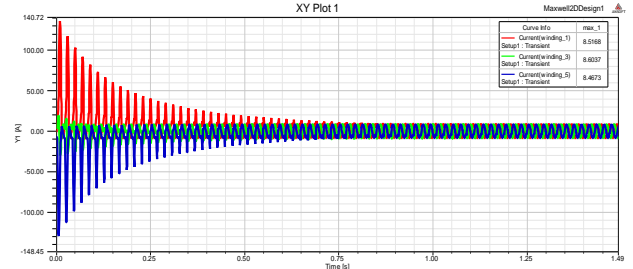
Çalışmalarda transformator nüvesine uygulanan ağ yoğunluğu Şekil 5’de gösterilmektedir. SEY çalışmalarında ağ yoğunluğu ciddi öneme sahiptir. Analizlerde yapılan işlemlerin sayısı ağ yoğunluğuna bağlıdır. Ağ yoğunluğu arttığında işlem sayısı ve süresi ciddi bir oranda artmaktadır. Ağ yoğunluğunun artması aynı zamanda işlem hatlarını düşmesine de neden olmaktadır. Buna göre SEY çalışmalarında yapılacak araştırmanın özelliklerine göre optimal ağ yoğunluğuna karar verilmelidir. Makalede yapılan çalışmada, manyetik nüve, sargılar ve nüve kelepçesinde ağ sayıları sırasıyla 65 350, 22 430, 40 000 olarak dikkate alınmıştır. Makalede yapılan 3 boyutlu modelleme çalışmasında tüm ağların yapımı tetrahedral şeklindedir.



Şekil 5 .3-boyutlu Transformatorün ağ modeli

Simülasyon 1500 ms’lik sürede ve 0,2 ms’lik adımlarla geçici durum analizi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen raporlara göre Şekil 6’de transformatorün primer sargı gerilimleri ile akımların grafikleri verilmiştir. Transformatorler, güç kaynağına bağlandığı ilk anda primer tarafında çekilen akımın değeri normal akım değerinin 8-12 katı kadar olabilir ve “aşırı başlangıç akımı” olarak bilinmektedir. SEY yazılımı, transformatorün birkaç döngü boyunca çekmiş

olduğu aşırı başlangıç akımını da gösterebilmektedir. Aşırı başlangıç akımı yaklaşık olarak 500 ms’de normal değerine düşmektedir.

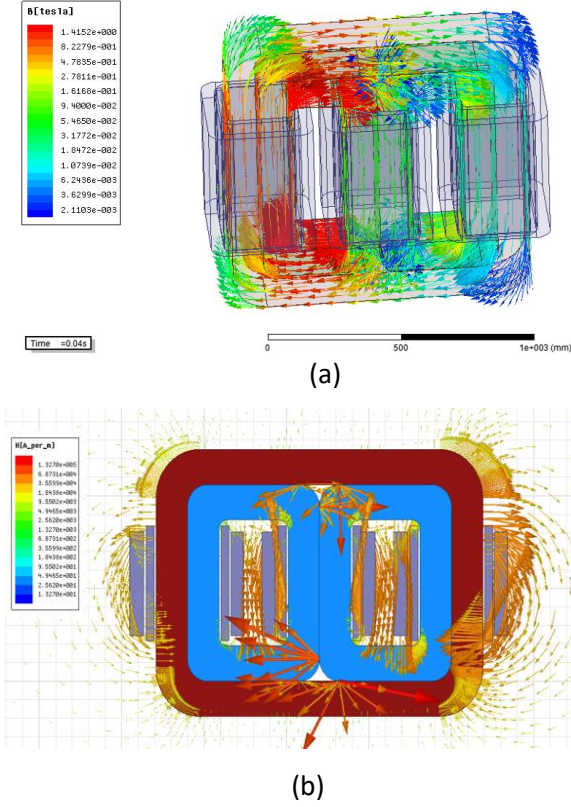


(b)

Şekil 6. Primer sargıda a)Akım b) indüklenen gerilim

Araştırma söz konusu olan transformatorün manyetik parametrelerinin ve geometrik boyutları ile transformator içerisindeki manyetik alan dağılımının incelenmesinde SEY kullanılmıştır. Şekil 7, incelenen amorf çekirdekli transformatordeki manyetik akı yoğunluğunu ve manyetik alanı göstermektedir. Transformator çekirdeğinin farklı topolojilerini ve malzemelerini karşılaştırmak için elektromanyetik analizdeki ilk adım, çekirdek ve transformatorlerin diğer bölgelerindeki akı dağılımını ve manyetik alanı analiz etmektir.





Şekil 7. a) Transformatör çekirdeğindeki akı yoğunluğu dağılımı b) Transformatör etrafındaki manyetik alan

Amorf nüveli transformatörde, amorf nüvenin yuvarlak olarak hazırlanması sonucu mitre köşesi bulunmamaktadır. Bu dizme yöntemi silikon saclı yöntemle karşılaştırıldığında çekirdek kayıplarının azalmasının önemli nedenlerinden biridir. Bu tür nüvelerde birleşme bölgelerinin olmaması bu tür kayıpların meydana gelmemesinin temelini oluşturmaktadır.

Transformatörün elektromanyetik analizi detaylı bir biçimde (Najafi ve Iskender 2016, Aina et al.2016 )'de incelenmiştir. Bu makalede yapılan çalışmalar ısı transferi, akışkan akış ve elektromanyetik analizlerin birleşimine dayanarak amorf nüveli transformatörlerin sıcaklık modellenmesine odaklanmıştır.

## 2.2. Sıcaklık Analiz

Elektromanyetik-Sıcaklık Modelin Birleştirilmesi:

Malzemelerin bazı özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiği gibi elektromanyetik alanlar da sıcaklık etkilerden etkilenmektedir. Sıcaklıktan doğrusal

etkilenen elektriksel özelliklerden biri elektriksel özdirençtir. Elektriksel özdirenç değeri ( $\rho_e$ ) sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki denklemden elde edilir:

$$\rho_e(T) = \rho_{e,0}[1 + \alpha_c(T - T_0)] \quad (8)$$

Bu denklemde;  $\rho_{e,0}$  referans sıcaklık değerindeki özdirenç değeri,  $\alpha_c$  sıcaklık sabiti [K<sup>-1</sup>], ve  $T_0$  referans sıcaklık [K] değeridir.

Elektriksel iletkenlik değeri denklem 9'dan elde edilir:

$$\sigma_e(T) = \frac{1}{\rho_e(T)} = \frac{\sigma_{e,0}}{1 + \alpha_c(T - T_0)} \quad (9)$$

$\sigma_{e,0}$ ,  $T_0$  referans sıcaklığında ki elektriksel iletkenlik değeridir. Elektriksel özdirenç değeri sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve buna bağlı olarak ta iletken direnç değeri değişmektedir. Buna göre sıcaklık değişimiyle iletken direnci tekrar hesaplanmalıdır.

$$R = \frac{\rho_e(T).l}{A_c} \quad (10)$$

Bu denklemde  $A_c$  iletkenin kesit alanı [m<sup>2</sup>] ve  $l$  iletkenin ortalama uzunluğudur [m].

Transformatör yağının fiziksel özelliklerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Yağ özelliklerini göstermek için değişkenlerin birim değerleri (birim başına) kullanılmıştır. Değerin 45 ° C bazında alınmasının sonucu Şekil 8'de gösterilmiştir. Transformatör yağının yoğunluğu ile sıcaklık arasındaki ilişki denklem 11 ile hesaplanır(Makarov ve Emanuel, 2000):

$$\rho_{oil}(\theta) = 1098.72 - 0.712\theta \quad (11)$$

Yağın sıcaklık iletkenliği ile sıcaklık arasındaki ilişki:

$$k_{oil}(\theta) = 0.1509 - 7.101E - 0.5\theta \quad (12)$$

Yağın sıcaklık kapasitesi ile sıcaklık arasındaki ilişki denklem 13 ile elde edilir:

$$C_{oil}(\theta) = 807.163 + 3.5\theta \quad (13)$$

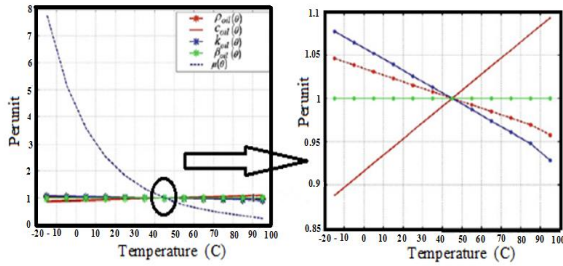
Yağın sıcaklık genişleme katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki:

$$\beta_{oil}(\theta) = 8.6 \times 10^{-4} \quad (14)$$

Yağın viskozitesi ile sıcaklık arasındaki ilişki denklem 15 ile hesaplanır:

$$\mu(\theta) = 0.08467 - 0.0004\theta + 5E - 7\theta^2 \quad (15)$$

Görüldüğü gibi sıcaklıkla viskozite değişimi diğer fiziksel parametrelerden daha fazladır. Bu nedenle, diğer parametrelerin değişimi göz ardı edilebilir(Lin vd.2020).



**Şekil 8.** Transformatör yağının ısısal özellikleri (birim başına).

Transformatör yağı sıkıştırılmaz bir sıvı olduğundan, yağ hareketini tanımlamak için süreklilik, enerji ve momentum denklemleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$\nabla \cdot \rho w = 0 \quad (16)$$

$$\rho \cdot \nabla w = F - \nabla p + u \cdot \nabla^2 w \quad (17)$$

$$\rho c w \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) + q \quad (18)$$

Burada  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>)kütle yoğunluğu (birim hacim başına kütle), $w$ (m<sup>3</sup>/s) sıvı hızıdır. Isı, konveksiyon ve radyasyon yoluyla transformatörün Tank duvarından dağıtılır. Ayrıca tank duvarından konveksiyonla ısı dağılımı diğerinden daha yüksektir. Transformatör tank duvarının hava ile ısı konveksiyonundan kaynaklanan toplam enerji

kaybını hesaplamak için Aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$q' = hS(T_s - T_f) \quad (19)$$

$$h = \frac{k}{l} Nu \quad (20)$$

$q'$  toplam enerji kaybı ( $w$ ),  $T_f$  çevre sıcaklığı ( $k$ ),  $T_s$  transformatör Tank duvar sıcaklığı( $k$ ),  $h$  ısı taşınım katsayısı( $\frac{W}{m^2k}$ ),  $N$  usselt sayısı,  $S$  akışkanın tamam ettiği yüzey alanı ( $m^2$ ), düşey düzlemde  $N_{uv}$  ve yatay düzlemde  $N_{uh}$ , aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilir(Makarov ve Emanuel, 2000):

$$N_{uv} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (21)$$

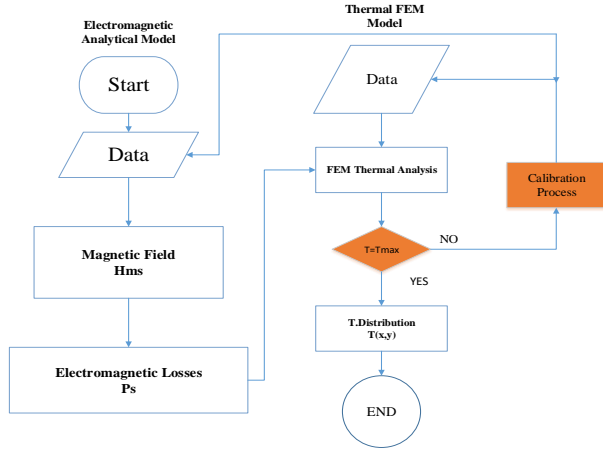
$$N_{uh} = 0.27 Ra^{1/4} \quad (22)$$

$R_a$  Rayleigh sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_f)L^3\rho}{ua} \quad (23)$$

Rayleigh numarası ( $R_a$ ) bir akışkan için kaldırma kuvveti ile yönlendirilen akışla ilişkili boyutsuz bir sayıdır.  $\beta$  sıcaklık genişleme katsayısı,  $g$  yerçekimine bağlı ivmedir,  $\alpha$  sıcaklık yayılımıdır, ısı iletim denklemindeki ısı üretme terimi, sıcaklık değişimlerine bağlıdır. Sıcaklık değişimleri, ısı üretme teriminin ve ısının yeniden hesaplanmasını gerektirmektedir.

Bu yüzden, elektromanyetik analiziyle sıcaklık analizi birleştirilmektedir. Literatürde güç transformatörleri ile ilgili yapılan sıcaklık modellerde daha önce elektromanyetik modelleri kullanılmamıştır. Aslında, elektromanyetik-sıcaklık modelleri küçük dağıtım transformatörleri ve basit indüktörlere sınırlı sayıda uygulanmıştır.



Şekil 9. Birleştirilmiş elektromanyetik-sıcaklık analizin akış şeması

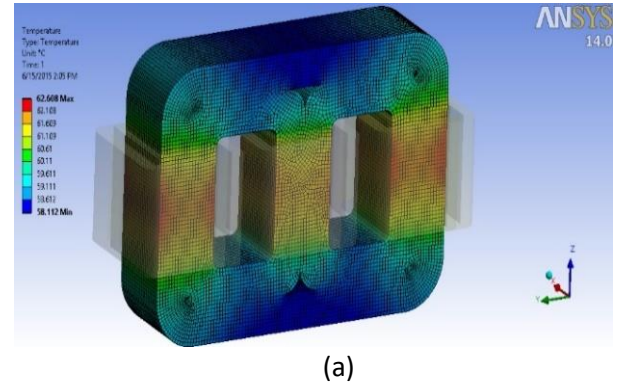
Birleştirilmiş elektromanyetik ve sıcaklık problemin çözümleri aşağıdaki adımlar kullanılarak elde edilir:

1. Başlangıç sıcaklığındaki elektromanyetik model çözülür ve güç kayıpları hesaplanır.
2. Daha önce  $t=0$  anı için elde edilen güç kayıpları kullanılarak sıcaklık model çözülür.
3. Sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik, konveksiyon sabiti vb. gibi sabitler ve malzeme özellikleri güncellenir, analiz zamanı  $\Delta t$  zaman adımı olarak artırılır.
4. Daha önce elde edilen sıcaklıkta elektromanyetik modeli çözülür.
5. Son analiz zamanına kadar 3. ve 4. adımlar tekrarlanır.

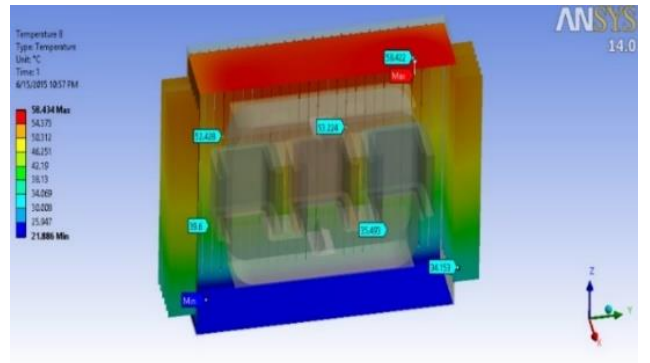
Şekil 6, birleştirilmiş elektromanyetik-sıcaklık probleminin çözümünün akış şemasını göstermektedir. Bu çalışmada önerilen manyeto termik kuplajı, Sabit durum AC manyetik hesaplaması ile (Joule etkisi ile incelenen amorf nüveli transformatörün ısıtılmış bileşenlerinde harcanan aktif güç kaybının tahminini mümkün kılan), geçici sıcaklık hesaplaması arasında bir bağlantı oluşturmaktadır. manyetik hesaplamadan elde edilen güç kayıpları, sıcaklık denklem sistemlerinin ısı kaynakları olarak tanıtılır. Diğer taraftan, sıcaklık hesaplamayla elde edilen sıcaklık, manyetik geçirgenlik, elektrik direnci ve geçirgenlik gibi elektromanyetik özelliklerin sıcaklığa bağımlılığını karşılamak için manyetik denklemlerdeki malzeme özelliklerinin değerlendirilmesi için göz önünde bulundurulur. Her bir zaman adımında, analiz edilen zaman

adımına karşılık gelen sıcaklık alanının kararlılığı elde edilene kadar, sıcaklık ve manyetik hesaplamaların lokal olarak bağlanması gerçekleştirilir.

SEY kullanılarak, transformatörün tüm aktif (nüve ve sargılar) ve pasif (tank ve dalga duvar) kısımları küçük elemanlara ayrılır ve bu elemanlar için interpolasyon fonksiyonları seçilir. Daha sonra, birleştirilmiş model, elemanın üzerine entegre edilen ağırlıklı rezidüeyi sıfıra ayarlayarak, tek bir eleman için matris denklemlerinde formüle edilir. Galerkin yöntemi kullanılarak ağırlık fonksiyonu için interpolasyon fonksiyonu seçilir. Elektromanyetik ve sıcaklık analizlerden elde edilen çözümler her elemanda birbirini etkilemektedir. Birleştirilmiş problemdeki zamana bağlı terimlerin de ayrıklaştırılmaya ihtiyacı vardır. Bunun için sonlu fark yöntemi kullanıldı, çünkü bu yöntemle elde edilen sonuçlar tüm zaman aralıkları için kararlıdır. Şekil 10a, 3 fazlı 630 kVA amorf nüveli transformatör nüvesinin sonlu elemanlar yönteminde ki sıcaklık değişimini göstermektedir. Transformatör nüvesindeki en sıcak nokta, sargıların yanında bulunan transformatör bacalarının köşelerindedir ve bu sıcaklık  $62.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak elde edilmiştir.

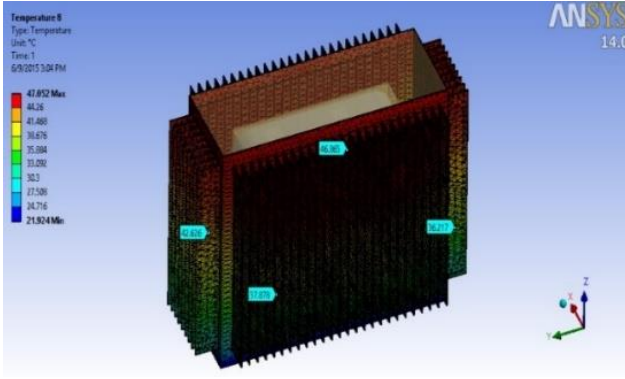


(a)



(b)





(c)

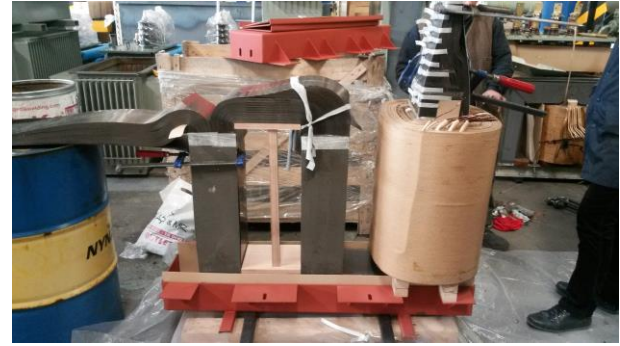
**Şekil 10.** Sıcaklık dağılımının sayısal modeli a) transformatör nüvesinde b) transformatör yağında c) transformatör tank duvarında

Şekil 10b transformatör yağının farklı bölgelerindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sayısal çözüme göre, “yağın sıcak nokta sıcaklığı” Şekil 10b de görüldüğü gibi yağın üst bölgesinde tespit edilmiştir. Bu bölgede sıcaklık 58.42 °C’ye ulaşmıştır. Şekil 10c transformatör tank duvarındaki ısının dağılımını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi transformatör tankındaki en yüksek sıcaklık 47 °C olarak tespit edilmiştir.

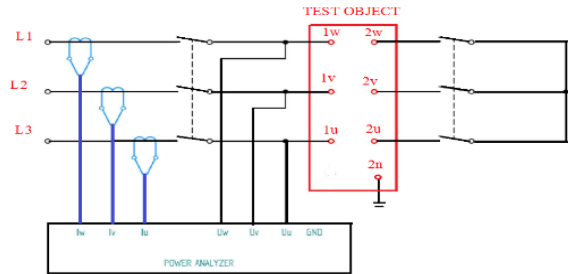
### 3.Deneysel Doğrulama

Bu bölümde önerilen birleştirilmiş sıcaklık model sonuçları ile TEK TRANSFORMER fabrikasında üretilen 630 kVA,34.5/0.4kV prototip transformatörün deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, transformatörün tasarımını optimize etmek için Şekil 11’de gösterildiği gibi amorf çekirdek transformatöründe çekirdek laminasyonlarının z-tipi uncore düzenlemesi kullanılmıştır. Z tipi uncore nüvede, yuvarlanma yönünden sapan manyetik akının miktarı transformatör nüvesinin köşelerinde önemli ölçüde azalmaktadır. Önerilen sıcaklık modelini doğrulamak için, ilk olarak transformatörün boşta ve yükteki kayıpları C57.12.00.2006 IEEE standartına göre ölçülmüştür. Deneysel çalışmalardan elde edilen toplam kayıplar 5402 W olmuştur. Daha sonra, sıcaklık artış testi IEC 60076-2 standartında 7.3.2 maddesine göre gerçekleştirilmiştir ve beşer dakikalık sürelerde ilgili parametreler ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Deneysel

çalışmalar esnasında kullanılan test düzeneği Şekil 12’de gösterilmektedir. Sıcaklıklar transformatörün 8 farklı noktasından PT-100 sensörleri yardımıyla ölçülmüştür.



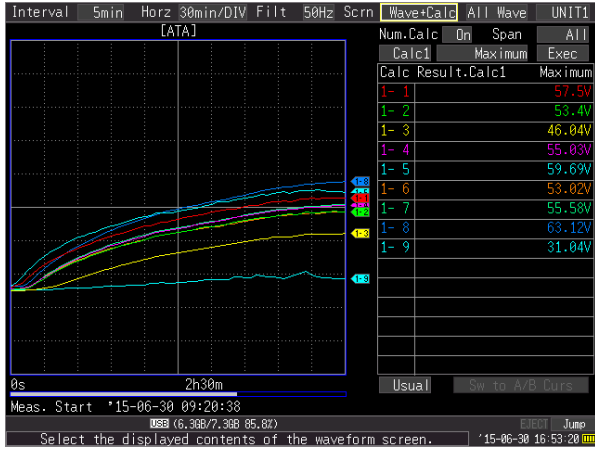
**Şekil 11.** Amorf çekirdekli prototip transformatör imalatı



**Şekil 12.** Sıcaklık artış deneyindeki devre bağlantı şeması

Sensörler transformatörün sekiz noktasında sıcaklıkları ölçmek için kullanılmıştır. Bir sensör, transformatörün nüvesindeki sıcaklığı ölçmek için nüvenin bacağına monte edilmiştir. Üç sensör yağ sıcaklığını ölçmek için yağın farklı yerlerine yerleştirilmiştir. Bir sensör ise ortam sıcaklığını ölçmek için transformatöre bir metre uzaklığına ve diğer dört sensör, kazan duvarlarındaki ve transformatörün kapak yüzeyindeki sıcaklığı ölçmek için kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık artış sonuçları, nominal yük altındaki transformatörün yağ sıcaklığı, kapak ve

tank duvarlarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 13'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi transformatörüm yağ sıcaklığını ölçmek için kullanılan sensörler 63.12, 55.58,53.4 dereceği göstermektedir. Ortam sıcaklığını ölçmek için transformatörden bir metre uzağa yerleştirilen sensör yaklaşık 31 derece gösterir. Tank duvarında ve tank kapağı yüzeyine yerleştirilen sensörler sırasıyla 55.03,46.04,53.02 ve 57.5 dereceyi göstermektedir. Transformatörün nüvesindeki sıcaklığı ölçmek için kullanılan sensör 59.69 dereceği göstermektedir. Deneysel sonuçlarıyla benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ölçülen sonuçlarıyla önerilen birleştirilmiş sıcaklık modelden elde edilen sonuçlarla çok iyi bir uyum içinde olduğunu tespit edilmiştir.



Şekil 13. Transformatör tank duvarının faklı bölgelerinde ve transformatör yağında ölçülen sıcaklıklar

#### 4. Sonuçlar

Bu makalede amorf-nüveli yağlı-tip dağıtım transformatörün sıcaklık analizi yapılmıştır. Bu çalışmada manyetik alan ile sıcaklık modellerinin birleştirilmiş ortak modeli kullanılmıştır. 630 kVA'lık amorf nüveli transformatör için sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar yöntemi programı yardımıyla hesaplanmıştır. Transformatör nüvesinin sıcaklık dağılımı zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplanmış ve kararlı durumda en sıcak noktanın sıcaklığı nüve bacalarının merkezinde belirlenmiştir. Kullanılan model ısı iletim denklemini elektromanyetik denklem ile birleştirdiğinden, farklı çalışma

koşulları altında sargı sıcaklıklarını tahmin edebilmektedir. Makalede önerilen yöntemle elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlarının çok uyumlu olduğu görünmüştür. Buna göre önerilen yöntem güç transformatör üreticileri tarafından transformatörün tasarımı aşamasında kullanılabilir. Transformatör firmalarında ulusal ve uluslararası standartlara göre uygulanması öngörülen bazı rutin ve özel test sonuçlarını bu makalede önerilen yöntemle tahmin edilmesi mümkündür. Bu testlerden biri sıcaklık artış testidir ve bu test genel olarak 16 saat sürmektedir. Makalede önerilen yöntem yardımıyla 16 saatlik bir süre beklemeden test sonuçlarının tahmin edilmesi mümkündür. Simülasyon 1500 ms'lik sürede ve 0,2 ms'lik adımlarla geçici durum analizi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ayrıca, ilgili işletme için hem zaman kazandırır hem de uzun süreli testlerde tüketilen elektrik enerji kaybının önünü almaktadır.

#### References

- Amoialis,E., Tsili,M., Kladas, A.,2009 .Transformer design and optimization: a literature survey. IEEE transactions on Power Delivery ,**24 (4)**, 1999-2024.
- Aina,H ., Anding,W ., Shiqiang,Y.,2016 .Dynamic magnetic characteristics of Fe78Si13B9 amorphous alloy subjected to operating temperature. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **408**, 159-163.
- Azuma,D., ilto,N. , Ohta,M., 2020.Recent progress in Fe-based amorphous and nano-crystalline soft magnetic materials. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **501**,230-242.
- Dianchun,Z., Jiayang,Y., Zhenghua,W.,2000 .Thermal field and hottest spot of the ventilated dry-type transformer. Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, **1**, 141-143.
- El Wakil,N., Chereches.,N.,Padet,j.,2006. Numerical study of heat transfer and fluid flow in a power transformer. International journal of thermal science, **45**, 615-626.
- IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.91-1995
- Li,j., Estévez, D ., Jiang,K .,2014 .Electronic-structure origin of the glass-forming ability and magnetic

- properties in Fe-RE-B-Nb bulk metallic glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, **617**, 332-336.
- Lin,N., Liu,P., Dinavahi,V., 2020. Component-Level Thermo-Electromagnetic Nonlinear Transient Finite Element Modeling of Solid-State Transformer for DC Grid Studies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* ,**68**,938-948.
- Makarov,S,N., Emanuel,A,E., 2000.Corrected harmonic loss factor for transformer supplying nonsinusoidal current.,9. international conference on Harmonics and Quality of power, 87-89.
- Moonhee,L., Abdullah,A., Jofriet.,C., 2010. Temperature distribution in foil winding for ventilated dry-type power transformers, *Electric Power System Research*, **80**, 1065-1073.
- Najafi,A.,Iskender,I.,2014 . Evaluating and derating of three-phase distribution transformer under unbalanced voltage and unbalance load using finite element method. *IEEE 8th international power engineering and optimization conference*. 160–165.
- Najafi,A., Iskender,I.,2016. Electromagnetic Force Investigation on Distribution Transformer Under Unbalanced Faults Based on Time Stepping Finite Element Methods. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **76**, 147–155.
- Paramane,S., Joshi,K., Van,W., Sharma,A.,2014 .CFD study on thermal performance of radiators in a power transformer: effect of blowing direction and offset of fans, *IEEE Transaction on Power Delivery*, **29 (6)** , 2596–2604.
- Tsili,M ., Amoiralis,E., Kladas,A., Souflaris,A.,2012. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model. *International Journal of Thermal Sciences*, **53**, 188-201.
- Wang,A., Zhao,C., Men,H., He,A., Chang,C., Wang,X., Li,R.,2015 .Development of high Bs Fe-based amorphous alloys with wide ribbon formation needed amorphous-forming ability. *Journal of Alloys and Compounds*, **630**, 209-213.
- Zhang,j ., Li,X., 2006.Oil cooling for disk-type transformer windings-part 1: theory and model development. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21(3)**, 1318–1325.
- Zhang ,p., Li,l., 2020 .Vibration and noise characteristics of high-frequency amorphous transformer under sinusoidal and non-sinusoidal voltage excitation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* , 123,1-9.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055401 (1097-1107)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055401 (1097-1107)

DOI: 10.35414/akufemubid.946876

Araştırma Makalesi / Research Article

## Sulak Alanların Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Değerlendirilerek Entegre Veritabanı Modeli Tasarımı

Mustafa YAMAN<sup>1</sup>, Zehra YİĞİT AVDAN<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Harita Dairesi Başkanlığı, Kontrol Mühendisi, Ankara.<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir.

e-posta: myaman@tkgm.gov.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7989-8949>

Sorumlu yazar e-posta: ziyigit@eskisehir.edu.tr

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7445-3393>

Geliş Tarihi: 02.06.2021

Kabul Tarihi: 04.10.2021

### Öz

Su, evrende yaşam kaynaklarının başında gelmektedir. Suyun her formu, içerisinde yaşama dair bildiğimiz veya bilmediğimiz birçok zenginlik barındırmaktadır. Son yıllarda ve geleceğe dair öngörülerde su kaynaklarına dair bilim insanları ve konu ile çalışan başlıca kurumlarımız olumsuz senaryolar üretmekte ve bu senaryolarla gelecek nesillerimizin karşı karşıya kalma ihtimalleri ise gün geçtikçe artmaktadır. Bu noktadan bakıldığında su kaynaklarının gelecek nesillere miras bırakılması yaşam döngüsünün devamı açısından son derece önemlidir. Su kaynaklarının korunması için ulusal ve uluslararası düzeyde pek çok kongre yapılmakta, rapor ve çalışma sunulmaktadır. Su Çerçeve Direktifi (SÇD), Avrupa ve Avrupa Birliği'ne üye ülkelerin sürdürülebilir su kullanımı ve yönetiminin sağlanması için oldukça önemlidir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknikleri su kaynaklarının izlenmesi, yönetilmesi ve korunması için eylem ve analiz imkânları sunmaktadır. Günümüzde ekosistem devamlılığı için oldukça önemli bir su kaynağı olan sulak alanların korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması büyük bir önem kazanmıştır. Bu kapsamda sulak alanların korunması ve yönetimi için CBS tekniklerinin ve sulak alanlara ait verilerin entegrasyonu ile veritabanlarının oluşturulması gündeme gelmektedir. Bu çalışmada Türkiye'nin göller bölgesi olarak adlandırılan Burdur havzası, SÇD gözetilerek tasarlanmış dinamik bir entegre veritabanı ile izlenmiş, sınıflandırılmış ve kayıt altına alınmıştır. Bu entegre veritabanının kullanılması ve daha da geliştirilmesi ile karar vericilerin, politikaçıların ve araştırmacıların sulak alanlar hakkında geleceğe dair bilgi edinmesi ve politika oluşturulmasına katkı sağlanması düşünülmektedir.

### Anahtar kelimeler

Sulak alanlar;  
Su yönetimi;  
Coğrafi Bilgi Sistemleri;  
Veritabanı tasarımı;  
Burdur Havzası

## Integrated Database Model Design by Evaluation of Wetlands Within the Scope of Water Framework Directive

### Abstract

Water is one of the life-giving in the universe. Each form of water contains much affluence that we know or do not know about life in it. In recent years and in predictions about the future, scientists on water resources and our institutions working on this issue are creating negative scenarios, and the verisimilitude that our future generations will face these scenarios is increasing every day. From this point of view, the inheritance of water resources to future generations is highly important for the continuation of the life cycle. Many congresses are held at the national and international levels for the protection of water resources, reports and studies are presented. The Water Framework Directive (WFD) is crucial for ensuring sustainable water use and management in Europe and the member states of the European Union. The Geographic Information Systems (GIS) techniques provide action and analysis opportunities for monitoring, administrate, and protecting water resources. Ensuring the protection and sustainability of wetlands, which are a crucial source of water for ecosystem continuousness today, has gained enormous significance. In this context, GIS techniques for the protection and management of wetlands and the creation of databases with the integration of wetlands data are on the agenda. region of Turkey, was monitored, classified, and recorded with a dynamic integrated database designed with WFD considered. Through the use and further development of this integrated database, decision-makers, politicians, and researchers will be able to inform about the future status of wetlands and contribute to policy-making.

### Keywords

Wetlands;  
Water Management;  
Geographical  
Information Systems;  
Database Design;  
Burdur Watershed

## 1. Giriş

Hayatımızı devam ettirdiğimiz Dünyamızın % 71'i su, % 29'u karalarla kaplıdır. Birleşmiş Milletler Çevre Programı Erken Uyarı ve Değerlendirme Birimi verilerine göre yaşamın temelini oluşturan su kaynaklarının % 97'si tuzlu su, % 3'ü tatlı suların oluşturmaktadır. İnsan, hayvan ve bitkilerin kullanımı için önemli olan tatlı su kütlelerinin % 69'u buzullarda, % 30,7'si yeraltı sularında, % 0,3'ü de nehirler ve göllerde bulunmaktadır (World Water Assessment Programme, 2009). Yaşamsal faaliyetler için önemli olan % 3'lük tatlı su kütlelerinin bir parçası olan sulak alanlar birçok fiziksel, kimyasal ve biyolojik sürecin meydana geldiği yeryüzündeki biyolojik olarak en üretken olan sistemlerden birisidir. Dünyadaki mevcut sulak alanların % 2'si göl, %15'i taşkın yatakları, %26'sı bataklık düzlükleri ve %50'si bataklıktan meydana gelmektedir (Can ve Taş 2012, Groombridge and Jenkins 1998). Yeryüzünde biyolojik olarak en üretken olan sulak alanlar küresel biyojeokimyasal döngülerin devamlılığı için oldukça önemlidir (Reddy and DeLaune 2008, Yiğit 2015). Yeryüzünde su kaynaklarını zorlayacak düzeyde kaynaklara olan talebin giderek artması, bu kaynakların giderek azalmasına neden olmaktadır. Bu durum suyun yönetimini zorunlu hale getirmiştir. Bu kapsamda geçmişten günümüze kadar ülkeler kendi bakış açıları doğrultusunda su politikaları üretmişler ve bu politikaları uygulamaya çalışmışlardır (Bakanlığı, 2014). Su kaynaklarının korunması için yapılan ulusal ve uluslararası rapor, kongre ve çalışmalar sonucunda su yönetiminin küresel bir sorun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle Dünya'daki mevcut su kaynaklarının "bütünleşik su kaynakları yönetimi" ilkeleri doğrultusunda yönetimi için Avrupa Birliği tarafından 23 Ekim 2000 tarihinde 2000/60/EC sayılı Su Çerçeve Direktifi (SÇD) kabul edilmiş ve 22 Aralık 2000 tarihinde yayınlanmıştır (Çiçek *et al.* 2008, Coşkunışık 2016, Onur 2008). Bu Direktif, su tüketimi, su kaynaklarının kütleli ve kalite olarak korunmasını ve kontrol edilmesini bütüncül olarak değerlendiren ve maliyetin karşılanması ilkesini benimseyen bir su politikasıdır (Akkaya *et al.* 2006, Bulut ve Birben 2019, Dalkılıç ve Harmancıoğlu 2008). Bu nedenle SÇD'nin temel amaçlarından olan

"iyi su durumuna" ulaşmak için su kütlelerinin doğru belirlenmesi ve yönetilmesi büyük önem arz etmektedir (Gökdereli 2015, Uyanık ve Ayşe 2019). Teknolojik gelişmeler ile birlikte su kaynaklarının izlenmesi ve yönetimi için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) teknikleri sıkça kullanılmaktadır (Çakaroz *et al.* 2020, Çelik *et al.* 2013, Ekercin ve Örmeci 2011, Kaplan *et al.* 2016, Karabulut 2015, Sabuncu 2020). Günümüzde su kaynaklarının yönetimi için CBS ve veritabanları teknolojileri birleştirilerek kullanılabilir. Veritabanı teknolojisi ile uzamsal olmayan verilerin işlenmesi sağlanırken, CBS teknolojisi ile mekânsal veriler işlenebilir, analiz edilebilir ve verilerin temsili için görselleştirme teknikleri kullanılabilir (Powar *et al.* 2018). Su kaynaklarının SÇD kapsamında yönetilebilmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için CBS teknolojisi ile pek çok verinin entegre olduğu veritabanlarının oluşturulması oldukça önemlidir. Entegre veritabanlarının oluşturulması, su kaynaklarının değerlendirilmesi, kontrol edilmesi ve yönetimine yardımcı olmanın yanında gelecekle ilgili öngörülerin sağlanması ve politikaların oluşturulması için de oldukça önemlidir. Sulak alanların yönetiminin sağlanması amacıyla veritabanı oluşturulmasına dair sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Laura ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada mevcut drenaj sistemlerinin kapasitesini değerlendirmek amacı ile ArcGIS platformunun bir uzantısı olan Watershed Analyst yazılımı kullanılarak Charlotte bölgesinde 475 dönümlük bir havzaya ait veritabanı geliştirmişlerdir. Bu çalışmanın yanında ülkemizde 2015 yılında yapılan bir tez çalışmasında Trabzon'un Yomra Özdil havzasının yönetimin sağlanması amacıyla bir veritabanı geliştirilmiştir (Makul, 2015). Ayrıca Tian ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada ArcGIS uygulaması ile Qingyi nehir havzasına ait pek çok heterojen veri kullanılarak entegre bir veritabanı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen veritabanıyla veri kaynaklarının kullanım verimliliğinin artması sonucunda coğrafi bilgi ve öznitelik bilgi entegrasyonu ile yönetimsel dezavantajlarını azaltmışlardır. Ayrıca Soranno ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada ABD'deki göllerin ekolojik süreçleri ve su kalitesindeki değişiklikleri incelemek amacı ile jeo-uzamsal ve



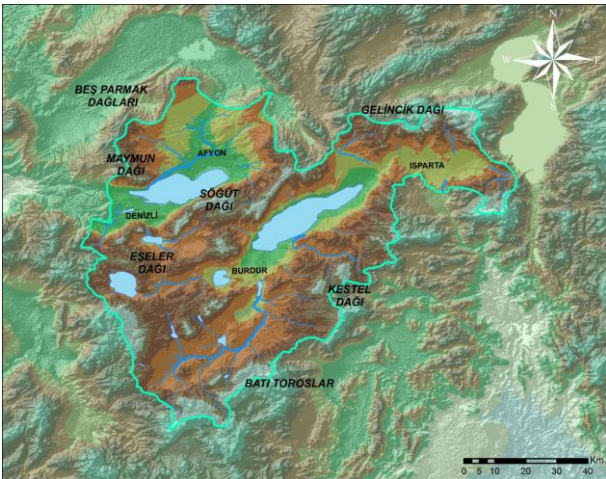
zamansal bir veritabanı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile havzalardaki alansal ve iklimsel değişimlerin yanında küresel değişikliklerin havzalar üzerinde ekolojik değişikliklerinin de incelenmesinin önü açılmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak su alanlarının fiziksel ve ekolojik değişikliklerinin incelenmesi ve karar verici/yöneticilerin bu konu hakkında daha kolay ve hızlı bilgi edinmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, Burdur Havzasının SÇD ve INSPIRE standartları gözetilerek tasarlanan dinamik bir veritabanı ile izlenmesi, sınıflandırılması ve kayıt altına alınması amaçlanmıştır. Oluşturulan veritabanı diğer çalışmalardan farklı olarak ülkemiz gereksinimleri göz önüne alınarak sadece Burdur Havzasında değil birçok sulak alanın takibi açısından da kullanılabilir bir yapı sunmaktadır.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 Çalışma Alanı**

Burdur Havzası, doğal yapısı sularla dolu olan çanaklar, çeşitli mağara ve benzeri coğrafik yapılaşmalardan meydana gelmektedir. Türkiye'nin Güneybatısında yer alan Burdur Havzası, Burdur Gölü olmak üzere birçok sulak alan barındırmaktadır. Havza kapsamında birçok irili ufaklı göller bulunmakla birlikte bu göllerden alansal olarak en büyüğü Burdur Gölü'dür. Diğer göller sırasıyla Acı Göl, Salda Gölü, Akgöl, Yarıslı Gölü ve Karataş Gölleridir. Burdur havzası dağlarla çevrilmiş ve sınırları oluşturulmuş bir havza olup konumu itibarı ile bu dağlar doğuda Kestel, Çatak Dağları, batıda Eşeler ve Maymun Dağlarıdır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Burdur Havzası Fiziki Haritası

### **2.2 Veri Modeli ve Veritabanı Tasarımı**

Günümüz teknolojik gelişmeleri göz önünde bulundurulduğunda büyük veri yönetimi için geliştirilen yöntem ve araçlar, veriyi yönetmek ve ulaşımda büyük imkânlar sunmaktadır. Veritabanı tasarlanırken, kullanıcı gereksinimleri ile hizmet edeceği alana dair gereksinimlerin belirlenmesi önemlidir. Veritabanında olması gereken veri gruplarını, verileri niteleyen bilgileri, veri tiplerini ve verinin depolanması aşamasında kullanılacak olan veri yapıları belirlenmelidir.

Veritabanının tasarımında modellenmesi istenen varlıkların eksiksiz ve tam olarak ifade edilebilmesi için; tasarımcının analizi çok iyi yapması, projeyi çok iyi anlaması varsa benzer sistemler üzerinde çalışılması ve mevcut sistemleri incelemesi gerekmektedir. Öncesinde çalışılmış projelerin incelenmesi ve analizi, tasarım aşamasında ve uygulamada karşılaşılabilecek sorunların birçoğunun önüne geçilmesi ve çözüme en yakın tasarımın ve modelin oluşmasını sağlamaktadır.

CBS tabanlı yazılımlar, birçok veri tipini, konumsal nesnelere, konumsal nesnelere topolojik ilişkilerini, konumsal nesnelere açıklayan öznelik bilgilerini birbirleriyle ilişkili olarak depolayabilen ve veriye erişilmesini, sunulmasını ve farklı kurumlar ile paylaşılmasını sağlamaktadır.

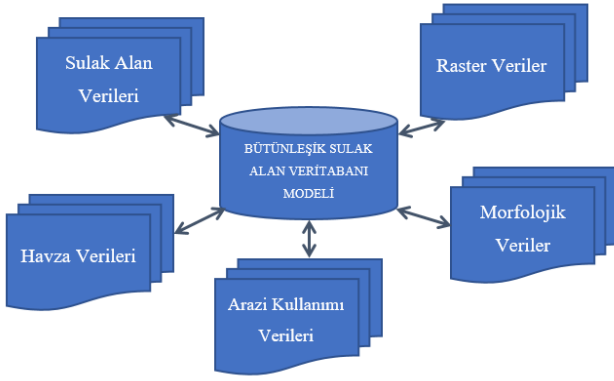
## **3. Bütünleşik Sulak Alan Veritabanı Modeli Tasarımı**

Suya dair bilgiler, her zaman ihtiyaç duyulan bilgiler olmuştur. Suyun doğmuş olduğu kaynaklar göz önünde bulundurulduğunda, kaynakları her ne kadar farklı olsa da belirgin olan ortak bilgileri taşımaktadır. Bu bilgiler bulunduğu coğrafya ve konumu ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple suyla ilişkili olan veritabanı tasarımı yapılırken dinamik bilgilerin iyi bir şekilde belirlenmesi ve oluşturulacak bilgi sistemlerinde eksiksiz ve geliştirilmeye açık olarak ifade edilebilmesi gerekmektedir. Şekil 2'de bu sürekliliği sağlayan ve yüzeysel sular ile ilgili olarak takip edilmesi gereken parametreler gösterilmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesinde Su Çerçeve Direktifi (Water

Framework Directive (2000/60/EC)) ve EU INSPIRE Direktifi baz alınmıştır. Bu verilerin doğru ve eksiksiz bir şekilde elde edilmesi, suyun gözlemsel olarak takibinin yapılabilmesi için önemlidir.

Bu çalışma kapsamında düzenlenen havza yönetimine ilişkin sulak alanların takibinin sağlanması için gerekli olan bütünleşik sulak alan veritabanı modeli aşağıdaki veri kümelerinden oluşmaktadır.

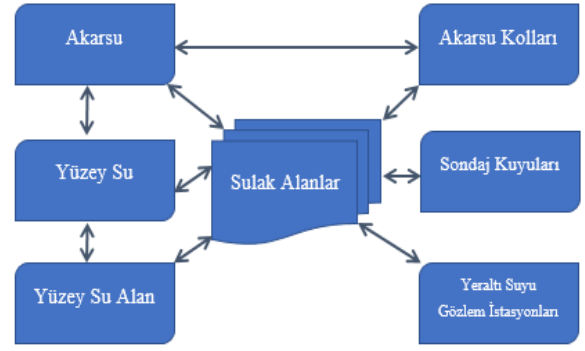
- Sulak Alanlar Veri Kümesi
- Havza Veri Kümesi
- Raster Veri Kümesi
- Arazi Örtüsü Veri Kümesi
- Morfoloji Veri Kümesi



Şekil 2. Bütünleşik Sulak Alan Veritabanı Modelini oluşturan parametreler

### 3.1 Sulak Alanlar Veri Kümesi

Sulak alanlar, su kaynaklarından en önemlileri arasında yer almakta olup, ekosistemlerin sürekliliği adına tüm canlılar için büyük bir önem arz etmektedir. Şekil 3'te sulak alanların parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan bilgiler gösterilmektedir.



Şekil 3. Sulak alan bilgilerini oluşturan parametreler

Sulak alanları gözlemsel olarak izlemesini sağlayacak parametrelere ilişkin veriler, çok bantlı uydu görüntüleri ya da hava fotoğrafları üzerinde yapılan çeşitli analizler (MNDWI, NDWI, NDVI) sonucunda elde edilebilmektedir. Bu analizler sonucunda ayrıştırılmak istenen sulak alanlara ilişkin veriler, raster veri formatında üretilebilmektedir. Üretilen raster veriler kullanarak sadece sulak alan bilgilerini içeren piksellere ilişkin veri aralığı dikkate alınarak yeniden sınıflandırma ile sulak alanlara ilişkin veriler diğer tüm verilerden ayrılabilir. Bu son veriler kullanarak raster veriden vektör veriler elde edilerek söz konusu sulak alanlara ilişkin ölçülebilir veriler elde edilebilmektedir. Kullanılan görüntülerin elde edildiği tarih, bu verilerin zamansal olarak takibini yapmak için önemli bir unsurdur. Ayrıca yüzeysel sulara ilişkin toplanacak bilgiler ile yeraltı su kaynakları ile ilgili toplanacak bilgilerin birlikte kullanılması, ilgili havzada yönetilmek istenen su kaynaklarına ilişkin geniş bir bilgi yelpazesi sunacaktır. Bu açıdan yeraltı su kaynaklarının açılmış sondaj kuyularının takibi ile yeraltı su kaynaklarına gözlemsel (kimyasal) izleme yapabilecek istasyonlardan alınan bilgiler, birbiriyle bağlantılı doğrusal bir ilişki içerisindedirler. Şekil 4'te bu bilgilerin ilişkisel olarak saklanabileceği veri kümesinin tasarımı gösterilmektedir.

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Çizgi		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
AkarsuID	Double	Yes			10	0			
AkarsuKollarID	Double	Yes			10	0			
AkarsuTip	String	Yes					30		
AkarsuBaslangic	WKT	Yes							
AkarsuBitis	WKT	Yes							
AkarsuAd	String	Yes					30		
HavzaID	Double	Yes			10	0			

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Alan		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
AlanID	Double	Yes			10	0			
Tarih	Date	Yes							
YuzeySulID	Double	Yes							
Alan	Double	Yes			10	0			

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Alan		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
YuzeySulID	Double	Yes			10	0			
YuzeySuTip	String	Yes					20		
YuzeySuAdi	String	Yes					20		
AkarsuID	Double	Yes			10	0			
HavzaID	Double	Yes			10	0			

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Çizgi		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
AkarsuKollarID	Double	Yes			10	0			
AkarsuID	Double	Yes			10	0			
AkarsuKolTip	String	Yes					30		
AkarsuBaslangic	WKT	Yes							
AkarsuBitis	WKT	Yes							
AkarsuKolAd	String	Yes					30		
HavzaID	Double	Yes			10	0			

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Nokta		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
GozlemID	Double	Yes			10	0			
HavzaID	Double	Yes			10	0			
CozunmusOksijen	Double	Yes			10	0			
PH	Double	Yes			10	0			
Nitrat	Double	Yes			10	0			
Amonyum	Double	Yes			10	0			
Sicaklik	Double	Yes			10	0			
Elektrikiletkenligi	Double	Yes			10	0			
Tarih	Date	Yes							

Konumsal Nesne Sınıfları (Simple feature class)							Geometri Nokta		
Field name	Data type	Allow nulls	Default value	Domain	Precision	Scale	Length		
OBJECTID	OID								
Shape	Geometry	Yes							
SondajKuyuiD	Double	Yes			10	0			
HavzaID	Double	Yes			10	0			
YeraltıSuyuSeviye(m)	String	Yes					30		
KuyuRakım	Double	Yes			10	0			
KuyuAcilmaTarih	Date	Yes							
Tarih	Date	Yes							
SuKullanımMiktari	Double	Yes			10	0			

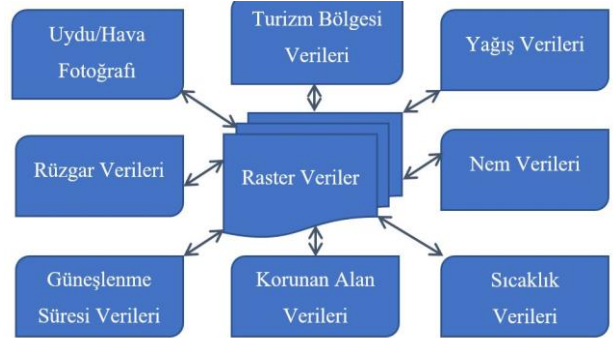
Şekil 4. Sulak alanlar için tasarlanan veri kümesi

### 3.2 Raster Veri Kümesi

Uydu fotoğrafları, hava fotoğrafları, taranmış fotoğraflar ve planlar, ortofotolar ve her türlü görüntü raster formatında çalışır. Rasterda bulunan hücrelerin boyutu, veri setinin çözünürlüğünü ve belirtilen alanın detayını ifade etmektedir.

Bu kapsamda sulak alanlara ilişkin elde edilebilecek veriler doğrudan üretilmiş raster verilerden (Uydu görüntüleri, hava fotoğrafları, ortofotolar) ve vektör ve tablosal verilerden üretilmiş raster verilerden (İstasyon bazlı meteorolojik veriler, Özel kullanıma yönelik oluşturulmuş (turizm alanları, korunan alanlar, sanayi bölgeleri, vb.)) elde edilebilir. Bu veriler;

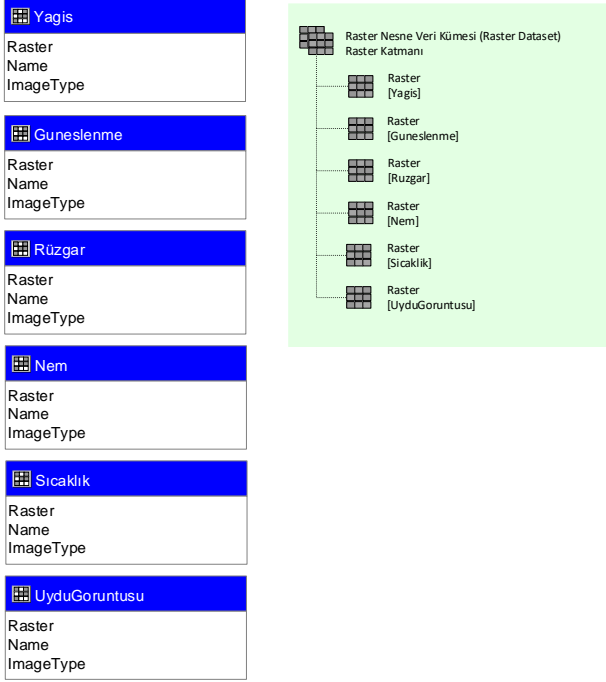
- Uydu Görüntüsü,
- Yağış Verileri,
- Sıcaklık Verileri,
- Nem Verileri,
- Güneşlenme Süresi Verileri,
- Rüzgar Verileri,
- Turizm Bölgesi Verileri,
- Korunan (Sit) Alan vb. verilerdir (Şekil 5).



Şekil 5. Raster veriler için oluşturulan parametreler



Raster veri kümesi tasarlanan veritabanının en dinamik alanını oluşturmaktadır. Burada sulak alanların kullanımına doğrudan veya dolaylı etki edebilecek tüm konumsal nesnelerin irdelenebileceği raster veriler oluşturularak bu alanda değerlendirmek mümkündür (Şekil 6).



Şekil 6. Raster veriler için tasarlanan veri kümesi

### 3.3 Havza Veri Kümesi

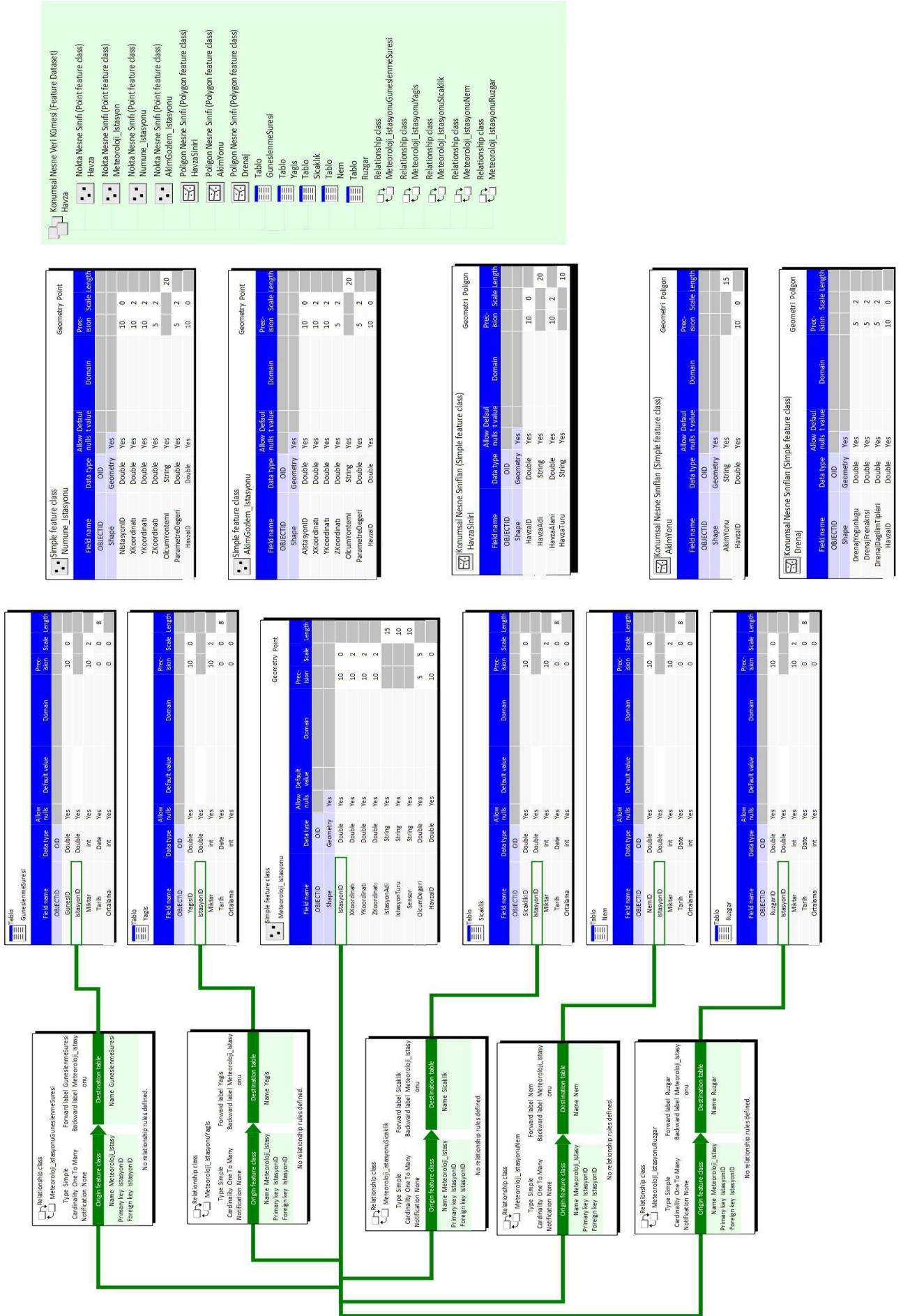
Havzaların korunmaları ve bunun sürekliliğinin sağlanması, havza yönetiminin en temel

amaçlarındandır. Havzalar toprak yapısı, topoğrafya, bitki yoğunluğu, arazi kullanımı, iklim ve buna benzer parametrelerin arasındaki ilişkilere göre değişen birçok değişkenleri bünyesinde barındırmaktadır. Bu değişkenlerin ilişkisel anlamda takibi ve analizlerinin yapılabilmesini mümkün kılmak adına entegre havza yönetimine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 7'da tüm bu değişkenlerin havza ile ilişkilendirilmesinden önce havzanın kendi içerisinde sahip olması gereken parametreler gösterilmektedir.



Şekil 7. Havza bilgilerini oluşturan parametreler

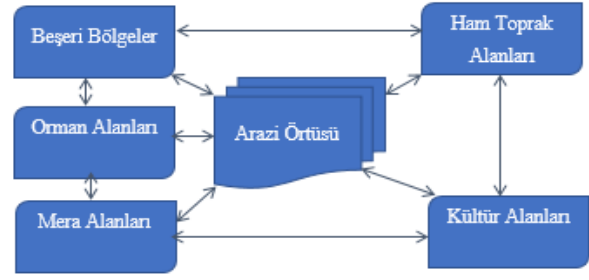
Havzayı oluşturan detayların tümüyle tek bir yapının içerisinde yönetmenin bir karmaşaya sebep olabileceğinden havza için en önemli olan su verilerine ilişkin bilgiler sulak alanlar veri kümesi içerisinde değerlendirilmiş ve en başta tek bir veri kümesi olarak tasarlanmıştır. Havza için tasarlanmış olan veri kümesi Şekil 8'de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 8. Havza için tasarlanan veri kümesi

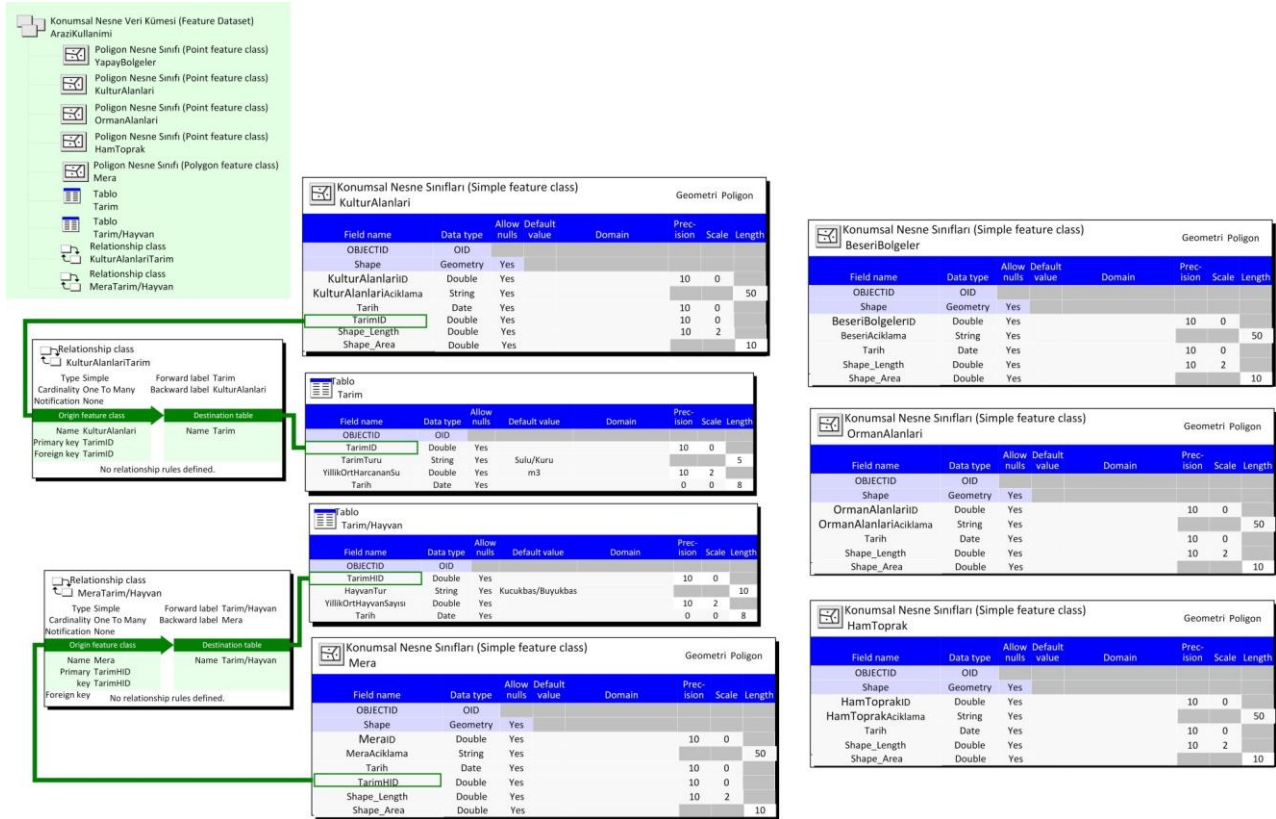
### 3.4 Arazi Kullanımı Veri Kümesi

Arazi kullanımı, zamansal olarak değişim gösteren döngüsel bir yapıya sahiptir. Arazi kullanımı yapıları, ormanlar, kültür (tarımsal) alanları, kullanılmayan alanlar, hayvancılık için kullanılan meralar ve bu doğal yapıların yanında yapay olarak tesis edilmiş ve arazi örtüsü ihtiva eden beşerî alanlardır. Bu yapıların kendi içinde ve zamansal olarak değişimlerinin gözlenmesi ve entegre havza yönetimi içerisinde gözlemlenmesi önemli bir unsurdur. Havza yönetiminin en önemli hususlarından biri de toprak yönetiminin doğru bir şekilde yapılabilmesine dayanmaktadır. Şekil 9'da arazi örtüsüne ilişkin parametreler gösterilmektedir.



Şekil 9. Arazi kullanımı bilgilerini oluşturan parametreler

Arazi kullanımına ilişkin veriler, genellikle alansal verilerdir. Bu veriler birçok farklı kurum tarafından üretilmekte ve kayıtları tutulmaktadır. Son zamanlarda INSPIRE direktifleri doğrultusunda Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) kapsamında konumsal verilere getirilen standartlar çerçevesinde üretilen ve üretilecek veriler ile bu verilerin saklanması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Arazi örtüsüne ait bilgilerin ilişkili olarak saklanabileceği veri kümesinin tasarımı Şekil 10'da gösterilmektedir.

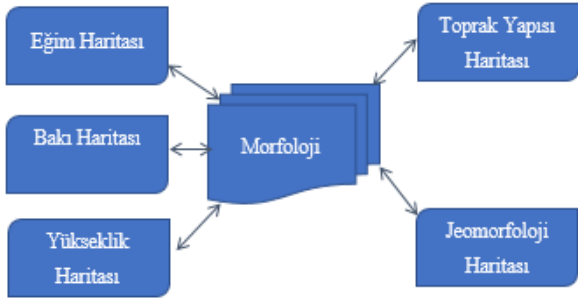


Şekil 10. Arazi kullanım verileri için tasarlanan veri kümesi

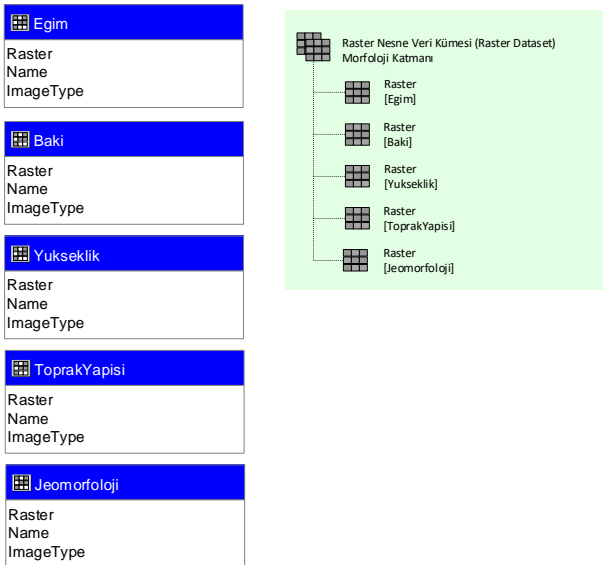
### 3.5 Morfoloji kullanımı veri kümesi

Morfoloji birçok disiplinde ifade edilmekle birlikte genel bir tanımlama yapılacak olursa, ilgili disiplinin çalışma konusunu teşkil eden objeye, canlıya, oluşuma özgü şeklin yapısını inceleyen bilim olarak özetlenebilmektedir. Havzayı oluşturan etmenler, morfolojik olarak önem taşımaktadır. Ayrıca havzanın geleceği açısından morfolojik veriler, entegre havza yönetiminde etkin rol oynamaktadır.

Havzaların sınırları gibi havzayı niteleyen birçok parametre, morfolojik olarak yapılan gözlemler ve ölçümler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Şekil 11'de morfolojik olarak havzayı nitelendiren veriler gösterilmektedir. Bu morfolojik bilgilerin saklanması için tasarlanmış olan veri kümesi Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Morfolojik bilgileri oluşturan parametreler



Şekil 12. Morfolojik veriler için tasarlanan veri kümesi

### 4. Tartışma ve Sonuç

Birçok sektörde getirilmeye çalışılan standartlaşma çalışmaları, farklı alanların ortak paydalarda buluşturularak dağıntık olan yapıları bir arada toplama çalışmaları, veriye ulaşmanın standartlar dâhilinde oldukça kolay olduğu günümüzde öncelikli bir konu olarak görülmektedir. Kurum ve kuruluşların dağıntık yapıları ve geçmişlerinden gelen kültürel yaklaşımları ile eskide kalan alışkanlıklarla birlikte yönetim biçimleri, çok başlılığa, mükerrer işlere, zaman kaybına ve emek israfına sebep olmaktadır. Bu ve buna benzer durumlar dünyanın her yerinde tüm bu sayılan kayıpların dışında özellikle doğal kaynakların da israf edilmesine ve yönetilememesine sebep olmaktadır.

Avrupa Birliği üyesi olan ülkeler, niteliği gereği mevzuatında gelişmiş ülke olarak kabul görmekte olup doğal kaynaklarının (su ve toprak) tamamına yakını geliştirmiş ve yönetebilir durumdadırlar. Su kaynaklarının yönetilmesi noktasında ciddi planlamalar yapmış, gerekli sistemleri oluşturmuş ve halkın hizmetine sunarak ülkenin kalkınmasında da önemli roller üstlenmişlerdir. Bu sistemler ile su kaynaklarına dair yönetim yaklaşımlarını belirlemiş ve uygulamaya geçerek öncelikleri olan kaynakların korunması konusuna odaklanmışlardır.

Bu kapsamda düşünüldüğünde SÇD'nin en temel unsurunu oluşturan entegre havza yönetiminin geliştirilmesi, su kaynaklarımızda koruma ve kullanma yöntemlerinin hızlı bir şekilde uygulamaya konulması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması son derece önemlidir. Bu çalışmada sulak alanların SÇD kapsamında takibinin yapılması için veritabanı tasarımı yapılmıştır. Bu çalışma, kısıtlı veriler ile dahi tasarlanan veritabanı sayesinde sulak alanların envanterinin çıkarılmasını ve takibinin yapılmasını mümkün kılmakta, ilgili kurum ve kuruluşlar tarafından oluşturulan ve yönetilen Havza Bilgi Sistemi, Tapu ve Kadastro Bilgi Sistemi, Merkezi Nüfus İdaresi Sistemi gibi konumsal ve niteliksel sistemler ile entegre olarak ileriye dönük yapılacak tahminlerde ve alınacak önlemlerde etkin rol alacaktır.

Tasarımı yapılan veritabanının dinamik yapısı, entegre olan sistemlerin çeşitliliği ile zenginleşerek kurum ve kuruluşların dışında açılan servisler

sayesinde akademik çalışmalara altlık olabilecek ve yeni nesil bakış açılarıyla olgunlaşmış uygulanabilirliği olan eylemlerin temelini oluşturacaktır.

## 5. Kaynaklar

- Akkaya, C., Efeoğlu, A., ve Yeşil, N., 2006. Avrupa Birliği su çerçeve direktifi ve Türkiye’de uygulanabilirliği. *TMMOB Su Politikaları Kongresi*, **1**, 195–204.
- Bakanlığı, K., 2014. *Eğitim Sisteminin Kalitesinin Artırılması Özel İhtisas Komisyonu Raporu*.
- Bulut, M., ve Birben, Ü., 2019. AB Su Çerçeve Direktifinin Türkiye’de su kaynakları yönetimine etkisi. *Türkiye Ormanlık Dergisi*, **20**(3), 221–233.
- Can, Ö., ve Taş, B., 2012. Ramsar Alanı İçinde Yer Alan Cernek Gölü Ve Sulak Alanının (Kızılırmak Deltası, Samsun) Ekolojik Ve Sosyo-Ekonomik Önemi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, **5**(2), 1–11.
- Coşkunışık, G., 2016. Madra Çayı (Balıkesir)’ında su çerçeve direktifi Yöntemleri kullanılarak epilitik diyatome kompozisyonunun araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 159.
- Çakaroz, D., Özelkan, E., and Karaman, M., 2020. Sulak Alanlarda Uzaktan Algılama ile Belirlenen Zamansal Değişime Kuraklığın Etkisinin İncelenmesi: Umurbey Deltası (Çanakkale) Örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **20**, 898–916.
- Çelik, M. A., Kızılelma, Y., Gülersoy, A. E., ve Denizdurduran, M., 2013. Farklı Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Aşağı Seyhan Ovası Güneyindeki Sulak Alanlarda Meydana Gelen Değişimin İncelenmesi (1990-2010). *Electronic Turkish Studies*, **8**(12), 263-284.
- Çiçek, N., Kararaslan, Y., Aslan, V., Yaman, C., ve Akça, L., 2008. Türkiye’de AB’ye Uyumlu Su Havzası Yönetim Stratejisi ve Su Çerçeve Direktifi, Fatih Üniversitesi, III. *Çevre Sorunları Kongresi*, 170–178.
- Dalkılıç, Y., ve Harmancıoğlu, N., 2008. *Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifinin Türkiye’de Uygulama Olanakları*, *TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi*, 415-423.
- Ekerin, S., ve Örmeci, C., 2011. Tuz Gölü’ndeki su rezervi değişiminin çok zamanlı LANDSAT uydu görüntüleri ve eş-zamanlı yersel ölçmeler ile analizi, *İTÜDERGİSİ/D*, **7**(1), 29-40.
- Gökdereli, G., 2015. *Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Yeraltısuyu Kütlelerinin Belirlenmesinde Tanımlanan Metodoloji Ve Türkiye İçin Öneriler*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Uzmanlık Tezi, 121, Ankara.
- Groombridge, B., ve Jenkins, M. 1998. *Freshwater biodiversity: a preliminary global assessment*. World Conservation Monitoring Centre, Teknik Rapor, 132.
- Kaplan, G., Avdan, U., Avdan, Z. Y., ve Yıldız, D. N., 2016. *Landsat Uydu Görüntüleri Kullanılarak Kuraklık İzlenmesi (Akşehir Gölü Örneği)*, *UZAL CBS Sempozyumu*, 535-540.
- Karabulut, M., 2015. Farklı Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Göksu Deltası Göllerinde Zamansal Değişimlerin İncelenmesi, *Journal of International Social Research*, **8**(37), 347-363.
- Laura, R. A., Mesimer, C., Brink, T. 2005. GIS-Based Watershed Modeling, *In Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges*, Watershed Management Conference, 1-12.
- Makul, O. (2015). Havza Yönetimine Yönelik Coğrafi Veritabanı Tasarımı: Trabzon Yomra Özdiil Havzası Örneği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Entitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 106.
- Onur, A., 2008. Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi’nde Nehir Havza Yönetiminin Önemi. *Havza Kirliliği Konferansı*, 1.
- Powar, A., Kamath, A., Gaikwad, K., ve Dhruv, A., 2018. Survey on Water Resources Information Systems, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, **9**(1), 624-626.
- Reddy, K.R., ve DeLaune, R.D., 2008. *Biogeochemistry of wetlands: science and applications*, CRC press, 10-20.
- Sabuncu, A., 2020. Burdur Gölü Kıyı Şeridindeki Değişiminin Uzaktan Algılama ile Haritalanması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20**(4), 623–633.
- Soranno, P. A., Bacon, L. C., Beauchene, M., Bednar, K. E., Bissell, E. G., Boudreau, C. K., Yuan, S. 2017, LAGOS-NE: a multi-scaled geospatial and temporal database of lake ecological context and water quality for thousands of US lakes, *GigaScience*, **6**(12), 1-22.
- Tian, Z., Peng, J., & Wang, X. (2017, January). Database design of the Qingyi River basin for multi-objective and multi-department integrated management. In *Advances in Energy and Environment Research: Proceedings of the International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEEER2016)*, Guangzhou City, China, August 12-14,

2016, 135. CRC Press.

Uyanık, S., ve Ayşe, C., 2019. AB Su Çerçeve Direktifi Kapsamında Biyolojik Kalite Unsurları İle Su Kalitesinin izlenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **2**(3), 64–72.

World Water Assessment Programme., 2009, *Water in a changing world*, UN WATER, 28-34.

Yiğit, Z., 2015. Tarımsal havza sulak alanlarında karbon ve nütrient birikimi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 115.



AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055501 (1108-1124)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055501 (1108-1124)

DOI: 10.35414/akufemubid.977251

Araştırma Makalesi / Research Article

## Kartogram Haritaların Nüfus Analizinde Kullanımı

**Muhammed Hüseyin KAYA<sup>1</sup>, İbrahim YILMAZ<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.Sorumlu yazar e-posta: huseyinkaya3403@gmail.com ORCID ID: 0000-0003-3179-7094  
iyilmaz@aku.edu.tr ORCID ID: 0000-0003-0510-9446

Geliş Tarihi: 01.08.2021

Kabul Tarihi: 12.10.2021

### Öz

Bu çalışmada kartogramların nüfus analizinde ne derece etkili bir görselleştirme sağladığı incelenmiştir. Kartogramların nüfusa ait verileri görselleştirmedeki etkisinin incelenmesi için kartogramlar, performans ve doğruluk (coğrafi, istatistiksel, topolojik) ölçütlerine göre analiz edilmiştir. Performans ölçütüne göre analiz edilen kartogram türlerinin tamamında yüksek performans sağlanmıştır. Kartogramlar nüfus verileri için güçlü görselleştirme oluşturarak verileri iyi derece temsil etmişlerdir. Bu bakımdan nüfusa ilişkin verilerin analiz edilmesinde kartogramlar kullanılabilir. Nüfus verisi kullanılarak doğruluk (coğrafi, istatistiksel, topolojik) ölçütlerine göre analiz edilen kartogram türlerinden hiçbiri tüm ölçütleri tek başına sağlayamamıştır. Çalışma amacına ve kartogramdan beklenen performansa göre bu ölçütler arasında tercih yapılmalıdır. Coğrafi doğruluğun önem taşıdığı çalışmalarda bitişik olmayan kartogramlar, topolojik doğruluğun önem taşıdığı çalışmalarda bitişik kartogramlar, istatistiksel doğruluğun önem taşıdığı çalışmalarda ise dorling kartogramları kullanılabilir.

### Anahtar kelimeler

Kartografya; Harita;  
Kartogram; Analiz

## The Use Of Cartogram Maps in Population Analysis

### Abstract

In this study, it was examined what extend effective the visualization of cartograms in population analysis. In order to examine the impact of cartograms on visualizing population data, the cartograms were analyzed based on the performance and accuracy (geographical, statistical, topological) criteria. The high achievement has been obtained in all cartogram types analyzed based on the performance criteria. The cartograms are representing the data well by generating powerful visualizations for the population data. In this respect, cartograms can be applied to analyze data regarding population. None of the cartogram types examined using population data based on accuracy (geographic, topological, statistical) satisfied all criteria alone. A selection should be made between these criteria, depending on the purpose of the study and the performance expected from the cartogram. Non-contiguous cartograms in studies where geographical accuracy is important, contiguous cartograms in studies where topological accuracy is important, and dorling cartograms in studies where statistical accuracy is important can be employed.

### Keywords

Cartography; Map;  
Cartogram; Analysis

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1.Giriş

Günümüzde tematik haritalama da dahil olmak üzere tüm haritacılık hızlı bir gelişim ve değişim içerisindedir. Bilgisayar donanımı ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler, artan internet erişimi ve birçok türde harita oluşturabilen Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımının yaygınlığı, haritaların oluşturulma ve kullanılma şeklini önemli ölçüde değiştirmiştir. Günümüzde çevrimiçi harita kullanımı

oldukça yaygınlaşarak harita verilerine erişilebilirliği artırmıştır. Haritalar günümüzün vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş ve birçok alanda hayatımızı kolaylaştırmıştır (Dent vd. 2009).

Geleneksel haritalarda veriler görselleştirilirken ülke, eyalet, il, ilçe vb. birimler yüzölçümlerine göre boyutlandırılır. Kartogramlarda ise veriler harita kullanıcılarına aktarılacak istenen veri büyüklüğüne göre boyutlandırılmaktadır. Bu durum kartogramlar



ile diğer tematik haritalar arasındaki en temel farklılıktır. Tematik haritalar oluştururken, haritacı mekânsal ilişkileri bozmaktan kaçınmaya çalışır. Yüzölçümü büyüklüğünün gösterilen mekânsal verinin dağılımına bakılmaksızın alınması haritanın kullanıcıya aktarmak istediği asıl bilginin önüne geçmesine ve harita okuyucusunun görsel algısının yanlış etkilenmesine neden olacaktır. Bu anlamda yapılacak çalışma, harita kullanıcıya aktarılacak istenen asıl bilginin öne çıkarılması, harita kullanıcısının haritayı kolay, anlaşılır ve doğru bir şekilde yorumlaması açısından önemlidir. Ayrıca bu çalışmanın bir diğer önemli noktası kartogram haritaların nüfus analizinde kullanımınıdır. Çünkü oldukça dinamik bir yapıya sahip olan nüfus; siyasi, sosyal ve ekonomik durumlar üzerinde etkili olmakta ve ülke, şehir vb. birimlerin gelişimlerinde en temel unsurların başında gelmektedir.

Bir ülkenin nüfusu ve nüfus yapısı; kalkınma-kamu planlamalarının tespit edilmesi, askeri-siyasal güç başta olmak üzere pek çok noktada önemli bir yere sahiptir. Onun için nüfus miktarı, nüfus dağılımı ve nüfusun sosyoekonomik yapısının iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Kalafatçılar 2019). Bu bakımdan kartogramların nüfus analizinde ne denli önemli bir veri gösterim aracı olduğunun ortaya konulması noktasında bu çalışma önem taşımaktadır. Ayrıca kartogramları değerlendiren çalışmalar genel olarak sınırlıdır. Özellikle kartogramlarla ilgili 'Türkçe' bilimsel çalışmaların neredeyse yok denecek kadar az olması bu çalışmayı daha da önemli kılmaktadır.

Bir tematik harita çeşidi olan kartogramlar çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı kartogramların, nüfus ve nüfusa ait sosyoekonomik verilerin gösteriminde önemli bir veri gösterim aracı olduğunu ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışma, haritanın kullanım amacına göre en ideal kartogram türünün seçilmesi noktasında bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Kartogramları değerlendiren çalışmalar sınırlı olmakla birlikte bu tür çalışmalarda çoğunlukla anket uygulaması yapılarak kartogramlar değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak kartogramlar CBS araçları ile analiz edilmiştir.

## **2. Literatür Taraması**

### **2.1 Kartogram Harita**

Verilerin büyüklüğüne bağlı olarak haritanın alanını bozarak bu alanın boyutunu ilgili verinin büyüklüğüyle orantılı olacak şekilde gösteren veya mesafe ve zamanın öne çıktığı durumlarda veri değerini mesafeye göre gösteren haritalara "Kartogram Harita" denir (McHaffie vd. 2019, Indrayan ve Malhotra 2018, Sun ve Li 2010).

Haritacılar tematik harita oluştururken, mekânsal ilişkileri bozulmamasına özen gösterirler (Slocum vd. 2005). Bir kartogramın esas amacı ise bazı değişkenlere göre bölgeleri yeniden ölçeklendirerek bir haritayı bozmaktır (Heilmann vd. 2004). Bu bozulma, ilgili veri değerine göre şekillenir. İlgili birimlerin alanına bağlı olarak bozulma gerçekleşirse "alan kartogramları" adını alır. Seçilen bir nokta ile referans nokta arasındaki mesafeye göre bozulma gerçekleşirse "mesafe (çizgisel) kartogramları" adını alır (Markowska ve Korycka-Skorupa 2015).

Çoğu geleneksel harita ile kartogram arasındaki temel fark, alanların boyutunu belirleyen değişkendir. Birçok geleneksel haritada bu değişken, ilgili birimin coğrafi alanıdır oysa kartogramlarda herhangi bir değişken coğrafi referans olarak alınabilir (Henriques 2010). Örneğin bir nüfus kartogramında, her birimin boyutu orada yaşayan insan sayısı ile orantılıdır. Nüfus en sık kullanılan değişken olsa da, kartogram oluşturmak için herhangi bir sosyal, ekonomik veya coğrafi değişken kullanılabilir (Henriques 2005).

### **2.2 Kartogramın Tarihçesi**

Tobler'e göre "kartogram" terimine yapılan ilk atıf, Émile Lefebvre'un ekonomik coğrafya ders kullandığı 1870 yılına kadar uzanır. Fabrikant'a göre Alman seçim sonuçlarını göstermek için 1903 yılında kartogramlar kullanıldı (Nusrat ve Kobourov 2016). İlk kartogramlar, nüfusun coğrafi dağılımının dengesizliğini göstermede alternatif bir yol olarak oluşturuldu. İlerleyen süreçte insan coğrafyasını göstermek için kartogramlar bir temel olarak kullanılmaya başlandı (Dorling 1995).

### 2.3 Kartogram Haritaların Sınıflandırılması

Tüm kartogram yaklaşımlarının ortak hedefi kartogram çıktısının genel olarak anlaşılma ve okunabilirlik problemlerini çözmeye çalışırken aynı zamanda temelinde yer alan nicel bilginin yeterli düzeyde temsildir (Hennig 2017).

Kartogram türleri çizgisel kartogramlar ve alan kartogramları olmak üzere iki ana kartogram türü altında sınıflandırılabilir (Tang 2013, Sun ve Li 2010).

#### 2.3.1 Çizgisel (Linear) Kartogramlar

Çizgisel kartogramlar, doğrusal kartogramlar veya mesafe kartogramları olarak da bilinir (Tyner 2010). Hareketleri çizgi halinde şematize ederek konuma ve zamana dayalı soruları yanıtlamak için çizgileri zaman-mesafe gibi birimlere göre çarpıtan bir harita türüdür (Shimizu ve Inoue 2009, Kraak vd. 2014)

Çizgisel kartogramlar, haritadaki başlangıç noktası ile diğer konumlar arasındaki uzaklığı seyahat süresine göre değiştirir (Hong vd. 2017). Böylece kullanıcıya zaman, mekân, mesafe gibi unsurları ilk bakışta okuyabilme ve ön değerlendirme imkânı sağlar (Kraak vd. 2014).

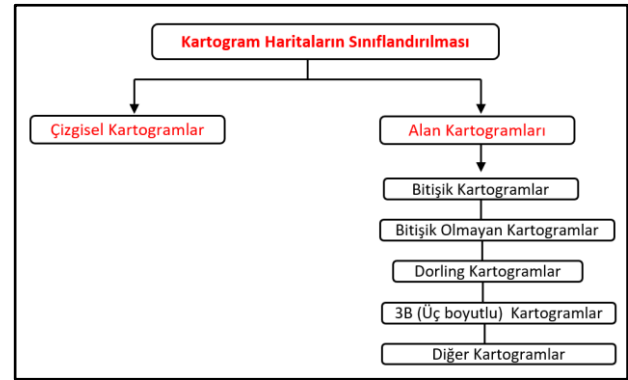
#### 2.3.2 Alan (Area) Kartogramları

İlgili birime karşılık gelen veri değerleriyle orantılı olarak alanların bozulduğu veya yeniden boyutlandırıldığı haritalardır (Sun ve Li 2010). Bu boyutların gerçek fiziki dünya ile alakası yoktur (Henriques 2010, Ren ve Zhao 2016). Çünkü alan kartogramlarında birimlerin boyutları ilgili öznitelik değerlerini yansıtacak şekilde ölçeklendiği için birimler öznitelik değeriyle orantılıdır. Bu anlamda alan kartogramı bir değişkenin temsildir (Slocum vd. 2005, Henriques 2010).

Alan kartogramlarında harita oluşturucusu iletmek istediği mesaja bağlı olarak alanı genişletir, küçültür veya coğrafyayı çarpıtabilir. Bu boyutlandırmada mesafeler ve yönler bozulabilir, bitişiklik korunabilir veya korunmayabilir (Getis vd. 2018, Tobler 2017). Böylece alan kartogramları bölgelerin şekli deformasyonu ile temsil edilen veri dağılımlarının algılanmasına yardımcı olur. Özellikle istatistiksel

verilerin görsel temsili için sıklıkla kullanılmaktadır (Inoue 2011, Şahin ve Şahin 2019).

Alan kartogramları kendi içinde bitişik kartogramlar, bitişik olmayan kartogramlar, dorling kartogramları ve üç boyutlu (3B) kartogramlar olarak sınıflandırılabilir (Krevelde ve Speckmann 2007, Berg vd. 2006, Henriques 2005). Belirtilen kartogramlar küresel ölçekte temel alan kartogram türleri olarak tanımlayabileceğimiz kartogramlardır. Bunlar dışında da coğrafi doğruluk ve istatistiksel doğruluk gibi farklı kartogram boyutlarını optimize etmek için tasarlanmış çok çeşitli kartogram türleri bulunmaktadır. Yine bu kartogram türlerinin de kendi içinde bazı varyantları vardır (Nusrat ve Kobourov 2016, Barreto vd. 2018). Her bir kartogram harita türünün farklı özellikleri olmakla beraber kullanım amacına göre avantajları ve dezavantajları vardır (Dent vd. 2009).



Şekil 1. Kartogram haritaların sınıflandırılması

#### 2.3.2.1 Bitişik Kartogramlar

Bir öznitelik değerine göre birimler boyutlandırılırken şekillerin bitişik tutularak haritanın istenen boyutlara deforme edildiği kartogram türüdür (Sagar 2014).

#### 2.3.2.2 Bitişik Olmayan Kartogramlar

İstatistiksel veriye göre her alanın bağımsız olarak ölçeklendirildiği kartogram türüdür. Bitişik nesnelere birbirinden uzaklaşmakta veya yakınlaşmakta serbesttir (Barreto vd. 2018, Bhatt 2006, Nusrat vd. 2016).

### 2.3.2.3 Dorling Kartogramları

Coğrafi bir birimi simgelemek için dairelerin kullanıldığı ardından dairelerin nicel bir değışkene göre boyutlandırıldığı kartogram türüdür (Hennig 2013, Kirk vd. 2016).

### 2.3.2.4 Söзде Kartogramlar

Sözde kartogram yöntemi, kartogram oluşturma öncesi haritayı ön işlemden geçirmek için tasarlanmıştır (Nusrat ve Kobourov 2016).

### 2.3.2.5 Üç Boyutlu (3B) Kartogram

Temel değışken değeri nesnenin yüksekliğı ile temsil edildiğı haritalardır. Yükseklik ise ilgili birime karşılık gelen veriye göre hesaplanır (Reveiu ve Dardala 2011, Boos 2013).

## 3. Materyal ve Metot

### 3.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanı Türkiye'nin tamamı olarak seçilmiştir. Türkiye il düzeyinde oluşturulan nüfus kartogram haritaları analiz edilmiştir. Çalışma alanının 'Türkiye' seçilmesinin nedeni nüfus verilerinin ve yüzölçümünün iller arasında oldukça düzensiz dağılmasından dolayı bu parametrelerin etkisinin kartogram haritada daha net görülebilmesidir.

### 3.2 Araştırmanın Veri Kaynakları

Kartogram haritaların oluşturulmasında Türkiye'nin 2020 yılına ait nüfus verileri esas alınmıştır. TÜİK'ten Türkiye'nin 2020 yılına ait nüfus ve nüfusa ilişkin verileri 'Microsoft Excel' (.xlsx) formatında indirilmiştir. Kartogramların oluşturulacağı altlık harita (Türkiye illere ait mülki idare sınırları) ve illere ait noktasal konum verileri Harita Genel Komutanlığının resmî sitesinden 'Şekil dosyası' (.shp) formatında indirilmiştir.

### 3.3 Verilerin düzenlenmesi ve CBS ortamına Aktarılması

- Veriler iki sütun halinde iller ve bunlara karşılık gelen nüfus şeklinde oluşturulmuştur.
- Çizgi formatında indirilen Türkiye illere ait mülki

idare sınırları ArcMap ortamına aktarılarak poligon formatına çevrilmiştir.

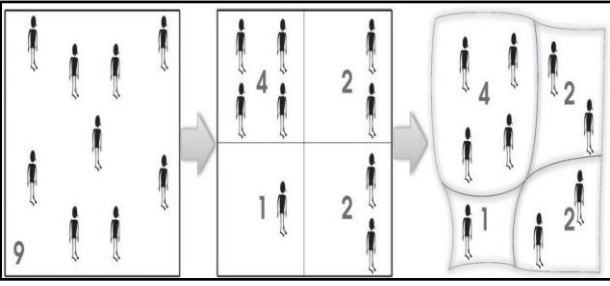
- Türkiye'nin 2020 yılına ait nüfus verileri ArcMap ortamına aktarılmıştır.
- Nüfus verileri Türkiye il sınırları haritası verisine entegre edilmiştir.
- Oluşturulan harita şekil dosyası (.shp) formatında kaydedilerek altlık harita kartogram oluşturmaya hazır hale getirilmiştir.

## 3.4 Kartogramların Oluşturulması

Bitişik kartogramların oluşturulması için ArcMap 10.5 (AKÜ CBS Laboratuvarı), Bitişik olmayan kartogramlar, dorling kartogramlar ve 3B kartogramların oluşturulması için MapViewer 8, verilerin düzenlenmesi ve matematiksel hesaplamalar için Microsoft Excel programından yararlanılmıştır.

## 3.5 Yöntem

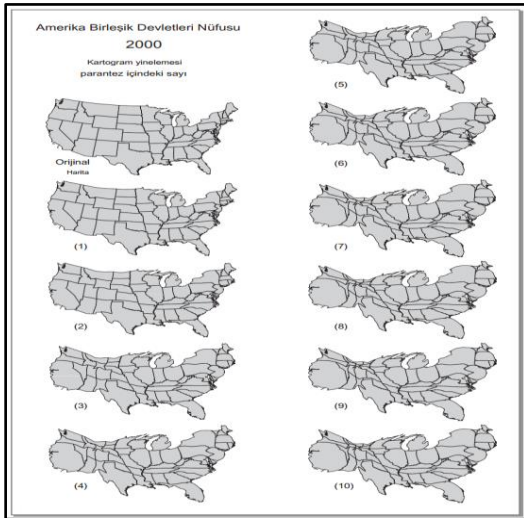
Bitişik kartogram oluşturma yönteminin birçok yöntemi olmasına karşın Gastner ve Newman difüzyon yöntemi görünüme göre son yıllarda en popüler olanı olmuştur (Nusrat ve Kobourov 2016). Dorling tarafından 'iki adam için küçük bir adım, haritalama için dev bir adım' olarak nitelendirilen Gastner ve Newman'ın yaklaşımı, fizikteki difüzyon modelleme ilkesine dayanmaktadır. Difüzyon modelleme ilkesi yoğunluğun dengelenmesini sağlamak için nesnelerin dağılımına izin verir (Hennig 2019). Bu dengelenme süreci miktarların bir ızgara hücrelerinden diğerine aktığı yinelenmeli bir difüzyon işlemiyle sağlanır (Nusrat vd. 2016). Bir bitişik kartogram haritadaki dönüşümde aynı ilkeye dayanmaktadır. Bir sınıvın yüksek yoğunluktan düşük yoğunluğa aktığında olacak değışimleri taklit eder. Örneğin bir bölgede yaşayan insan nüfusuna göre coğrafi alanların şeklini değıştirir (Şekil 2). Ortaya çıkan haritada ise ülkelerin orijinal coğrafi şekli ve yakınlığı mümkün olduğunca korunur. Bu yaklaşım tutarlı bir veri kümesi var olduğu sürece farklı coğrafi birimlerde ve ölçeklerde çalışabilir (Nusrat vd. 2016, Hennig 2019).



Şekil 2. Difüzyon modellemesine göre bitişik kartogram oluşumu (Hennig 2019).

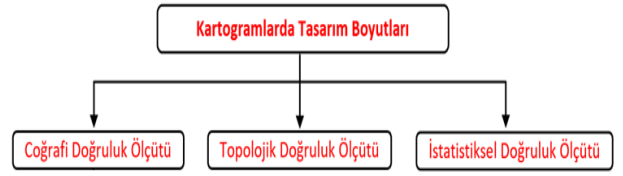
ESRI'nin ArcGIS yazılımında Gastner ve Newman algoritması bulunur. Bunun dışında bazı yazılımlarda da bu algoritma mevcuttur (Yalçın 2020).

Birçok kartogram algoritması yapısı gereği yinelemelidir. Her yinelemede alanlar öznelik değerleriyle orantılı olmaya yaklaşır. Yaklaşık sekiz ila on yinelemeden sonraki yinelemelerde şekil pek değişmez (Şekil 3) (Dent vd. 2009).



Şekil 3. Yineleme sayılarına göre bitişik kartogramlar (ABD'nin 2000 yılı nüfusunu göstermektedir.) (Dent vd. 2009).

Kartogramlar istatistiksel doğruluk, coğrafi doğruluk ve topolojik olmak üzere üç temel tasarım boyutuna göre değişiklik göstermektedir (Nusrat vd. 2016). Kartogramlarda performans analizi ise kartogramın sağladığı değişim oranı ve istenilen değişim oranıyla elde edilebilir (Alam, vd. 2015). Bu çalışmada oluşturulan nüfus kartogramları coğrafi doğruluk, topolojik doğruluk, istatistiksel doğruluk ve performans analizine göre incelenmiştir. Kartogram türleri elde edilen verilere göre karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Kartogramlarda tasarım boyutları

### 3.5.1 Coğrafi Doğruluk Ölçütü

Coğrafi doğruluk, kartogramdaki alana ait şekil ve konumların temel (asıl) haritadakiyle ne derece iyi eşleştiğini gösteren bir ölçüttür. Bu ölçüt şekil ve göreceli konum koruması eğri benzerliği ve ikili mesafeler gibi çeşitli yöntemlerle değerlendirilebilir. Coğrafi doğruluğun sağlanması, birçok kartogram oluşturma algoritmasının doğrudan veya dolaylı amaçları arasındadır (Nusrat ve Kobourov 2016).

#### 3.5.1.1 Konum Hatası

Şeklin kartogram haritadaki konumu ile temel haritadaki konumu arasındaki değişim miktarını ifade eder. Şekillerdeki değişim miktarının tespit edilebilmesi için temel ve kartogram haritadaki şekillerin ağırlık merkezi referans alınmıştır Türkiye temel haritası ile Türkiye nüfus kartogramındaki illerin ağırlık merkezine ait konumları ArcMap programında 'geometri hesapla' aracı yardımıyla belirlenmiştir. Bu veriler yardımıyla ArcMap ortamında her ilin kartogram ve temel haritadaki konumu arasındaki mesafe (konum hatası) kilometre (km) biriminde hesaplanmıştır.

#### 3.5.1.2 Göreceli Konum Hatası

Göreceli konum bir alanın diğer alanlara göre tanımlanmasını ifade eder (Int Kyn. 1). Kartogramlarda göreceli konum doğruluğu, komşu alanlar ve asıl haritadaki alanlar arasındaki yön ilişkilerinin karşılaştırılmasıyla belirlenebilir (Nusrat ve Kobourov 2016, Alam vd. 2015). Yön doğruluğunun harita üzerinde daha net görülebilmesi için 'Afyonkarahisar' ili esas alınarak komşu illerle olan yön doğruluğu incelenmiştir.

#### 3.5.1.3 Şeklin Tanınabilirliği

Kartogramlar alanı nüfusa göre boyutlandırdıkları için alanda meydana gelen bozulma harita kullanıcılarının ilgili birimi tanıyabilmelerini

zorlaştırabilmektedir. Bu bakımdan kartogramlar orijinal harita ile karşılaştırılarak alanların şekilsel olarak bozulmalarını incelenmiştir.

### 3.5.2 Topolojik Doğruluk Ölçütü

Topolojik doğruluk, komşu alanlar arasındaki bitişiklik ilişkilerinin orijinal haritaya kıyasla kartogramda ne ölçüde değiştiğini belirtir. Kartogramda komşu iller arasındaki sınır ilişkileri ve komşuluklar orijinal haritadakine ne kadar yakınsa topolojik doğruluk o derece yüksektir (Nusrat ve Kobourov 2016, Alam vd. 2015).

Topolojik doğruluk bitişiklik hatası ile ifade edilir ve kartogramın koruyamadığı bitişikliklerin oranıyla ölçülür.

Bitişiklik hatası;

$$T = 1 - \frac{|Ec \cap Em|}{|Ec \cup Em|} \quad (1)$$

Bağıntısıyla elde edilir. T: Bitişiklik hatası, Ec ve Em sırasıyla kartogramdaki ve temel haritadaki alanlar arasındaki bitişik noktalarıdır (Alam vd. 2015, Nusrat ve Kobourov 2016).

Kartogram harita ve temel Türkiye haritasına ait komşular ve sınır uzunlukları ArcMap programındaki "Alan Komşuları" aracı kullanılarak belirlenmiştir. Bu veriler yardımıyla (1) formülü kullanılarak illerin sınır komşularıyla olan bitişiklik hatası hesaplanmıştır. İllere ait bitişiklik hatasının ortalaması alınarak Türkiye geneli için bitişiklik hatası hesaplanmıştır.

### 3.5.3 İstatistiksel Doğruluk Ölçütü

İstatistiksel doğruluk, kartogramla oluşturulan alanların veriyi ne derece tutarlı temsil ettiğini ifade eder. İstatistiksel doğruluk "kartografik hata" olarak ölçülür (Nusrat vd. 2016).

Kartografik hatanın düşük olması için kartogram boyutu veri değerine yakın olmalıdır (Nickel vd. 2019).

Kartogramlar alanları ilgili veriye göre boyutlandırırken her bölge için yoğunluk (veri değerinin coğrafi alana bölünmesi) hesaplanarak en

yüksek yoğunluklu bölge dayanak noktası olarak seçilir (alanı olabildiğince korunur). Diğer bölgeler istatistiksel verilerle orantılı olarak küçülür. Eğer en yüksek yoğunluklu bölge coğrafi olarak küçükse bu durumda düşük yoğunluklu alanların boyutu çok fazla küçülerek haritada görülmesi güçleşecektir. Bitişik olmayan kartogramlarda ise bu durumla beraber haritada büyük boşluklar oluşacaktır. Bu durumda yöntem dayanak olarak makul boyutta yüksek yoğunluklu başka bir bölge arar. Böylece daha yüksek yoğunluklu küçük bölgeler küçültülmek yerine büyütülür (Nusrat vd. 2016, Olson 1976).

Oluşturulan kartogramların dayanak noktasının belirlenebilmesi için Arcmap ortamında öznelik tablosunda alan sütunu oluşturularak geometrik hesap modülünden Türkiye haritası ve Türkiye nüfus kartogram haritasına ait il alanları kilometrekare (km<sup>2</sup>) biriminde hesaplandı. Temel (asıl) haritadaki ve kartogram haritadaki il alanlarının farkı alınarak dayanak noktası (alanı en az değişen il) belirlendi. Dayanak noktası olarak seçilen ilin nüfusuna düşen kartogram alanı miktarına göre oran-orantı uygulanarak diğer iller için alanlar hesaplanmıştır. Bu alan 'istenilen alan' olarak ifade edilmiştir. (2) ve (3) bağıntıları kullanılarak her il için kartografik hata ve kartografik hata oranları hesaplanmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Türkiye geneli için kartografik hata ve kartografik hata oranı hesaplanmıştır.

$$Kartografik Hata = |o(v) - w(v)| \quad (2)$$

$$Kartografik Hata Oranı = \frac{|o(v) - w(v)|}{\max\{o(v), w(v)\}} \quad (3)$$

Bu bağıntılarda bir 'v' alanı için ; o(v): Kartogramdaki alan, w(v): İstenen alanı, max{o(v) - w(v)}: Kartogramdaki alan ve istenen alan değerleri arasından daha yüksek olan değeri ifade eder (Alam vd. 2015, Nusrat ve Kobourov 2016).

### 3.5.4 Kartogramlarda Performans Ölçütü

Kartogram performansı, kartogram oluşturmak için yararlanılan programın istenilen değişimi sağlamak için ne derece etki gösterdiğini ortaya koyar. İstenilen değişim oranı elde edilen değişim oranına ne kadar yakınsa başarı oranı o kadar yüksektir (Alam vd. 2015).

$$\text{Değişim Oranı} = \frac{o(v) - a(v)}{w(v) - a(v)} \quad (4)$$

Bu bağtıda bir 'v' alanı için;  $o(v)$  : Kartogramdaki alan,  $a(v)$ : Temel (asıl) haritadaki alan,  $w(v)$ : İstenen alanı ifade eder. Buna göre  $o(v) - a(v)$ : Elde edilen değişim miktarını,  $w(v) - a(v)$ : İstenilen değişim miktarını ifade eder (Alam vd. 2015).

Kartogramlarda değişim oranının '1' olması istenen değer miktarında bir değişimin sağlandığını ve kartogramın başarılı bir performans oluşturduğunu gösterir. Değişim oranı '1' değerinden uzaklaştıkça başarı oranı düşmekte ve hata oranı artmaktadır. Buna göre kartogramlarda başarı kriteri hata oranı olarak '1' değerinden uzaklığa göre ifade edilebilir (Alam vd. 2015). Bunu matematiksel olarak;

$$\text{Hata oranı} = |1 - \text{Değişim Oranı}| \quad (5)$$

bağıntısıyla ifade edebiliriz (Alam vd. 2015).

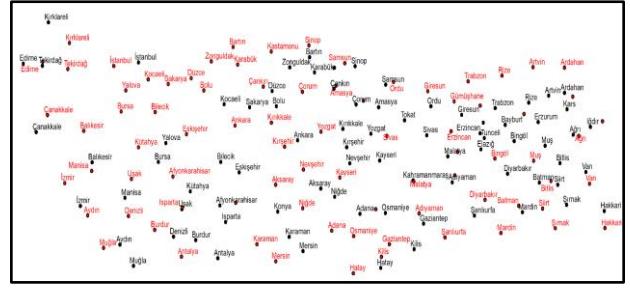
Hata oranı istenilen değişim miktarından kaç kat daha fazla bir değişim sağlandığını gösterir. Hata oranının düşük olması kartogramın başarılı bir performans sağladığını gösterirken, hata oranının yüksek olması kartogramın başarısız bir performans oluşturduğunu gösterir.

## 4. Bulgular

### 4.1 Kartogramlarda Coğrafi Doğruluk Analizi

#### 4.1.1 Konum Hatası

Türkiye geneli için bitişik nüfus kartogramının ortalama konum hatası 112.34 km olarak hesaplanmıştır.

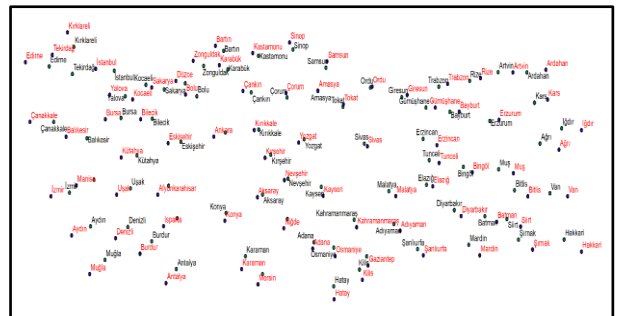


Şekil 5. Türkiye bitişik nüfus kartogramı (siyah) ve temel haritasına (kırmızı) ait ağırlık merkezlerinin noktasal konumları

Çizelge 1. Türkiye bitişik nüfus kartogramının il düzeyinde konum hataları

Sıra	İl	Konum Hatası (km)	Sıra	İl	Konum Hatası (km)
1	Sakarya	222,24	43	Antalya	100,42
2	Bilecik	215,73	44	Trabzon	98,33
3	Düzce	214,54	45	Rize	98,22
4	Kocaeli	209,34	46	Şanlıurfa	97,66
5	Zonguldak	204,74	47	Elazığ	96,49
6	Karabük	201,35	48	Muğla	94,81
7	Bartın	199,92	49	Gümüşhane	94,10
8	Bolu	195,20	50	Kilis	92,16
9	Kırıkkale	190,85	51	Niğde	91,54
10	Çankırı	185,70	52	Karaman	90,78
11	Kütahya	178,64	53	Diyarbakır	89,76
12	Eskişehir	171,15	54	Adana	88,52
13	Ankara	170,94	55	Artvin	82,81
14	Yalova	170,12	56	Bayburt	82,46
15	Kastamonu	169,25	57	Balıkesir	82,45
16	Kırşehir	166,30	58	Batman	81,47
17	Bursa	162,05	59	Mersin	80,06
18	Uşak	157,20	60	Tunceli	79,33
19	Afyonkarahisar	146,78	61	Mardin	79,08
20	Çorum	144,93	62	Erzincan	77,85
21	Denizli	133,96	63	Hatay	77,19
22	Yozgat	132,93	64	Kırklareli	75,45
23	Sinop	130,98	65	Siirt	73,12
24	Nevşehir	125,82	66	Izmir	71,53
25	Amasya	124,85	67	Bingöl	67,74
26	Kahramanmaraş	124,56	68	Şırnak	67,25
27	Isparta	123,96	69	Tekirdağ	66,66
28	Aksaray	122,87	70	İstanbul	65,10
29	Samsun	119,75	71	Ardahan	63,94
30	Tokat	119,54	72	Çanakkale	52,43
31	Adıyaman	119,50	73	Bitlis	51,17
32	Konya	116,54	74	Edirne	50,41
33	Ordu	116,04	75	Muş	49,09
34	Burdur	115,99	76	Hakkari	43,36
35	Kayseri	115,87	77	Erzurum	42,75
36	Aydın	115,43	78	Kars	35,31
37	Manisa	113,28	79	Iğdır	34,83
38	Malatya	111,95	80	Van	31,57
39	Gaziantep	107,56	81	Ağrı	15,11
40	Giresun	107,38			
41	Sivas	106,31			
42	Osmaniye	105,16			

Türkiye geneli için bitişik olmayan nüfus kartogramının ortalama konum hatası ise 34.32 km olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Türkiye bitişik olmayan nüfus kartogramı (siyah) ve temel haritasına (kırmızı) ait ağırlık merkezlerinin noktasal konumları



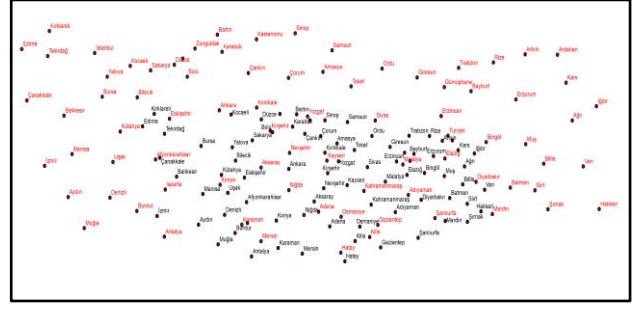
**Çizelge 2.** Türkiye bitişik olmayan nüfus kartogramı il düzeyinde konum hataları

Sıra	İl	Konum Hatası (km)	Sıra	İl	Konum Hatası (km)
1	Tekirdağ	73,49	44	Tunceli	29,81
2	Çanakkale	68,73	45	Bingöl	29,56
3	Edirne	68,44	46	Mersin	28,75
4	Balıkesir	60,94	47	Düzce	27,38
5	Aydın	60,68	48	Bayburt	27,16
6	Hakkari	60,00	49	Gümüşhane	26,75
7	Muğla	57,89	50	Erzurum	26,52
8	İğdir	57,47	51	Bartın	26,33
9	Ağrı	57,04	52	Kilis	26,23
10	İzmir	55,90	53	Trabzon	25,86
11	Ardahan	54,51	54	Karabük	25,80
12	Manisa	53,89	55	Niğde	25,39
13	Van	52,97	56	Diyarbakır	25,10
14	İstanbul	52,83	57	Adıyaman	24,53
15	Kocaeli	52,20	58	Çankırı	23,73
16	Şirnak	48,80	59	Malatya	23,46
17	Kütahya	46,71	60	Şanlıurfa	22,64
18	Burdur	46,49	61	Gaziantep	22,55
19	Antalya	46,24	62	Kayseri	22,21
20	Denizli	45,84	63	Osmaniye	20,83
21	Bursa	45,38	64	Kahramanmaraş	19,47
22	Yalova	45,26	65	Sinop	19,23
23	Isparta	44,80	66	Konya	19,12
24	Silivri	44,59	67	Elazığ	18,97
25	Muş	44,51	68	Kırşehir	18,52
26	Uşak	43,56	69	Kastamonu	17,49
27	Erzincan	42,98	70	Yozgat	17,48
28	Mardin	42,10	71	Adana	16,46
29	Artvin	41,97	72	Aksaray	16,45
30	Bitlis	41,90	73	Giresun	16,09
31	Kırklareli	39,28	74	Samsun	15,76
32	Afyonkarahisar	38,67	75	Kırıkkale	12,81
33	Kars	38,33	76	Çorum	11,54
34	Batman	37,54	77	Sivas	11,24
35	Eskişehir	37,29	78	Neveşehir	11,02
36	Sakarya	36,12	79	Tokat	6,43
37	Ankara	35,24	80	Ordu	5,29
38	Bilecik	33,32	81	Amasya	1,29
39	Karaman	33,25			
40	Bolu	32,65			
41	Zonguldak	32,25			
42	Rize	31,54			
43	Hatay	31,37			

Türkiye için dorling nüfus kartogramının ortalama konum hatası 220.49 km olarak hesaplanmıştır.

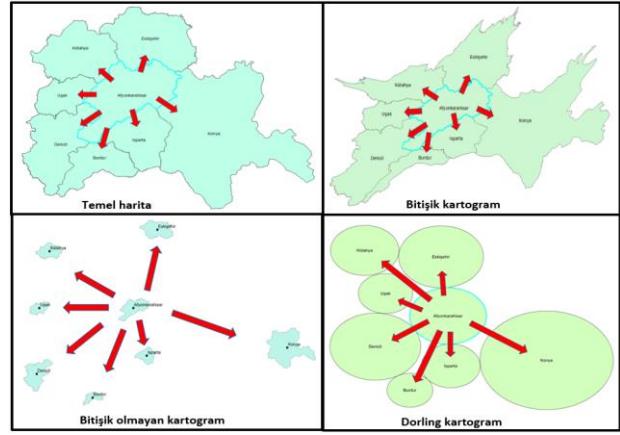
**Çizelge 3.** Türkiye dorling nüfus kartogramı il düzeyinde konum hataları

Sıra	İl	Konum Hatası (km)	Sıra	İl	Konum Hatası (km)
1	Çanakkale	377,99	43	Bitlis	220,84
2	Yalova	373,71	44	Trabzon	219,93
3	Edirne	371,05	45	Şirnak	218,41
4	Tekirdağ	363,96	46	Çankırı	216,67
5	Muğla	363,59	47	Kırıkkale	214,08
6	Manisa	361,43	48	Gümüşhane	200,91
7	Aydın	356,67	49	Giresun	195,97
8	Ardahan	352,68	50	Samsun	192,55
9	Kırklareli	345,52	51	Amasya	191,77
10	İğdir	341,75	52	Kırşehir	187,55
11	Balıkesir	335,69	53	Siirt	184,19
12	Kars	331,48	54	Bingöl	181,09
13	İzmir	327,08	55	Ordu	178,92
14	Sakarya	320,59	56	Konya	178,23
15	Hakkari	316,31	57	Çorum	174,14
16	Uşak	314,83	58	Tokat	167,51
17	Artvin	312,03	59	Aksaray	167,36
18	Denizli	309,81	60	Erzincan	166,63
19	Ağrı	306,57	61	Batman	163,46
20	Bilecik	305,01	62	Diyarbakır	153,02
21	Bartın	291,44	63	Yozgat	143,24
22	Kütahya	289,45	64	Neveşehir	129,73
23	Kocaeli	289,11	65	Mardin	127,38
24	Bursa	287,18	66	Sivas	124,37
25	Zonguldak	277,12	67	Tunceli	119,16
26	Burdur	270,40	68	Mersin	116,39
27	Van	268,58	69	Karaman	115,42
28	Karabük	267,77	70	Elazığ	109,01
29	Düzce	266,02	71	Kayseri	83,93
30	Afyonkarahisar	265,99	72	Niğde	77,02
31	Bolu	264,51	73	Şanlıurfa	68,73
32	Erzurum	261,32	74	Malatya	64,63
33	Rize	253,84	75	Gaziantep	60,13
34	Kastamonu	253,80	76	Adıyaman	56,89
35	Eskişehir	250,20	77	Osmaniye	56,48
36	Antalya	241,51	78	Adana	49,06
37	Sinop	241,35	79	Kahramanmaraş	40,84
38	Ankara	238,43	80	Kilis	40,60
39	Isparta	236,64	81	Hatay	25,18
40	Muş	230,33			
41	İstanbul	224,22			
42	Bayburt	222,05			

**Şekil 7.** Türkiye dorling nüfus kartogramı (siyah) ve temel haritasına (kırmızı) ait ağırlık merkezlerinin noktasal konumları

#### 4.1.2 Göreceli Konum Hatası

Afyonkarahisar referanslı komşu illerin yönlerini belirten harita ile buna ilişkin nüfus kartogramını gösteren harita karşılaştırıldığında yönlerin aynı olduğu görülmektedir. Tüm kartogram türlerinde göreceli konum doğruluğu sağlanmıştır.

**Şekil 8.** Afyonkarahisar referanslı komşu illerin yönlerini gösteren kartogram harita türleri

#### 4.1.3. Şeklin Tanınabilirliği

Bitişik kartogram algoritması alanı nüfusa göre ölçeklendirir. Şekiller mümkün olduğunca korunmaya çalışılsada özellikle nüfusun yoğun olduğu alanlarda şekilde büyük bozulmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Bitişik olmayan kartogramlarda alanlar oldukları yerde boyut olarak değişmeye uğrasada şekiller temel haritadaki şekilleriyle aynıdır. Alanların bitişiklik ilişkilerinden bağımsız olarak boyutlandırılması şekillerde bozulmaları önlemiştir. Temsil edilen bölgeler, boyut olarak büyüyebilir veya küçülebilir yine de şekillerini koruyabilirler.



Şekillerin korunması ilgili birimin tanınmasını kolaylaştırabilir.

Dorling kartogramlarda temsil edilen alanlar bölge şeklinden tamamen bağımsızdır. Çünkü dorling kartogramı veriyi temsil etmek için daire sembolünü kullanır. Daireler veri büyüklüğüne göre boyutlandırılır. Bu nedenle dorling kartogramlarında şekiller tanınabilir değildir.

#### 4.2 Kartogramlarda Topolojik Doğruluk Analizi

Bitişik kartogramlarda tüm illerde komşulukların korunduğu görülmüştür. İllerin komşuluk ilişkileri korunmakla beraber sınır uzunluklarında ise değişimler mevcuttur.

Bitişik olmayan kartogramlarda istatistiksel veriye göre her alan bağımsız olarak ölçeklendirilir. Bitişik olmayan kartogramda, şekli korumak için topolojiden (nesnelere arasındaki bağlantı) ödün verilmiştir. Topoloji korunmamıştır, iller arasında büyük boşluklar vardır.

**Çizelge 4.** İllerin Türkiye haritası ve bitişik nüfus kartogramındaki komşulukları

Türkiye Haritası			Türkiye Bitişik Nüfus Kartogramı		
İl	Komşu İl	Sınır Uzunluğu (km)	İl	Komşu İl	Sınır Uzunluğu (km)
Adana	Hatay	15,91	Adana	Hatay	28,77
Adana	Kahramanmaraş	78,57	Adana	Kahramanmaraş	84,39
Adana	Kayseri	193,50	Adana	Kayseri	223,76
Adana	Mersin	142,55	Adana	Mersin	167,88
Adana	Niğde	66,95	Adana	Niğde	78,69
Adana	Osmaniye	122,09	Adana	Osmaniye	168,85
Adıyaman	Diyarbakır	38,11	Adıyaman	Diyarbakır	37,86
Adıyaman	Gaziantep	55,63	Adıyaman	Gaziantep	68,94
Adıyaman	Kahramanmaraş	79,04	Adıyaman	Kahramanmaraş	75,45
Adıyaman	Malatya	190,25	Adıyaman	Malatya	156,89
Adıyaman	Şanlıurfa	166,04	Adıyaman	Şanlıurfa	154,77
Afyonkarahisar	Burdur	18,39	Afyonkarahisar	Burdur	14,99
Afyonkarahisar	Denizli	140,69	Afyonkarahisar	Denizli	116,82
Afyonkarahisar	Eskişehir	156,75	Afyonkarahisar	Eskişehir	114,89
Afyonkarahisar	Isparta	145,73	Afyonkarahisar	Isparta	116,03
Afyonkarahisar	Konya	110,63	Afyonkarahisar	Konya	82,36
Afyonkarahisar	Kütahya	68,46	Afyonkarahisar	Kütahya	51,76
Afyonkarahisar	Uşak	50,12	Afyonkarahisar	Uşak	37,86
Ağrı	Bitlis	35,24	Ağrı	Bitlis	23,37
Ağrı	Erzurum	75,81	Ağrı	Erzurum	46,77
Ağrı	İğdir	135,88	Ağrı	İğdir	110,27
Ağrı	Kars	64,47	Ağrı	Kars	36,07
Ağrı	Muş	72,76	Ağrı	Muş	55,56
Ağrı	Van	155,48	Ağrı	Van	109,66
Aksaray	Ankara	82,05	Aksaray	Ankara	136,99
Aksaray	Kırşehir	50,77	Aksaray	Kırşehir	43,58
Aksaray	Konya	174,03	Aksaray	Konya	140,41
Aksaray	Neveşehir	69,08	Aksaray	Neveşehir	60,92
Aksaray	Niğde	59,80	Aksaray	Niğde	63,45

Bitişik kartogramlar için Türkiye geneli ortalama bitişiklik hatası %24.81 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 5.** Türkiye bitişik nüfus kartogramı bitişiklik hataları

Sıra	İl	Bitişiklik Hatası (%)	Sıra	İl	Bitişiklik Hatası (%)
1	İstanbul	79,41	48	Bartın	20,15
2	Yalova	55,92	49	Eskişehir	19,46
3	Kocaeli	55,21	50	Amasya	18,91
4	Ardahan	51,47	51	Kırkkale	18,73
5	Kars	44,22	52	Karabük	18,53
6	Tekirdağ	44,03	53	Aydın	18,37
7	Bursa	42,44	54	Aksaray	18,23
8	Sakarya	42,27	55	Neveşehir	17,94
9	İzmir	40,35	56	Edirne	17,77
10	Artvin	39,53	57	Manisa	17,30
11	Hatay	38,98	58	Bolu	17,09
12	Tunceli	38,28	59	Uşak	17,03
13	Kilis	37,31	60	Bilecik	16,81
14	Kastamonu	36,51	61	Malatya	16,55
15	Erzurum	36,41	62	Niğde	16,21
16	Yozgat	34,59	63	Trabzon	15,70
17	Gaziantep	33,37	64	Tokat	15,47
18	Gümüşhane	32,21	65	Kayseri	13,92
19	Hakkari	31,67	66	Kahramanmaraş	13,90
20	Ağrı	31,33	67	Burdur	13,79
21	Balıkesir	30,99	68	Antalya	12,89
22	Kırklareli	30,94	69	Mersin	12,64
23	Muş	29,40	70	Şanlıurfa	12,01
24	Erzincan	29,11	71	Batman	11,73
25	Bitlis	28,05	72	Mardin	11,13
26	İğdir	27,77	73	Rize	10,56
27	Bingöl	27,28	74	Zonguldak	10,39
28	Sivas	26,80	75	Muğla	10,23
29	Sinop	26,42	76	Adıyaman	9,76
30	Osmaniye	26,33	77	Denizli	8,51
31	Van	26,27	78	Diyarbakır	7,49
32	Elazığ	25,74	79	Ordu	7,34
33	Karaman	25,68	80	Çanakkale	6,83
34	Ankara	25,50	81	Samsun	5,48
35	Çorum	25,31			
36	Çankırı	24,64			
37	Kırşehir	24,42			
38	Bayburt	24,31			
39	Isparta	23,69			
40	Siirt	23,49			
41	Konya	23,48			
42	Afyonkarahisar	22,43			
43	Düzce	22,15			
44	Kütahya	22,08			
45	Giresun	21,75			
46	Şirnak	21,06			
47	Adana	20,47			

Dorling kartogramda bitişiklik ilişkilerinde çok yüksek hatalar vardır. Sınır illerle olan bitişiklik ya hiç sağlanmamıştır ya da bitişikliğin çok az bir miktarı sağlanmıştır. Nitekim Türkiye geneli için ortalama bitişiklik hatası %92.77 olarak hesaplanmıştır. Gerçekte komşu olan illerin birçoğu kartogramda komşu değildir veya bunun tersi de geçerlidir.

**Çizelge 6.** İllerin Türkiye haritası ve dorling nüfus kartogramındaki komşulukları

Türkiye Haritası			Türkiye Nüfus Kartogramı		
İl	Komşu İl	Sınır Uzunluğu (Km)	İl	Komşu İl	Sınır Uzunluğu (Km)
Adana	Hatay	15,91	Adana	Hatay	13,87
Adana	Kahramanmaraş	78,57	Adana	Kahramanmaraş	0,00
Adana	Kayseri	193,50	Adana	Kayseri	0,00
Adana	Mersin	142,55	Adana	Mersin	10,84
Adana	Niğde	66,95	Adana	Niğde	8,55
Adana	Osmaniye	122,09	Adana	Osmaniye	18,45
Adıyaman	Diyarbakır	38,11	Adıyaman	Diyarbakır	11,87
Adıyaman	Gaziantep	55,63	Adıyaman	Gaziantep	0,00
Adıyaman	Kahramanmaraş	79,04	Adıyaman	Kahramanmaraş	11,45
Adıyaman	Malatya	190,25	Adıyaman	Malatya	0,00
Adıyaman	Şanlıurfa	166,04	Adıyaman	Şanlıurfa	0,00
Afyonkarahisar	Burdur	18,39	Afyonkarahisar	Burdur	0,00
Afyonkarahisar	Denizli	140,69	Afyonkarahisar	Denizli	5,77
Afyonkarahisar	Eskişehir	156,75	Afyonkarahisar	Eskişehir	11,45
Afyonkarahisar	Isparta	145,73	Afyonkarahisar	Isparta	9,06
Afyonkarahisar	Konya	110,63	Afyonkarahisar	Konya	0,00
Afyonkarahisar	Kütahya	68,46	Afyonkarahisar	Kütahya	0,00
Afyonkarahisar	Uşak	50,12	Afyonkarahisar	Uşak	0,00
Ağrı	Bitlis	35,24	Ağrı	Bitlis	0,00
Ağrı	Erzurum	75,81	Ağrı	Erzurum	0,00
Ağrı	İğdir	135,88	Ağrı	İğdir	2,73
Ağrı	Kars	64,47	Ağrı	Kars	0,00
Ağrı	Muş	72,76	Ağrı	Muş	0,00
Ağrı	Van	155,48	Ağrı	Van	0,00
Aksaray	Ankara	82,05	Aksaray	Ankara	15,64
Aksaray	Kırşehir	50,77	Aksaray	Kırşehir	0,00
Aksaray	Konya	174,03	Aksaray	Konya	0,00
Aksaray	Neveşehir	69,08	Aksaray	Neveşehir	7,64
Aksaray	Niğde	59,80	Aksaray	Niğde	10,41
Amasya	Çorum	145,49	Amasya	Çorum	7,73
Amasya	Samsun	157,50	Amasya	Samsun	9,18
Amasya	Tokat	155,44	Amasya	Tokat	9,71
Amasya	Yozgat	6,58	Amasya	Yozgat	0,00

### Çizelge 7. Türkiye dorling nüfus kartogramı bitişiklik hataları

Sıra	İl	Bitişiklik Hatası (%)	Sıra	İl	Bitişiklik Hatası (%)
1	Bayburt	100,00	48	Dişarbakır	92,15
2	Muş	100,00	49	Kayseri	92,02
3	Kilis	100,00	50	Denizli	91,97
4	Ağrı	99,66	51	Ankara	91,81
5	Erzurum	99,08	52	İzmir	91,71
6	Artvin	98,94	53	Balikesir	91,68
7	Ardahan	98,94	54	Çanakkale	91,54
8	Sivas	98,68	55	Şırnak	91,48
9	Uşak	98,53	56	Batman	91,28
10	Tunceli	98,42	57	Kırıkkale	91,27
11	Rize	98,34	58	Sakarya	91,25
12	Bilecik	98,32	59	Gaziantep	91,02
13	Karabük	98,31	60	Adıyaman	90,87
14	Samsun	98,11	61	İstanbul	90,71
15	Mersin	97,82	62	Kahramanmaraş	90,62
16	Afyonkarahisar	97,48	63	Aksaray	90,49
17	Çankırı	97,18	64	Şanlıurfa	90,48
18	Trabzon	97,16	65	Tekirdağ	89,97
19	Bingöl	97,05	66	Bartın	89,82
20	Gümüşhane	97,02	67	Karaman	89,53
21	Kars	96,75	68	Kocaeli	89,25
22	Kırşehir	96,38	69	Giresun	88,16
23	Konya	96,04	70	Aydın	87,68
24	Kastamonu	95,94	71	Hakkari	86,64
25	Malatya	95,83	72	Bursa	86,41
26	Amasya	95,65	73	Düzce	86,15
27	Kütahya	95,58	74	Manisa	85,76
28	Antalya	95,47	75	Yalova	85,02
29	Ordu	95,33	76	Zonguldak	84,59
30	Eskişehir	95,18	77	Erzincan	83,25
31	Bolu	95,06	78	Osmaniye	83,16
32	Bitlis	95,03	79	Adana	79,55
33	Nevşehir	94,88	80	Elazığ	76,81
34	Çorum	94,64	81	Hatay	70,94
35	Tokat	94,41			
36	Yozgat	94,26			
37	Muğla	94,04			
38	Kırıklareli	93,39			
39	Mardin	93,33			
40	Van	93,23			
41	Edirne	93,13			
42	Siirt	93,08			
43	Sinop	92,93			
44	Niğde	92,83			
45	Isparta	92,81			
46	Burdur	92,50			
47	Iğdır	92,48			

### 4.3 Kartogramlarda İstatistiksel Doğruluk Analizi

Dayanak noktası belirlenerek buraya düşen kartogram alanı miktarına göre oran-orantı uygulanarak diğer iller için 'istenilen alan' hesaplanmıştır. (2) bağıntısından yararlanılarak Türkiye iller düzeyinde kartografik hatalar hesaplanmıştır. Türkiye geneli için ortalama kartografik hatalar; bitişik kartogramlar için 828.57 km<sup>2</sup>, bitişik olmayan kartogramlar için 1.09 km<sup>2</sup> ve dorling kartogramları için 0.45 km<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Elde edilen kartografik hata miktarları ve (3) bağıntısı yardımıyla Türkiye iller düzeyinde kartografik hata oranları hesaplanmıştır Türkiye geneli için ortalama kartografik hata oranları; bitişik kartogramlar için %8.80, bitişik olmayan kartogramlar için %0.13 ve dorling kartogramları için %0.02 olarak hesaplanmıştır.

### Çizelge 8. Türkiye bitişik nüfus kartogramı kartografik hata oranları

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
1	Kilis	2089	1312,53	37,17
2	Gümüşhane	1986	1302,51	34,42
3	Ardahan	1302	883,90	32,11
4	Bolu	4195	2893,64	31,02
5	Tekirdağ	14112	9937,07	29,58
6	Bilecik	2685	2010,43	25,12
7	Sinop	2590	1989,68	23,18
8	Bayburt	974	752,91	22,70

### Çizelge 8. (Devam) Türkiye bitişik nüfus kartogramı kartografik hata oranları

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
9	Tunceli	992	767,00	22,68
10	Karaman	2962	2343,20	20,89
11	Artvin	1923	1558,04	18,98
12	İstanbul	119005	142129,70	16,27
13	Çankırı	2107	1768,78	16,05
14	Hakkari	3054	2578,46	15,57
15	Burdur	2882	2455,09	14,81
16	Kırıklareli	3883	3325,06	14,37
17	Yalova	2197	2537,43	13,42
18	Çanakkale	5742	4977,87	13,31
19	Kars	2986	2618,99	12,29
20	Sivas	6656	5845,04	12,18
21	Kastamonu	3936	3459,63	12,10
22	Eskişehir	9211	8170,04	11,30
23	Edirne	4222	3748,13	11,22
24	Kütahya	5961	5300,87	11,07
25	Amasya	3463	3083,84	10,95
26	Iğdır	2068	1850,46	10,52
27	İzmir	36153	40395,70	10,50
28	Balikesir	12718	11400,61	10,36
29	Gaziantep	17556	19313,68	9,10
30	Niğde	3644	3328,13	8,67
31	Kırıkkale	2780	2561,82	7,85
32	Trabzon	6886	7462,93	7,73
33	Hatay	14074	15252,34	7,73
34	Batman	5268	5701,55	7,60
35	Kırşehir	2416	2234,02	7,53
36	Muğla	9906	9199,03	7,14
37	Zonguldak	5070	5434,30	6,70
38	Aksaray	4165	3888,29	6,64
39	Konya	22097	20682,01	6,40
40	Aydın	10986	10286,54	6,37
41	Ankara	48829	52056,83	6,20
42	Yozgat	4101	3852,29	6,06
43	Kocaeli	19541	18358,65	6,05
44	Bingöl	2751	2589,99	5,85
45	Manisa	14126	13333,95	5,61
46	Tokat	5761	5495,49	4,61
47	Kahramanmaraş	11245	10737,67	4,51
48	Bitlis	3371	3226,31	4,29
49	Ordu	6733	6998,73	3,80
50	Samsun	11992	12464,98	3,79
51	Elazığ	5213	5404,48	3,54
52	Antalya	22616	23423,86	3,45
53	Van	10942	10564,67	3,45
54	Bursa	27592	28511,82	3,23
55	Siirt	3136	3043,17	2,96
56	Erzincan	2220	2154,87	2,93
57	Rize	3073	3165,32	2,92
58	Düzce	3531	3637,05	2,92
59	Mardin	8091	7856,49	2,90
60	Adıyaman	5973	5813,52	2,67
61	Isparta	4150	4047,24	2,48
62	Afyonkarahisar	6945	6773,64	2,47
63	Çorum	4996	4872,88	2,46
64	Giresun	4219	4124,61	2,24
65	Adana	20307	20761,97	2,19
66	Ağrı	5028	4921,68	2,11
67	Erzurum	7102	6970,04	1,86
68	Mersin	16861	17177,47	1,84
69	Şanlıurfa	19799	19443,27	1,80
70	Denizli	9402	9568,01	1,74
71	Uşak	3449	3395,80	1,54
72	Dişarbakır	16144	16393,16	1,52
73	Kayseri	12909	13065,91	1,20
74	Malatya	7362	7410,13	0,65
75	Şırnak	4965	4943,07	0,44
76	Sakarya	9611	9583,95	0,28
77	Karabük	2245	2239,28	0,25
78	Muş	3771	3778,96	0,21
79	Nevşehir	2808	2803,19	0,17
80	Osmaniye	5039	5042,29	0,07
81	Bartın	1829	1829,00	0,00

### Çizelge 9. Türkiye bitişik olmayan nüfus kartogramı kartografik hata oranları

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	Nüfus	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
1	Çanakkale	501	541548	506,14	1,02
2	Bayburt	76	81910	76,55	0,72
3	Kilis	133	142792	133,46	0,34
4	Gümüşhane	132	141702	132,44	0,33
5	Karabük	227	243614	227,68	0,30
6	Artvin	158	169501	158,42	0,26
7	Burdur	249	267092	249,63	0,25
8	Düzce	369	395679	369,81	0,22
9	Kastamonu	351	376377	351,77	0,22
10	Bilecik	204	218717	204,42	0,20
11	Kırıkkale	260	278703	260,48	0,18
12	Kütahya	538	576688	538,98	0,18
13	Amasya	313	335494	313,56	0,18
14	Yozgat	391	419095	391,69	0,18
15	Sinop	202	216460	202,31	0,15
16	Sakarya	973	1042649	974,47	0,15
17	Muğla	934	1000773	935,34	0,14

**Çizelge 9. (Devam) Türkiye bitişik olmayan nüfus kartogramı kartografik hata oranları**

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	Nüfus	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
18	Ardahan	90	96161	89,87	0,14
19	Tokat	558	597861	558,77	0,14
20	Siirt	309	331070	309,42	0,14
21	Tekirdağ	1009	1081065	1010,38	0,14
22	Osmaniye	512	548556	512,69	0,13
23	Bingöl	263	281768	263,34	0,13
24	Manisa	1354	1450616	1355,76	0,13
25	Isparta	411	440304	411,51	0,12
26	Batman	579	620278	579,72	0,12
27	Şırnak	502	537762	502,60	0,12
28	Hatay	1549	1659320	1550,82	0,12
29	Niğde	338	362071	338,40	0,12
30	Kayseri	1327	1421455	1328,51	0,11
31	İstanbul	14435	15462452	14451,41	0,11
32	Antalya	2379	2548308	2381,68	0,11
33	Samsun	1266	1356079	1267,41	0,11
34	Van	1073	1149342	1074,19	0,11
35	Kars	266	284923	266,29	0,11
36	Diyarbakır	1665	1783431	1666,82	0,11
37	Trabzon	758	811901	758,81	0,11
38	Afyonkarahisar	688	736912	688,73	0,11
39	İzmir	4103	4394694	4107,34	0,11
40	Karaman	238	254919	238,25	0,11
41	Bursa	2896	3101833	2899,01	0,10
42	Mardin	798	854716	798,83	0,10
43	Balikesir	1158	1240285	1159,19	0,10
44	Zonguldak	552	591204	552,55	0,10
45	Şanlıurfa	1975	2115256	1976,95	0,10
46	Erzurum	708	758279	708,70	0,10
47	Adana	2109	2258718	2111,03	0,10
48	Ankara	5288	5663322	5293,02	0,09
49	Elazığ	549	587960	549,52	0,09
50	Çorum	495	530126	495,46	0,09
51	Giresun	419	448721	419,38	0,09
52	Konya	2101	2250020	2102,90	0,09
53	Gaziantep	1962	2101157	1963,77	0,09
54	Mersin	1745	1868757	1746,57	0,09
55	Kocaeli	1865	1997258	1866,66	0,09
56	Aksaray	395	423011	395,35	0,09
57	Denizli	972	1040915	972,85	0,09
58	Aydın	1045	1119084	1045,91	0,09
59	Ordu	711	761400	711,61	0,09
60	Çankırı	180	192428	179,85	0,09
61	Eskişehir	830	888828	830,71	0,09
62	Ağrı	500	535435	500,42	0,08
63	Uşak	345	369433	345,28	0,08
64	İğdir	188	201314	188,15	0,08
65	Bolu	294	314802	294,22	0,07
66	Kahramanmaraş	1091	1168163	1091,78	0,07
67	Kırşehir	227	243042	227,15	0,07
68	Hakkari	262	280514	262,17	0,07
69	Muş	384	411117	384,24	0,06
70	Malatya	753	806156	753,44	0,06
71	Sivas	594	635889	594,31	0,05
72	Rize	322	344359	321,84	0,05
73	Erzincan	219	234431	219,10	0,05
74	Edirne	381	407763	381,10	0,03
75	Kırklareli	338	361737	338,08	0,02
76	Adıyaman	591	632459	591,10	0,02
77	Bartın	186	198979	185,97	0,02
78	Tunceli	78	83443	77,99	0,02
79	Bitlis	328	350994	328,04	0,01
80	Nevşehir	285	304962	285,02	0,01
81	Yalova	258	276050	258,00	0,00

**Çizelge 10. Türkiye dorling nüfus kartogramı kartografik hata oranları**

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
1	Bayburt	331	331,44	0,132
2	Tunceli	338	337,64	0,106
3	Gümüşhane	573	573,38	0,066
4	İğdir	815	814,59	0,050
5	Karaman	1031	1031,50	0,048
6	Çankırı	779	778,63	0,047
7	Kırşehir	983	983,44	0,044
8	Erzincan	949	948,59	0,043
9	Amasya	1357	1357,53	0,039
10	Aksaray	1711	1711,66	0,038
11	Kilis	578	577,79	0,036
12	Isparta	1781	1781,63	0,035
13	Muş	1663	1663,53	0,032
14	Osmaniye	2219	2219,66	0,030
15	Rize	1393	1393,40	0,029
16	Siirt	1340	1339,63	0,028
17	Ardahan	389	389,10	0,026
18	Ağrı	2166	2166,57	0,026
19	Karabük	986	985,75	0,025
20	Kırıkkale	1128	1127,74	0,023
21	Burdur	1081	1080,75	0,023
22	Kütahya	2333	2333,49	0,021
23	Artvin	686	685,86	0,020
24	Kırklareli	1464	1463,72	0,019
25	Bartın	805	805,14	0,018
26	Bitlis	1420	1420,25	0,018

**Çizelge 10. (Devam) Türkiye dorling nüfus kartogramı kartografik hata oranları**

Sıra	İl	Kartogram Alan (km <sup>2</sup> )	İstenen Alan (km <sup>2</sup> )	Kartografik Hata Oranı (%)
27	Kahramanmaraş	4726	4726,82	0,017
28	Giresun	1816	1815,69	0,017
29	Bolu	1274	1273,80	0,015
30	Eskişehir	3596	3596,53	0,015
31	Mardin	3458	3458,50	0,014
32	Van	4650	4650,66	0,014
33	Sinop	876	875,88	0,014
34	Çanakkale	2191	2191,30	0,014
35	Antalya	10310	10311,39	0,014
36	Balikesir	5018	5018,65	0,013
37	Şanlıurfa	8558	8559,11	0,013
38	Kayseri	5751	5751,73	0,013
39	Gaziantep	8501	8502,06	0,012
40	Manisa	5869	5869,73	0,012
41	Muğla	4049	4049,50	0,012
42	Bingöl	1140	1140,14	0,012
43	Yozgat	1696	1695,81	0,011
44	Zonguldak	2392	2392,23	0,010
45	Bursa	12550	12551,16	0,009
46	İstanbul	62561	62566,78	0,009
47	Uşak	1495	1494,86	0,009
48	Erzurum	3068	3068,28	0,009
49	Mersin	7561	7561,68	0,009
50	Tekirdağ	4374	4374,39	0,009
51	İzmir	17781	17782,55	0,009
52	Kars	1153	1152,90	0,008
53	Ankara	22914	22915,89	0,008
54	Kocaeli	8081	8081,64	0,008
55	Trabzon	3285	3285,25	0,008
56	Tokat	2419	2419,17	0,007
57	Adana	9139	9139,61	0,007
58	Adıyaman	2559	2559,16	0,006
59	Afyonkarahisar	2982	2981,82	0,006
60	Diyarbakır	7216	7216,42	0,006
61	Hakkari	1135	1135,06	0,006
62	Batman	2510	2509,87	0,005
63	Aydın	4528	4528,23	0,005
64	Niğde	1465	1465,07	0,005
65	Konya	9104	9104,41	0,005
66	Elazığ	2379	2379,10	0,004
67	Çorum	2145	2145,09	0,004
68	Düzce	1601	1601,06	0,004
69	Samsun	5487	5487,20	0,004
70	Hatay	6714	6714,22	0,003
71	Ordu	3081	3080,90	0,003
72	Kastamonu	1523	1522,96	0,003
73	Edirne	1650	1649,96	0,002
74	Denizli	4212	4211,93	0,002
75	Sivas	2573	2573,04	0,002
76	Sakarya	4219	4218,94	0,001
77	Bilecik	885	885,01	0,001
78	Nevşehir	1234	1233,99	0,001
79	Şırnak	2176	2175,98	0,001
80	Malatya	3262	3262,00	0,000
81	Yalova	1117	1117,00	0,000

#### 4.4 Kartogramlarda Performans Analizi

(4) bağıntısı kullanılarak kartogramlar için Türkiye il düzeyinde değişim oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan değişim oranları kullanılarak (5) bağıntısı yardımıyla Türkiye iller düzeyinde hata oranları hesaplanmıştır.

Türkiye geneli için ortalama hata oranları; bitişik kartogramlar için 0.56, bitişik olmayan kartogramlar için 0.0001 ve dorling kartogramları için 0.000096 olarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 11.** Türkiye bitişik nüfus kartogramı il düzeyinde hata oranları

Sıra	İl	Hata Oranı	Sıra	İl	Hata Oranı
1	Manisa	26,443	42	Burdur	0,091
2	Kilis	8,133	43	Niğde	0,081
3	Şanlıurfa	1,383	44	Kocaeli	0,079
4	Tekirdağ	1,121	45	Bayburt	0,074
5	Balikesir	0,445	46	Aksaray	0,074
6	Batman	0,354	47	Konya	0,071
7	Aydın	0,319	48	Adana	0,066
8	Bilecik	0,312	49	Denizli	0,065
9	Mersin	0,263	50	Artvin	0,062
10	Mardin	0,260	51	Tokat	0,059
11	Antalya	0,245	52	Çankırı	0,059
12	Ordu	0,244	53	Bursa	0,052
13	Bolu	0,240	54	Kastamonu	0,050
14	Muğla	0,209	55	Elazığ	0,049
15	Trabzon	0,204	56	Kars	0,048
16	Edirne	0,197	57	Kırşehir	0,042
17	Yalova	0,196	58	Kayseri	0,041
18	Diyarbakır	0,185	59	Van	0,037
19	Eskişehir	0,181	60	Sivas	0,036
20	Kırklareli	0,179	61	Siirt	0,035
21	Zonguldak	0,174	62	Giresun	0,033
22	Samsun	0,173	63	Tunceli	0,033
23	İstanbul	0,169	64	Bingöl	0,030
24	Sinop	0,161	65	Bitlis	0,029
25	Çanakkale	0,160	66	Yozgat	0,025
26	Amasya	0,149	67	Uşak	0,025
27	İzmir	0,148	68	Afyonkarahisar	0,024
28	Gaziantep	0,140	69	Isparta	0,021
29	Rize	0,139	70	Ağrı	0,017
30	Kahramanmaraş	0,135	71	Çorum	0,016
31	Gümüşhane	0,128	72	Şırnak	0,010
32	Ankara	0,122	73	Malatya	0,010
33	Hatay	0,121	74	Erzurum	0,007
34	İğdir	0,121	75	Erzincan	0,007
35	Hakkari	0,106	76	Sakarya	0,006
36	Adıyaman	0,105	77	Karabük	0,003
37	Kütahya	0,105	78	Osmaniye	0,002
38	Ardahan	0,103	79	Neveşehir	0,002
39	Kırıkkale	0,098	80	Muş	0,002
40	Karaman	0,098	81	Bartın	0,000
41	Düzce	0,093			

**Çizelge 12.** Türkiye bitişik olmayan nüfus kartogramı il düzeyinde hata oranları

Sıra	İl	Hata Oranı	Sıra	İl	Hata Oranı
1	İstanbul	0,001824	41	Gümüşhane	0,000067
2	Kocaeli	0,001088	42	Isparta	0,000060
3	İzmir	0,000563	43	Kastamonu	0,000060
4	Çanakkale	0,000555	44	Van	0,000060
5	Hatay	0,000459	45	Elazığ	0,000059
6	Sakarya	0,000383	46	Kahramanmaraş	0,000058
7	Bursa	0,000382	47	Giresun	0,000058
8	Düzce	0,000380	48	Artvin	0,000058
9	Gaziantep	0,000367	49	Niğde	0,000058
10	Kilis	0,000357	50	Sinop	0,000055
11	Tekirdağ	0,000265	51	Afyonkarahisar	0,000055
12	Ankara	0,000247	52	Eskişehir	0,000054
13	Osmaniye	0,000246	53	Uşak	0,000053
14	Trabzon	0,000210	54	Yozgat	0,000052
15	Zonguldak	0,000196	55	Konya	0,000049
16	Batman	0,000185	56	Aksaray	0,000049
17	Karabük	0,000175	57	Rize	0,000045
18	Adana	0,000173	58	Bingöl	0,000045
19	Samsun	0,000167	59	İğdir	0,000044
20	Bayburt	0,000151	60	Ağrı	0,000040
21	Antalya	0,000151	61	Çorum	0,000039
22	Manisa	0,000148	62	Malatya	0,000039
23	Diyarbakır	0,000136	63	Karaman	0,000030
24	Aydın	0,000129	64	Kars	0,000030
25	Ordu	0,000118	65	Erzurum	0,000029
26	Muğla	0,000115	66	Muş	0,000028
27	Şanlıurfa	0,000113	67	Bolu	0,000027
28	Mersin	0,000110	68	Ardahan	0,000026
29	Kırıkkale	0,000106	69	Hakkari	0,000025
30	Bilecik	0,000105	70	Kırşehir	0,000024
31	Amasya	0,000105	71	Çankırı	0,000021
32	Mardin	0,000104	72	Edirne	0,000017
33	Kayseri	0,000097	73	Adıyaman	0,000016
34	Şırnak	0,000091	74	Bartın	0,000015
35	Burdur	0,000091	75	Kırklareli	0,000014
36	Balikesir	0,000090	76	Sivas	0,000011
37	Kütahya	0,000089	77	Erzincan	0,000009
38	Tokat	0,000081	78	Bitlis	0,000005
39	Siirt	0,000078	79	Neveşehir	0,000004
40	Denizli	0,000077	80	Tunceli	0,000002
			81	Yalova	0,000000

**Çizelge 13.** Türkiye dorling nüfus kartogramı il düzeyinde hata oranları

Sıra	İl	Hata Oranı	Sıra	İl	Hata Oranı
1	Ankara	0,00070	43	Kırklareli	0,00006
2	Bursa	0,00066	44	Çankırı	0,00005
3	Gaziantep	0,00062	45	Diyarbakır	0,00005
4	Osmaniye	0,00061	46	Kütahya	0,00005
5	İzmir	0,00026	47	Eskişehir	0,00005
6	Kilis	0,00025	48	Tunceli	0,00005
7	Zonguldak	0,00024	49	Samsun	0,00005
8	Tekirdağ	0,00021	50	Van	0,00004
9	Trabzon	0,00019	51	Burdur	0,00004
10	Hatay	0,00018	52	Çanakkale	0,00004
11	Rize	0,00017	53	Erzincan	0,00004
12	İğdir	0,00014	54	Bitlis	0,00004
13	Antalya	0,00014	55	Uşak	0,00003
14	Kocaeli	0,00014	56	Adıyaman	0,00003
15	Adana	0,00013	57	Ordu	0,00003
16	Bayburt	0,00013	58	Bolu	0,00003
17	Amasya	0,00012	59	Sinop	0,00003
18	Aksaray	0,00011	60	Ardahan	0,00002
19	Şanlıurfa	0,00010	61	Tokat	0,00002
20	İstanbul	0,00010	62	Artvin	0,00002
21	Manisa	0,00010	63	Bingöl	0,00002
22	Sakarya	0,00010	64	Afyonkarahisar	0,00002
23	Mardin	0,00009	65	Yozgat	0,00002
24	Bartın	0,00009	66	Elazığ	0,00001
25	Isparta	0,00009	67	Konya	0,00001
26	Siirt	0,00008	68	Niğde	0,00001
27	Kahramanmaraş	0,00008	69	Erzurum	0,00001
28	Mersin	0,00008	70	Kars	0,00001
29	Karabük	0,00008	71	Hakkari	0,00001
30	Kırşehir	0,00008	72	Denizli	0,00001
31	Muş	0,00008	73	Edirne	0,00001
32	Kırıkkale	0,00007	74	Çorum	0,00001
33	Düzce	0,00007	75	Kastamonu	0,00000
34	Balikesir	0,00007	76	Şırnak	0,00000
35	Kayseri	0,00007	77	Bilecik	0,00000
36	Karaman	0,00007	78	Neveşehir	0,00000
37	Batman	0,00006	79	Sivas	0,00000
38	Ağrı	0,00006	80	Malatya	0,00000
39	Aydın	0,00006	81	Yalova	0,00000
40	Gümüşhane	0,00006			
41	Giresun	0,00006			
42	Muğla	0,00006			

#### 4.5 Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Coğrafi doğruluk, topolojik doğruluk, istatistiksel doğruluk ve performans ölçütlerine göre analiz edilen kartogram türleri elde edilen verilere göre karşılaştırılmıştır. İlgili ölçütler için kartogramlar birbirlerine kıyasla doğruluk derecesine göre yüksek doğruluktan düşük doğruluğa doğru sıralanmıştır (Çizelge 14, Çizelge 15, Çizelge 16). Bununla beraber kartogram türleri performans analizi bakımından birbirlerine kıyasla başarılı olma ölçütüne (düşük hata oranından yüksek hata oranına) göre sıralanmıştır (Çizelge 17). Bu veriler ışığında kartogram türleri değerlendirilmiştir (Kaya 2021).

**Çizelge 14.** Kartogram türlerinin coğrafi doğrulukları

Kartogram Türü	Coğrafi Doğruluk		
	Konum Hatası (km)	Göreceli Konum Hatası	Şekil Korunması
Bitişik Olmayan Kartogram	34,32	Hatasız	Korunur
Bitişik Kartogram	112,34	Hatasız	Kısmen
Dorling Kartogram	220,49	Hatasız	Korunmaz



**Çizelge 15.** Kartogram türlerinin topolojik doğrulukları

Topolojik Doğruluk		
Sıra	Kartogram Türü	Bitişiklik Hatası (%)
1	Bitişik Kartogram	24,81
2	Dorling Kartogram	92,77
3	Bitişik Olmayan Kartogram	100

**Çizelge 16.** Kartogram türlerinin istatistiksel doğrulukları

İstatistiksel Doğruluk		
Sıra	Kartogram Türü	Kartografik Hata Oranı (%)
1	Dorling Kartogram	0,02
2	Bitişik Olmayan Kartogram	0,13
3	Bitişik Kartogram	8,8

**Çizelge 17.** Kartogram türlerinin performans analizleri

Performans Analizi		
Sıra	Kartogram Türü	Hata Oranı
1	Dorling Kartogram	0,000096
2	Bitişik Olmayan Kartogram	0,0001
3	Bitişik Kartogram	0,5596

#### 4.5.1 Bitişik Kartogramların Değerlendirilmesi

Bitişik kartogramlar, bitişik olmayan kartogramlara göre daha yüksek bir konum hatasına sahipken dorling kartogramlarından ise daha düşük bir konum hatası sağlamıştır. Şekil koruması ise kısmen sağlanmıştır. Genel anlamda şekillerde büyük bozulmalar mevcuttur. Bu nitelikleriyle diğer kartogramlara göre orta düzeyde bir coğrafi doğruluğa sahip olmuştur. Bitişik kartogramların diğer kartogram türlerine göre bitişiklik hatası (%24.81) oldukça düşüktür. Temel (asıl) haritada komşu olan iller gerçekte de komşudur bunun tersi de geçerlidir. Komşu iller ve bunlara ait sınır uzunlukları diğer kartogram türlerinden çok daha iyi şekilde korunmuştur. Bu nitelikleriyle diğer kartogram türleri arasında topolojik doğruluğu en yüksek kartogram türü olmuştur. Ancak istatistiksel doğruluğu diğer kartogram türlerinden düşüktür. Kartografik hata oranı en yüksek (%8.8) kartogram türü olmuştur. Bu durum diğer kartogramlara nispeten kartogram alanının istenen alanı yeterince sağlayamadığını göstermektedir. Bitişik kartogram performans analizinde diğer kartogramların gerisinde kalsa da aralarındaki fark oldukça azdır. Bitişik kartogramlar performans analizinde düşük hata oranı (0.5596) sağlamış ve diğer kartogramlar

kadar olmasa da başarılı bir performans ortaya koymuştur. Bu durum kartogramın istenilen değişim miktarını sağlamak için gerçek alan üzerinde iyi derece de etki oluşturduğunu göstermektedir. Bitişik kartogramlarda istatistiksel doğruluğun düşük buna nispeten performans analizinin ise başarılı sayılabilecek bir oranda olması, kartogram algoritmasının, alanı istenen düzeye ulaştırmasa da bunu sağlamak için iyi derecede mesafe kat ettiğini gösterir. Kartogram gerçek alanın boyutunu istenilen alan boyutuna ulaştırmak için iyi derece de değişim sağlamış ancak bu değişime rağmen kartogram istenilen alan boyutunu sağlayamamıştır. Bitişik kartogramlar topolojik doğruluğu sağlamak için büyük ölçüde istatistiksel doğruluk ve coğrafi doğruluktan ödün vermiştir.

#### 4.5.2 Bitişik Olmayan Kartogramların Değerlendirilmesi

Diğer kartogram türlerine göre konum hatası en düşük (34.32 km) kartogram türü olmuştur. Bitişik kartogramlardan farklı olarak topolojiye bağlı kalmadığından alanlar arasında büyük boşluklar vardır. Böylece alanların boyutlanırken bozulmaları engellenmiş ve şekiller korunmuştur. Bu özellikleriyle diğer kartogramlardan daha yüksek bir coğrafi doğruluk sağlamıştır. Ancak alanlar arasında boşlukların olması topolojinin sağlanamamasına neden olmuştur. Temel haritada birbiriyle sınırı bulunan iller arasında boşluklar vardır. Bu nedenle komşu iller ve bunlara ait sınır ilişkileri harita üzerinden okunamamaktır. Bitişik olmayan kartogramlarda topolojik doğruluk sağlanamamıştır. Bitişik olmayan kartogramlarda istatistiksel doğruluk iyi derece de korunmuştur. Dorling kartogramların çok az bir miktar gerisinde kalsa da %0.13 'lük bir kartografik hata oranıyla istatistiksel doğruluk iyi derecede sağlamıştır. Bu anlamda kartogram haritadaki alan istenen alanı iyi derece temsil etmiştir. Performans analizinde ise neredeyse hatasız sayılabilecek bir hata oranı (0.0001) sağlamıştır. Kartogram istenilen değişimi sağlamak için orijinal harita üzerinde oldukça etkili olmuştur ve sağladığı düşük kartografik hata oranıyla oldukça başarılı bir sonuç oluşturmuştur. Bitişik olmayan kartogramlar istatistiksel ve coğrafi doğruluğu sağlamak için topolojiden ödün vermiştir.

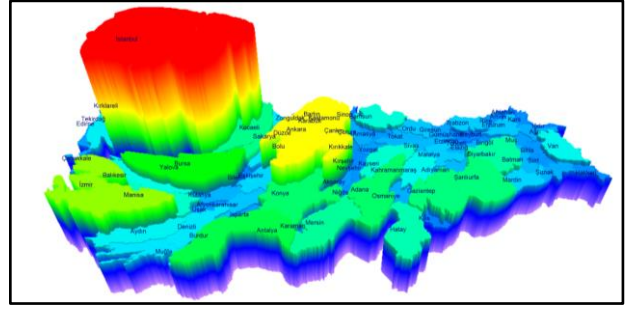
#### 4.5.3 Dorling Kartogramlarının Değerlendirilmesi

Dorling kartogramları yüksek konum hatası (220.49 km) ve şekilleri korumamaları nedeniyle coğrafi doğruluğun en düşük olduğu kartogram türü olarak tespit edilmiştir. Dairelerin sadece birbirlerine temas eden noktalarıyla bitişiklik sağlanmaya çalışıldığından sınır iller arasında oldukça fazla bitişiklik hataları vardır. Birimlerin gerçekte sahip olduğu komşular kartogramdakiyle büyük ölçüde farklıdır. Temel (asıl) harita da sınır olan birimler kartogram haritada sınır olmamakta veya bunun tersi gerçekleşmektedir. Topoloji %92.77 gibi yüksek bir bitişiklik hatası oranıyla korunamamıştır. Buna karşın dorling kartogramları istatistiksel doğruluğun en iyi derecede sağlandığı kartogram türüdür. %0.02 gibi düşük bir kartografik hata oranıyla kartogramla oluşturulan alan ile neredeyse istenen alan miktarı sağlanmıştır. Daireler veriye göre sağladıkları boyut açısından birbirleriyle oldukça uyum içerisindedir. Veriyi en iyi şekilde temsil eden kartogram türü olmuştur. Performans analizinde ise neredeyse hatasız sayılabilecek bir hata oranı (0.000096) sağlamıştır. Kartogram istenilen değişimi sağlamak için orijinal harita üzerinde oldukça etkili olmuştur ve sağladığı düşük kartografik hata oranıyla oldukça başarılı bir sonuç oluşturmuştur. Dorling kartogramları istatistiksel doğruluğu sağlamak için coğrafi doğruluktan ve topolojiden ödün vermiştir.

#### 4.5.4 Üç Boyutlu (3B) Kartogramların Değerlendirilmesi

Diğer kartogramlar boyutlandırmayı yatay düzlem üzerinde gerçekleştirirken üç boyutlu kartogramlar boyutlandırmayı dikey düzlem üzerinde sağlaması nedeniyle diğer kartogram türlerinden ayrılmaktadır. 3B kartogramlar alanları oldukları konumda sabit tutarak ilgili birimin sahip olduğu veri büyüklüğüne göre alana yükseklik kazandırır. Bundan dolayı 3B kartogramlarda alanların coğrafi konumu, bitişiklik ilişkileri ve şekli değişmemektedir. 3B kartogramlarda coğrafi doğruluk ve topolojik doğruluk sağlanmaktadır. Alanlar yatay düzlem üzerinde boyutlandırma sağlayan kartogram türleri ile boyutlandırıldıktan sonra bu haritanın 3B kartogramı oluşturulabilir. Bu şekilde alanların hem yatay hem de dikey düzlem üzerinde

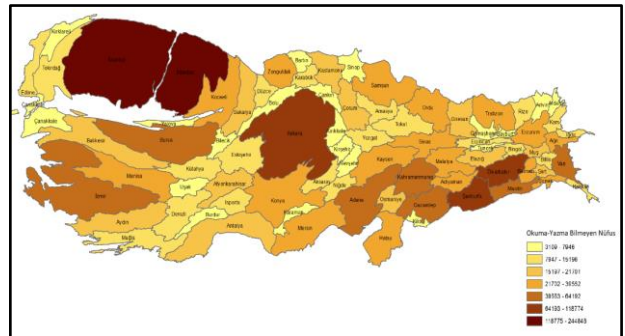
boyutlandırılmasıyla veriler için daha etkili bir görselleştirme sağlanabilir (Şekil 9).



Şekil 9. Türkiye bitişik nüfus kartogramının 3B kartogram ile görselleştirilmesi

#### 4.5.5 Kartogramlarda İki Değişkenli Veri Gösteriminin Değerlendirilmesi

Bir temel harita üzerinde verinin gösterilmesi için kartogram harita oluşturulduktan sonra bu harita da temel harita olarak kullanılabilir. Bir başka ifadeyle kartogram harita üzerinde farklı değişkenler gösterilebilir. Bu şekilde tek bir harita üzerinde birden fazla değişkenin gösterilmesi sağlanarak aynı görsel üzerinde değişkenler arasındaki ilişkinin ve farklılıkların daha kolay anlaşılması sağlanabilir. Örneğin aşağıdaki haritada (Şekil 10) 65 yaş üstü nüfus, kartogram harita ile boyutlandırılmış ardından bu harita temel harita olarak kullanılarak okuma yazma bilmeyen nüfusa göre renklendirilmiştir. Böylece aynı harita üzerinde hem 65 yaş üstü nüfusun hem de okuma yazma bilmeyen nüfusun gösterilmesi sağlanmıştır.



Şekil 10. Kartogramlarda iki değişkenli veri gösterimi

### 5. Tartışma ve Sonuç

Geleneksel haritalarda veriler görselleştirilirken alanlar yüzölçümü büyüklüğüne göre boyutlandırılmaktadır. Yüzölçümü büyüklüğünün mekânsal verinin dağılımına bakılmaksızın alınması

harita kullanıcılarına aktarılacak istenen mesajın etkili iletilmemesine veya kullanıcının haritayı yanlış yorumlayabilmesine neden olabilmektedir. Kartogram haritalarda ise alanlar kendilerine karşılık gelen veri büyüklüğüyle orantılı olarak ölçeklendirilmektedir. Böylece haritalar, kullanıcılarına aktarılacak istenen bilgi doğrultusunda boyutlandırılarak harita okuyucusunun ilk bakışta harita üzerindeki veri dağılımlarını kolayca algılayabilmesi sağlanmaktadır.

Kartogram haritalar, nüfus ve nüfusa ilişkin verilerin görselleştirilmesinde oldukça etkilidir. Nitekim performans ölçütüne göre analiz edilen kartogram türlerinin tamamı başarılı bir performans göstermiştir. Kartogram, gerçek alanın boyutunu veriyle orantılı olarak 'istenilen alan' düzeyine ulaştırmak için oldukça iyi derecede bir değişim sağlamıştır. Performans analizinde dorling kartogramları en başarılı kartogram türü olmuştur. Dorling kartogramlarını sırasıyla bitişik olmayan kartogram ve bitişik kartogram türleri izlemektedir.

Alanların ilgili nüfus verilerine göre boyutlandırılmasında kartogram türünün seçimi önemlidir. Çünkü seçilecek kartogram türüne göre haritalarda çeşitli kriterler üzerinde farklı miktarda bozulmalar meydana gelmektedir. Bu kriterleri ise coğrafi doğruluk, topolojik doğruluk ve istatistiksel doğruluk olmak üzere üç ana tasarım boyutu oluşturmaktadır.

Coğrafi doğruluk ölçütüne göre analiz edilen kartogram türleri arasından bitişik olmayan kartogramlar diğerlerine kıyasla daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Bitişik olmayan kartogramları sırasıyla bitişik kartogram ve dorling kartogramları izlemektedir. Dorling kartogramları en düşük coğrafi doğruluğa sahip kartogram türü olmuştur. Genel olarak kartogram türleri yüksek konum hatasına sahip olmakla beraber bitişik olmayan kartogramlar diğer kartogram türlerine göre daha düşük konum hatası sağlamıştır. Bitişik olmayan kartogramlar haritayı olduğu yerde boyutlandırdıkları için şekiller korunmuştur. Bitişik kartogramlar kısmen şekil korunması sağlarken dorling kartogramlarında şekiller korunmamıştır. Göreceli konum doğruluğu ise tüm kartogram türlerinde sağlanmıştır.

Topolojik doğruluk ölçütüne göre analiz edilen kartogram türleri arasından bitişik kartogram diğer kartogram türlerine göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Bitişik kartogramları sırasıyla dorling kartogram ve bitişik olmayan kartogramlar izlemektedir. Dorling kartogramlarında oldukça yüksek topolojik hatalar mevcuttur. Bitişik olmayan kartogramlarda ise topolojik doğruluk sağlanamamıştır. Bitişik olmayan kartogramların tamamında, dorling kartogramlarının ise büyük bir kısmında temel haritada komşu olan alanlar kartogramda komşu değildir veya bunun tersi de geçerlidir.

İstatistiksel doğruluk ölçütüne göre analiz edilen kartogram türleri arasından dorling kartogram diğer kartogram türlerine göre daha yüksek doğruluk sağlamıştır. Dorling kartogramını sırasıyla bitişik olmayan kartogram ve bitişik kartogram izlemektedir. Özellikle dorling kartogram ve bitişik olmayan kartogramlarda kartografik hata oranları oldukça düşüktür. Bu kartogram türlerinde neredeyse istenen miktarda alanların oluşturulması sağlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki öneriler ve değerlendirmeler yapılabilir.

1. Kartogramlar nüfusa ilişkin verileri oldukça etkili bir şekilde görselleştirme imkânı sunmaktadır. Bu nedenle nüfus ve nüfusa ilişkin verilerin analiz edilmesinde kartogramlar kullanılabilir.
2. Nüfus analizinde kullanılan kartogram türlerinden hiçbiri coğrafi doğruluk, topolojik doğruluk ve istatistiksel doğruluk kriterlerinin tamamını tek başına sağlayamamıştır. Her kartogram türü farklı bir doğruluk ölçütünde başarılı olmuştur. Bu nedenle çalışma amacına ve kartogramdan beklenen performansa göre bu kriterler arasında seçim yapılmalıdır. Coğrafi doğruluğun ön plana çıktığı durumlarda bitişik olmayan kartogram haritalar, topolojik doğruluğun ön plana çıktığı durumlarda bitişik kartogramlar, istatistiksel doğruluğun ön plana çıktığı durumlarda ise dorling kartogramları kullanılabilir.



3. Kartogramlar alanları ilgili veri değişkenine göre bozduklarından alanlar gerçekte olduklarından oldukça farklı olabilmektedir. Bu durum harita okuyucusunun alışık olmadığı bu harita ile temel (asıl) harita arasındaki ilişkiyi kuramamasına ve alanlardaki değişimin ne boyutta gerçekleştiğini algılayamamasına neden olmaktadır. Bu tür bir durumda mevzu edilen olumsuzluğun giderilmesi için kartogram haritalarla birlikte referans harita kullanılabilir ve harita üzerinde yer alan birimler adlarına göre etiketlenilebilir.
4. Nüfus verileri kullanılarak oluşturulan kartogram haritalar da temel harita olarak kullanılabilir. Böylece temel haritanın bir başka değişkene göre renklendirilmesi sağlanarak harita üzerinde farklı değişkenlerin gösterilmesi sağlanabilir. Bununla beraber farklı değişkenlerin tek bir harita üzerinde gösterilmesiyle bu değişkenler arasındaki ilişki veya farklılıklar daha kolay anlaşılabilir.
5. Alanlar veri büyüklüğüne göre yatay düzlem üzerinde boyutlandırma sağlayan diğer kartogram türleri ile ölçeklendirildikten sonra bu harita, üç boyutlu kartogramlar için temel harita olarak kullanılabilir. Böylece alanların hem yatay hem de düşey düzlem üzerinde boyutlandırılmasıyla veriler için daha güçlü bir görselleştirme sağlanabilir.

## 6. Kaynaklar

- Alam, M.J., Kobourov, S. ve Sankar, V., 2015, Quantitative Measures for Cartogram Generation Techniques, *Computer Graphics Forum*, **34**, 351-60.
- Barreto, M.C., Kosminsky, D. ve Esperança, C., 2018, Hexagonal hierarchical cartogram: Towards a thematic map of Brazil, *InfoDesign - Revista Brasileira de Design da Informação*, **15**, 45-62.
- Berg, M., Mumford E. ve Speckmann B., 2006, Optimal BSPs and Rectilinear Cartograms, *Proceedings of the 14th Annual ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, **20**, 19-26.
- Bhatt, M., 2006, Investigating The Appropriateness Of Gastner-Newman's Cartogram Versus Conventional

Maps In Visual Representation And Modeling Of Health Data, Yüksek Lisans Tezi, Coğrafya ve Çevre Kaynakları Bölümü, ABD: Southern Illinois Üniversitesi, 24.

- Boos, G.J., 2013, The usability of 3D techniques for multivariate thematic mapping, Yüksek Lisans Tezi, Hollanda: Wageningen Üniversitesi, 48.
- Dent, B.D., Torguson, J.S. ve Hodler, T.W., 2009, Cartography: thematic map design, 6, New York: McGraw-Hill Higher Education, 1-187.
- Dorling, D., 1995, The Visualization of Local Urban Change across Britain, *Environment and Planning B: Planning and Design*, **22**, 269-290.
- Getis, A., Bjelland M.D. ve Getis, V., 2018, Introduction to geography, 15, New York: McGraw-Hill Education, 30-33.
- Henriques, R., 2005, Carto-SOM: Cartogram Creation Using Self-organizing Maps, Yüksek Lisans Tezi, Portekiz: Lizbon Yeni Üniversitesi, 144.
- Heilmann, R., Keim, D.A., Panse, C. ve Sips, M., 2004, RecMap: Rectangular Map Approximations, *IEEE Symposium on Information Visualization*, 33-40.
- Hennig, B.D., 2013, Rediscovering the World: Map Transformations of Human and Physical Space, Doktora Tezi, Sheffield Üniversitesi, 266.
- Hennig, B.D, 2017, Mapping geographical worlds using cartograms, The bulletin of the Society of University Cartographers, *Society of University Cartographers* **50**, 13-20.
- Henning, B.D, 2019, Remapping Geography: Using Cartograms to Change Our View of the World, *Geography*, Sheffield, England, **104**, 71-80.
- Henriques, R., 2010, Artificial Intelligence in Geospatial Analysis: applications of Self Organizing Maps in the context of Geographic Information Science, Doktora Tezi, Lizbon-Portekiz, 181.
- Hong, S., Kocielnik, R., Yoo, M.J., Battersby S., Kim, J. ve Aragon, C., 2017, Designing interactive distance cartograms to support urban travelers, *IEEE Pacific Visualization Symposium*, **17**, 81-90.

- Indrayan, A. ve Malhotra, R., 2018, Medical biostatistics, 4, CRC Press-Taylor & Francis Group, 153-156.
- Inoue, R., 2011, A New Construction Method for Circle Cartograms, *Cartography and Geographic Information Science* **38**, 146-52.
- Kalafatçılar, M.K., 2019, Demografik gelişmeler ve makroekonomik etkileri, Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası İdare Merkezi, Yapısal Ekonomik Araştırmalar Genel Müdürlüğü, 5-17.
- Kaya, M.H., 2021. Kartogram Haritaların Nüfus Analizinde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Afyonkarahisar, 177.
- Kirk, A., Timms, S., Rininsland, A. ve Teller, S., 2016, Data Visualization: Representing Information on Modern Web, 1, Packt Publishing, 199-202.
- Kraak, M.J., Köbber B. ve Tong Y., 2014, Integrated Time and Distance Line Cartogram: a Schematic Approach to Understand the Narrative of Movements, *Cartographic Perspectives*, **77**, 7-16.
- Kreveld, M.V. ve Speckmann, B., 2007, On Rectangular Cartograms, *Computational Geometry*, **37**, 175-87.
- Markowska, A. ve Skorupa J.K., 2015, An evaluation of GIS tools for generating area cartograms, *Polish Cartographical Review*, **47**, 19-29.
- McHaffie, P., Hwang, S. ve Follett, C., 2019, GIS: An Introduction to Mapping Technologies, 1, ABD: CRC Press-Taylor & Francis Group, 40-280.
- Nickel, S., Sondag M., Meulemans W., Chimani M., Kobourov S., Peltonen J. ve Nöllenburg M., 2019, Computing Stable Demers Cartograms, *Graph Drawing and Network Visualization*, 46-60.
- Nusrat, S. ve Kobourov, S., 2016, The State of the Art in Cartograms, *Computer Graphics Forum*, **35**, 619-42.
- Nusrat, S., Alam, M.J. ve Kobourov, S., 2016, Evaluating Cartogram Effectiveness, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, **24**, 1077-90.
- Olson, J.M., 1976, Noncontiguous Area Cartograms, *The Professional Geographer*, **28**, 371-80.
- Ren, L. ve Zhao, Z., 2016, Demographic Data Visualization on Continuous Area Cartograms, *International Conference on Computer Engineering*, 190-193.
- Reveiu, A. ve Dardala, M., 2011, Techniques for Statistical Data Visualization in GIS, *Informatica Economica* **15**, 72-79.
- Sagar, B.S.D, 2014, Cartograms via mathematical morphology, *Sage*, **13**, 42-58.
- Shimizu, E. ve Inoue, R., 2009, A New Algorithm for Distance Cartogram Construction, *International Journal of Geographical Information Science*, **23**, 1453-70.
- Slocum, T.A., McMaster R.B., Kessler, FC. ve Howard, H.H., 2005, Thematic cartography and geographic visualization, 2, ABD: Pearson/Prentice Hall, 361-373.
- Sun, H. ve Li, Z., 2010, Effectiveness of Cartogram for the Representation of Spatial Data, *The Cartographic Journal*, **47**, 12-21.
- Şahin, B. ve Şahin, S., 2019, Coğrafyada Alternatif Bir Tematik Haritalama Tekniği, *Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi*, **23**, 477-500.
- Tang, W., 2013, Parallel Construction of Large Circular Cartograms Using Graphics Processing, *International Journal of Geographical Information Science*, **27**, 2182-2206.
- Tobler, W., 2017, Cartograms as Map Projections, Choosing a Map Projection, *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 149-159.
- Tyner, J.A, 2010, Principles of map design, New York: Guilford Press, 194-198.
- Yalçın, M., 2020, Mapping the global spatio-temporal dynamics of COVID-19 outbreak using cartograms during the first 150 days of the pandemic, *Geocarto International*, 1-10.

#### İnternet Kaynakları

1-<https://www.fikir.gen.tr>, (13.07.2021)

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055502 (1125-1136)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055502 (1125-1136)

DOI: 10.35414/akufemubid.936431

Araştırma Makalesi / Research Article

## Google Earth Pro Verilerinden Oluşturulan Sayısal Yükseklik Modelleri ve Global Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Değerlendirmesi

Adalet DERViŞOĞLU<sup>1\*</sup>, Şaziye Özge ATİK<sup>2</sup>, Ramazan Alper KUÇAK<sup>1</sup>, Mahmut Oğuz SELBESOĞLU<sup>1</sup><sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul.*<sup>2</sup>*Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli.*Sorumlu Yazar, e-posta: [adervisoglu@itu.edu.tr](mailto:adervisoglu@itu.edu.tr)ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7455-4282>e-posta: [soatik@gtu.edu.tr](mailto:soatik@gtu.edu.tr)ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2876-040X>e-posta: [kucak15@itu.edu.tr](mailto:kucak15@itu.edu.tr)ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1128-1552>e-posta: [selbesoglu@itu.edu.tr](mailto:selbesoglu@itu.edu.tr)ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1132-3978>

Geliş Tarihi: 11.05.2021

Kabul Tarihi: 07.10.2021

### Öz

Farklı ölçme ve uzaktan algılama teknikleri ile elde edilen verilerden üretilen Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) verileri yükseklik bilgisi gerektiren birçok uygulamada kullanılmaktadır. LIDAR (Light Detection and Ranging) teknolojisinin son dönemlerde gelişmesi ile araziye ait nokta bulutu verisi üretimi için havadan LIDAR tekniği, uygun arazi koşullarının sağlanması halinde cm doğruluğunda SYM'nin üretilebileceği sistemler haline gelmiştir. Çalışmada, elipsoidal yükseklik verisine sahip havadan LIDAR yöntemiyle elde edilmiş nokta bulutu referans veri olarak kullanılarak beş farklı enterpolasyon yöntemi ile SYM'ler oluşturulmuş, Google Earth Pro(GEP)'dan iki farklı yoğunlukta elde edilmiş yükseklik verileri kullanılarak oluşturulan SYM'ler ile karşılaştırılmıştır. Yine LIDAR ile elde edilen SYM'leri, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ve ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) global SYM'leri ile karşılaştırılmıştır. GEP'dan elde edilen SYM'lerinin diğer iki SYM'ine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. GEP ile üretilen SYM ile 3,44 m doğruluk elde ederken, SRTM ve ASTER GDEM verilerinin doğruluğu sırasıyla 4,05 m ve 5,88 m'dir.

### Anahtar kelimeler

Google Earth Pro; SYM; SRTM; ASTER; Kriging

## Accuracy Assessment of Global Digital Elevation Models and Generated Digital Elevation Models from Google Earth Pro Data

### Abstract

Digital Elevation Models (DEM) obtained by different sources are used in many applications that require height information. With the recent development of LIDAR (Light Detection and Ranging) technology, the aerial LIDAR technique is commonly used to collect point cloud data for producing DEM in cm accuracy. In the study, DEMs were created with five different interpolation methods using the point clouds. Firstly, DEM was produced with point groups of two different densities selected from Google Earth Pro. Point clouds obtained from airborne LIDAR were used as reference data. Thus, the effect of different point densities and interpolation methods on DEM production with Google Earth Pro was examined. Additionally, DEMs obtained with LIDAR were compared with SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) and ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) DEMs. DEMs obtained from Google Earth PRO give better results than the other two DEMs. DEMs produced with GEP achieve an accuracy of 3.44 m, while the accuracy of SRTM and ASTER GDEM data is 4.05 m and 5.88 m, respectively.

### Keywords

Google Earth Pro; DEM; SRTM; ASTER; Kriging

## 1. Giriş

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM); fiziksel yeryüzünün, konum ve tanımlı bir düşey datuma dayandırılmış yükseklik bilgilerini de içinde barındıran 3 boyutlu sayısal grafik gösterimidir. Sayısal Yükseklik Modeli; ABD Jeolojik Ölçmeler Dairesi (USGS) tarafından; "arazinin yükseklik bilgisinin, kullanılan ortak bir düşey datumda, X ve Y yönündeki düzenli aralıklarla sayısal gösterimi" olarak tanımlanmıştır.

SYM kullanılarak arazinin eğimi, eğim yönü, arazinin bakışı, drenaj ağları, havza sınırları, akış yolları ve görüş alanı içindeki noktaların belirlenmesi yapılabilir, stereo görüntü çiftleri üretilebilir SYM mühendislik, jeomorfoloji, hidroloji, peyzaj mimarisi ve arkeoloji dahil olmak üzere coğrafi bir temeli kullanan çok sayıda disiplin tarafından kullanılmaktadır. SYM üretimi için arazi yüzeyinde uygun biçimde dağılmış, konum (X, Y) ve yüksekliği (H) bilinen noktalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktaların ve SYM'nin oluşturulmasında kullanım amacı ve beklenen mekansal doğruluğa bağlı olarak birçok yöntem ve teknoloji kullanılmaktadır. SYM oluşturmak için toplanan verinin kalitesi uygulanan teknolojiye bağlı olup, veriler yersel ve uydulara dayalı ölçme teknikleri (total station, takeometre, GNSS, yersel lazer tarayıcılar vb.), hava fotogrametrisi, LIDAR, radar altimetresi ve interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR) ölçmeleri ile elde edilebilir.

Günümüzde sağladıkları yüksek doğruluk nedeniyle yerel ölçekli uygulamalarda sayısal fotogrametri ve LIDAR (Light Detection and Ranging) ile üretilen SYM'leri tercih edilmekte, Global ölçekli SYM üretiminde uydu bazlı stereo optik ya da radar görüntüleri veya SAR (sentetik açıklıklı radar) interferometri yöntemi tercih edilmektedir.

Yeryüzü kara parçalarının büyük bölümlerini kapsayan global sayısal yükseklik modelleri, uzaktan algılama yöntemleri ya da topografik haritaların sayısallaştırılması ile üretilmekte, ücretli ya da ücretsiz olarak sunulmaktadır. Bu modellerin yersel ve havadan ölçme yöntemleri ile elde edilen modellere tercih edilmelerinin başlıca nedenleri, son yıllarda anlamlı şekilde iyileşen veri doğrulukları, birçok çalışma için yeterli çözünürlükte ve geniş

alanlarda geçerli olmaları ve kullanıcılara ücretsiz olarak servis edilmeleri gelmektedir. Erişimi zor bölgelere (çöller, kutup bölgeleri, sık ormanlık alanlar, geniş bataklık alanlar vb. gibi) ilişkin veri sağlamaları da tercih edilmelerinin önemli bir sebebidir (Erol vd.2020).

Ücretsiz olarak veri sağlayan global yükseklik modellerinden biri olan Shuttle Radar Topography Mission-Mekik Radar Topografya Misiyonu (SRTM), NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından gerçekleştirilen bir proje olup, hem C-bandı hem de X-bandı frekanslarında çalışan tek geçişli uzay kaynaklı interferometrik Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemi kullanarak 2000 yılında 11 gün sürede, Dünya yüzeyinin % 80'ini temsil eden, 60° K ve 56° G arasındaki kara kütlelerinin yükseklik verilerini toplamıştır. İyileştirme çalışmalarından sonra SRTM SYM üç değişik versiyonda dağıtılmaktadır. Çözünürlüğü, 1", 3", 30"; veri türü RADAR; 2B Datumu WGS84; düşey datumu EGM96'dir (Int Kyn. 1)

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Gelişmiş Uzay Kaynaklı Termal Emisyon ve Yansıma Radyometresi), ilk versiyonu ile Haziran 2009'da veri sağlamaya başlamış olup, Terra üzerindeki ASTER ekipmanı tarafından toplanan stereo çift görüntüler kullanılarak oluşturulmuştur. 83° K enleminden 83°G enlemine kadar uzanır ve Dünya'nın kara kütlelerinin yüzde 99'unu kapsar. ASTER GDEM(Global Digital Elevation Model), GeoTIFF formatında 1°x1°'lik paftalar halinde 30 m grid aralıklı olarak kullanıcılara ücretsiz veri sağlamaktadır (Int Kyn. 2). ASTER GDEM'in çözünürlüğü 1" ve 3", veri türü Stereo görüntü; 2B Datumu WGS84; düşey datumu EGM96'dir.

Ücretsiz olması nedeniyle en çok tercih edilen SYM'leri olan SRTM ve ASTER GDEM'in yükseklik verisi doğruluklarının belirlenmesi amacıyla yapılmış çok sayıda çalışma bulunmakta olup, doğruluk analizinde farklı istatistiksel yaklaşımlar kullanılabilir. Çalışmalarda en çok kullanılan yöntem, modelden elde edilen yükseklik bilgisi verilerinin daha yüksek doğruluğa sahip yersel ve uydu bazlı

konumlama tekniklerinden elde edilen yükseklikler ile verileri ile karşılaştırılması şeklindedir.

Global SYM'lerin Türkiye'yi kapsayan veri setleri üzerinde yapılan ilk çalışmalardan biri Bildirici vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen projedir. O dönemde ücretsiz kullanım olanağı bulunan tek global SYM, SRTM olup, veri seti yerel yükseklikler ile karşılaştırılmış, 10 m civarında doğruluğa sahip olduğu bildirilmiştir.

Luana vd. (2015) Çin de yapmış oldukları çalışmada ASTER ve SRTM yükseklik modellerinin doğruluk analizlerini referans verisi olarak 1:50 000 ölçekli haritaların sayısallaştırılması sonucu elde edilen SYM kullanarak gerçekleştirmişlerdir. SRTM doğruluğu  $\pm 13.74$  m, ASTER 1. Versiyon  $\pm 42.11$  m, ASTER 2. Versiyon ise  $\pm 12.12$  m olarak bulunmuştur.

Varga ve Bašić (2015) Hırvatistan'da yaptıkları çalışmada farklı SYM'lerinin yükseklik verilerinin doğruluk analizlerini yapmışlardır. Karesel ortalama hatalar (KOH) SRTM30 +: 21,3 m, SRTM GDEM: 3,8 m ve ASTER GDEM: 7,1 m olarak bulunmuştur. En yüksek doğruluk, daha önce yayınlanan sürümlerden çok daha iyi olan SRTM GDEM sürüm 3 ile elde edilmiştir. Tüm modellerin engebeli ve ormanlık alanlarda daha kötü olduğu, düz ve çıplak arazilerde yeni nesil küresel DEM'ler SRTM GDEM ve ASTER GDEM'in son derece doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Elkhrachy (2018) Suudi Arabistan Najran'da yaptığı çalışmada SRTM sürüm 3 ve ASTER sürüm 2 ile elde edilen SYM'lerinin doğruluğunu GPS ölçmeleri ve topografik haritadan elde edilen SYM ile karşılaştırmıştır. GPS referans verileri ile elde edilen doğruluk, SRTM ve ASTER DEM'leri için  $\pm 6.87$  m ve  $\pm 7.97$  m olarak bulunmuştur. Topografik haritadan yüksekliği referans olarak kullanarak elde edilen doğruluk ise, SRTM ve ASTER DEM'leri için  $\pm 6.87$  m ve  $\pm 7.97$  m'dir.

Bildirici ve Abbak (2020), SRTM (1" çözünürlüklü) veri setini yerel SYM ve DGNS izleri ile karşılaştırmışlardır. SRTM'in doğruluğu  $\pm 7-9$  m olarak bulunmuştur. Buna göre Türkiye ve yakın çevresinde SRTM doğruluğunun, global doğruluğuna göre daha iyi bir performansla sahip olduğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları bir proje ile inceledikleri

ASTER GDEM verilerinin doğruluğunun ise  $\pm 7-12$  m arasında olduğunu bildirmişlerdir.

Erol vd. (2020) yaptıkları çalışmada ile, yüksek çözünürlüklü global SYM'ler olan ASTER GDEM, SRTM ile bölgesel Harita Genel Müdürlüğü DTED2 modellerinin doğruluklarını GNSS / nivelman verileri kullanılarak analiz etmişlerdir. Farklı topografik özellikteki alanları temsil eden üç ayrı GNSS/nivelman veri seti kullanılarak kontrol noktalarının dağılımının yanı sıra test alanı topografyasının SYM doğruluğuna etkisi incelenmiştir. Testler sonucu global SYM'lerinin doğruluğu  $\sim 8.0$  m iken bölgesel DTED2 SYM doğruluğu  $\sim 6.0$  m olarak bulunmuştur.

Google Earth (GE), uydu fotoğraflarından ilk kez 2004 yılında oluşturulan ve sürekli güncellenen, coğrafi verilerin analizi için oluşturulmuş bir bilgisayar yazılımıdır. Temmuz 2005'te sadece Amerika Birleşik Devletleri'nin tamamına yakınının görece yüksek çözünürlükte uydu fotoğraflarının yer aldığı yazılımda, Haziran 2006'dan itibaren dünyadaki şehirlerin büyük bir bölümünün ayrıntılı uydu görüntüleri bulunmaktadır. Günümüzde neredeyse tüm dünyayı kapsayan yüksek çözünürlüklü görüntülere ulaşılabilmektedir.

Google Earth Pro (GEP), GE'nin güçlendirilmiş donanımlı hali olup 2015 te ücretsiz kullanıma açılmıştır. GEP, GE ile aynı görüntüleri kullanmakta ancak kullanıcılar için tasarlanmış ek araçlar sunmaktadır. GEP, aynı anda birden çok noktanın haritalanmasına ve demografik, grafik veri katmanlarına erişilmesine olanak tanır. Google Earth Pro ile görüntü üzerinde gelişmiş ölçümler yapılabilir, yüksek çözünürlükte çıktılar alınabilir, E-tablolar, coğrafi bilgi sistemi dosyaları (ESRI shapefile (.shp) ve MapInfo (.tab) ) formatlarıyla programa aktarılabilir, yüksek çözünürlükte sanal uçuş videoları oluşturulabilir.

GE ve GEP programları haritacılık, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), çevre ve şehircilik, tapu kadastro, ulaştırma, ormancılık, tarım vb. birçok uygulama alanında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Uydu teknolojilerindeki ilerlemeye paralel olarak kullanılan yüksek çözünürlüklü görüntülerinde

koordinat doğruluğu, ileri seviyelere ulaşmıştır. Özellikle 2008 yılından sonra GE/GEP programına yüklenen görüntülerin konumsal doğruluğunun yüksek olduğu bilinse de yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda çalışma yapılacak bölgede doğruluk analizinin yapılması birçok araştırmacı tarafından ifade edilmektedir.

GE/GEP programlarının ücretsiz olması ve erişim kolaylığı, akademik ve günlük amaçlara yönelik kullanımını artırmakta ve diğer Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımları ile birlikte coğrafi bilginin erişilebilirliğine, otomasyonuna ve dijital olarak üretilmesine katkı sağlamaktadır (Atak, 2019).

Yine GE ve GEP da kullanılan Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ile ilgili ayrıntılı bilgiler güvenlik ve gizlilik politikaları nedeniyle yayınlanmadığından, birçok araştırmacı farklı uygulamalarda GE programı kullanımı nedeniyle oluşabilecek belirsizlikleri azaltmak ve bunları anlamak için doğruluk ve hassasiyet gerektiren çalışmalara yönelik kullanım öncesinde doğruluk analizinin yapılması gerektiğini ifade etmektedir (Potere, 2008) (Yu ve Gong, 2012).

Isioye ve Jobin (2012) yaptıkları çalışmada, üç farklı SYM'yi; SRTM 30, Sayısallaştırılmış Topografik harita ve GEP'i karşılaştırmışlardır. Sayısallaştırılmış topografik haritadan elde edilen SYM iyi bir sonuç verirken, GEP'in SRTM 30 verilerinden çok daha iyi performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

El-Ashmawy (2016) Mısır da 3 farklı bölgede 200 er noktanın yüksekliklerini nivelman ile belirlemiş GE den elde ettiği yükseklikler ile karşılaştırmıştır. Yükseklik doğrulukları 3 bölge için, Maksimum Mutlak Hata (MAE) 3.72m, 6.39m, 8.78m; Ortalama Hata (OH) 0.51m, 1.13m, 1.52 m; ve KOH 1.85m, 3.57m 5.6m olarak belirlenmiştir. KOH'un düşük olduğu bölge yükseklik farkının az olduğu (5m) bölge olup, KOH'un en yüksek olduğu bölge yükseklik farkının çok olduğu (25m) bölgedir. GE kullanıcılarının, kullanmadan önce yükseklik verilerinin doğruluğunu referans verilerle karşılaştırarak test etmeleri gerektiği sonucuna varmışlardır.

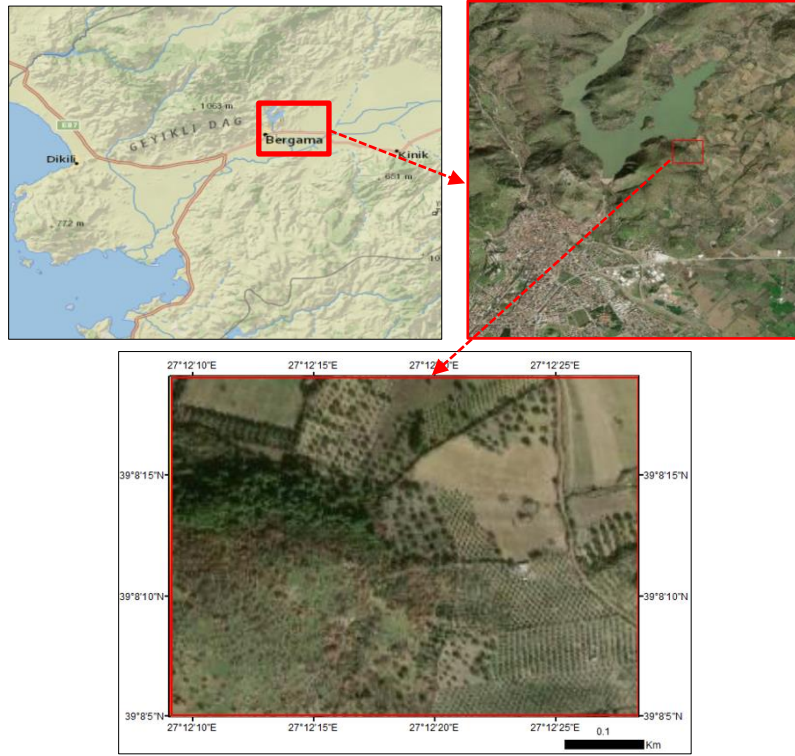
Wang vd. (2017) ABD de farklı 6 eyalet verileri ile yaptıkları çalışmada GE yükseklik verilerini, ABD Jeolojik Araştırma Ulusal Yükseklik Veri Kümesinden

(USGS NED) alınan yükseklik tarama verileriyle karşılaştırmışlardır. GE'den elde edilen yükseklik verilerinin doğruluğunun, ortalama mutlak hatanın (OMH)ME 1.32m Standart sapmasının 2.7 m KOH'un 2.27m bulunduğu bildirilmiştir.

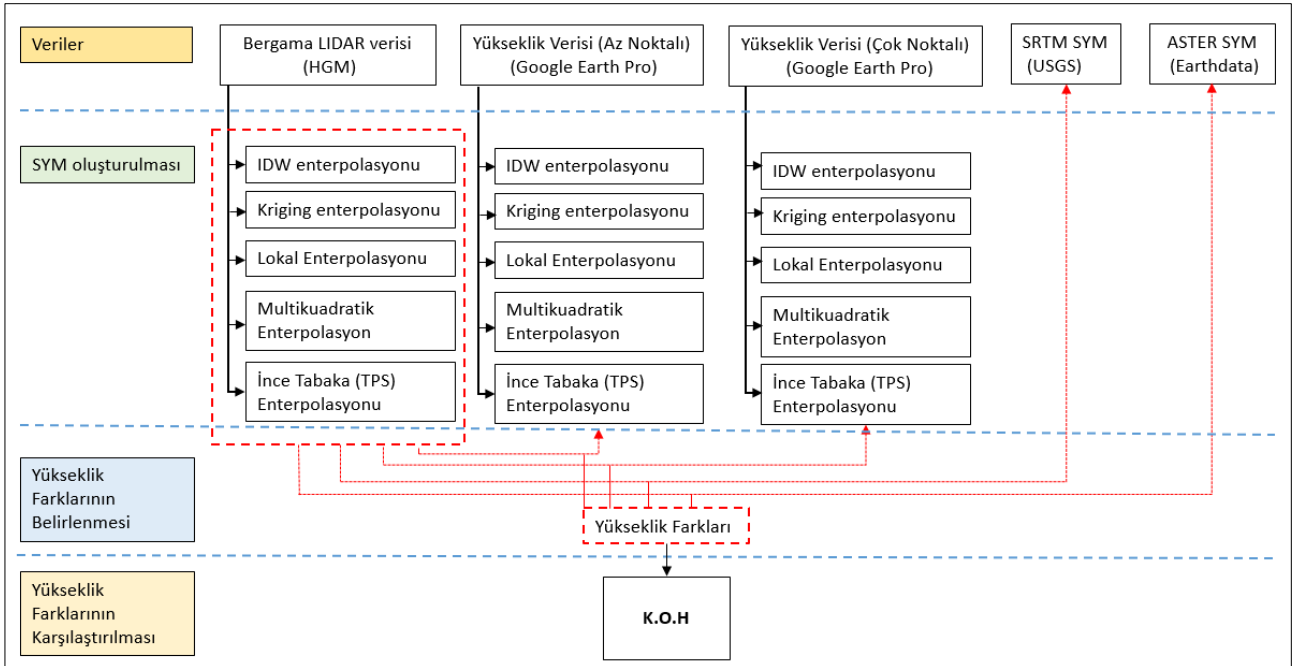
Atak (2019) GE görüntülerinin konumsal doğruluğunun, görüntülerin çözünürlüğüne ve çekim tarihine bağlı olarak değiştiğini, farklı bölgelerde / alanlarda değişken bir yapı sergilediği ancak rölatif olarak yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu belirtmiştir.

Hu vd. (2020) yaptıkları çalışmada Poyang gölü bölgesinde GE ten elde ettikleri yükseklik verileri ile 1:10000 ölçekli topografik haritalardan üretilen yükseklik verilerini karşılaştırmışlardır. 15086 örnek grid noktası kullanmış, örnek noktalar rastgele üç gruba ayrılmış ve her örnek noktanın DEM yüksekliği ve GE yüksekliği mutlak hata değerleri hesaplanmıştır. Üç grupta DEM yüksekliği ile GE yüksekliği arasındaki ortalama mutlak hata sırasıyla 1.47 m, 1.48 m ve 1.46 olarak belirlenmiş ve üç grupta standart sapma 1.10-1.12 m arasında değişmiştir.

Bu çalışmada İzmir Bergama'da seçilen bir bölgede (Şekil 1), LIDAR yükseklik verileri kullanılarak beş farklı enterpolasyon yöntemi ile SYM'leri oluşturulmuş, bu SYM'leri referans veri olarak kullanılmış, GEP yükseklik verileri kullanılarak (beş farklı enterpolasyon yöntemi ve iki farklı yoğunlukta) oluşturulan SYM'leri ile karşılaştırılmış, doğruluk analizleri yapılmıştır. Yine LIDAR yükseklik verileri ile oluşturulan SYM'leri, SRTM (1" çözünürlüklü) ve ASTER SYM'leri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Çalışma Bölgesi.



Şekil 2. Akış Diyagramı.

## 2. Materyal ve Metot

LIDAR (Light Detection and Ranging), havadan veya karadan sistemler ile kısa sürede büyük miktarlarda 3B verinin toplanmasını sağlayan bir ölçme tekniğidir. LIDAR sistemleri, 3B koordinat sisteminde yoğunluk değerleri (lazerin yüzeyden yansıma

enerjisi = intensity) ve ayrıca genellikle sistemin dahili veya harici dijital kameraları tarafından sağlanan RGB değerleri ile 3B bir nokta bulutu oluşturur. (Kuçak vd.,2016 ; Kuçak vd., 2017, Kuçak vd., 2020).

Çalışmada kullanılan LIDAR verileri Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilen elipsoidal yükseklik



verilerine sahip İzmir ili Bergama bölgesi hava LIDAR verileridir. 1200 m yükseklikten Optech Pegasus HA-500 LIDAR sistemi ile m<sup>2</sup>'de yaklaşık 8 nokta ile taraması yapılmış Bergama bölgesinden seçilen 450x430m'lik bir alanda noktasal verilerden beş farklı enterpolasyon yöntemi ile SYM'leri oluşturulmuştur. LIDAR verileri referans veri olarak kullanılacağından elipsoidal yükseklikten ortometrik yüksekliğe dönüşüm yapılmıştır. Yine GEP dan elde edilen ortometrik yükseklikler ve farklı enterpolasyon yöntemleri ile elde edilen SYM 'leri karşılaştırılmıştır.

### 2.1 LIDAR verileri ve Elipsoidal yükseklikten ortometrik yüksekliğe dönüşüm

LIDAR elipsoidal yükseklik verilerini ortometrik yüksekliğe dönüştürmek için aynı bölgeye ait enlem ve boylam bilgisinden yararlanılarak ICGEM (International Centre for Global Earth Models) servislerinden (Int Kyn. 3), EGM 2008 (Pavlis 2012) geoid modellerinden faydalanılarak, Bergama bölgesindeki enlem ve boylam bilgileri verilen bölge için geoid ondülasyonu (N) 38.79 m olarak hesaplanmıştır. Çalışma bölgesi küçük bir alanı kapsadığından hesaplanan geoid ondülasyonu (N) değeri, bütün bölge için kullanılmıştır.

### 2.2 Enterpolasyon Yöntemleri

#### 2.2.1 Lokal Polinom Enterpolasyonu

Lokal Polinom Enterpolasyonu yöntemi ile arazi yüzeyi bir fonksiyon ile tanımlanabilmektedir (Yanalak 2002). Genel fonksiyon Eşitlik 1'deki gibi ifade edilebilir:

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{\substack{j=k-i \\ i=0}}^k a_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

x,y noktanın düzlem koordinatlarını; a<sub>ij</sub> polinom katsayılarını; n polinom derecesini göstermektedir. Eğer 2. Dereceden bir polinom kullanılırsa Eşitlik aşağıdaki gibi açılabilir:

$$z(x, y) = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de x, y koordinatlar değerleri bilinen bir noktanın z koordinatı hesaplanabilmektedir.

Koordinatları bilinen 6 nokta ile ikinci dereceden bir polinomun sabitleri tek anlamlı şekilde hesaplanabilir. Dayanak noktasının 6'dan fazla olması durumunda dengeleme yapılabilmektedir.

#### 2.2.2 Multiküadratik Enterpolasyon

Multiküadratik Enterpolasyon yönteminde arazi yüzeyi bütün dayanak noktaları kullanılarak ifade edilir. Harmonik seri veya trigonometrik fonksiyonlar yardımıyla dayanak noktalarından trend yüzeyi geçirilir. Bu yüzeyler iki yapraklı dairesel hiperboloid, dairesel paraboloid veya dairesel dik koni olabilir. Multiküadratik yüzey m sayıda aynı türden Q yüzeyinin toplamında oluşur (Yanalak ve Baykal 2003). Eğer bu yüzeyler dik konilerden seçilirse multiküadratik yüzey:

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2]^{1/2} = \Delta z \quad (3)$$

olarak ifade edilir (Eşitlik 3). C<sub>j</sub> her bir Q yüzeyinin işaretini ve yönünü belirleyen katsayılardır. Δz ise artık yükseklik değeri olarak tanımlanır ve dayanak noktasındaki ölçülen yükseklik ile hesaplanan yükseklik arasındaki farktır. C<sub>j</sub> değerlerinin belirlenmesinde dayanak noktalarının bilinen (x, y, Δz) koordinatlarından faydalanılır. Bir multiküadratik yüzey C<sub>j</sub> katsayılarının hesaplanması ile belirlenir. Buna göre (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) noktasının yüksekliği (z<sub>0</sub>) Eşitlik 4 ile hesaplanır.

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2]^{1/2} \quad (4)$$

#### 2.2.3 Ters Mesafe Ağırlık Enterpolasyon Yöntemi

Bu yöntem, enterpolasyon yapılacak noktadan uzaklaştıkça ağırlık kaybeden dayanak noktalarının ağırlıklı ortalamasına göre bir yüzey enterpolasyonu yapar. Standart IDW yönteminde bir P(i) noktasının enterpolasyon noktasının yüksekliği Eşitlik 5'teki gibi hesaplanabilir.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{d_i^2} \right]} \quad (5)$$

z<sub>p</sub> = P noktasının hesaplanan yükseklik değeri  
h<sub>i</sub> = dayanak noktasının yüksekliği  
d<sub>i</sub> = dayanak noktasının P noktasına uzaklığı

$n$  = dayanak noktası sayısı

Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yöntemiyle, uzaktaki dayanak noktasının hesaplamaya olan etkisinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Standart yaklaşımda hesaba katılan dayanak noktası sayısında herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır. Bu durum hem hesap yükünü arttırmakta hem de enterpolasyon noktasının tahmin edilecek yükseklik değerine olumsuz yönde etki edebilmektedir. Uygulamada genellikle enterpolasyon noktasını merkeze alan daire veya dikdörtgen alanlar ile dayanak noktalarının sayısına sınırlama getirilmektedir (Yanalak 2002b).

### 2.2.4 Kriging Enterpolasyonu

Kriging enterpolasyonu, bilinen yakın noktaları kullanarak bilinmeyen noktalardaki değerleri kestiren mekânsal tahmin için jeostatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem, matematiksel jeodezide yarıvariogram yapısal özellikleri kullanılarak doğrusal yansız tahmini optimal şekilde gerçekleştirebilir. Kriging yönteminde, tahmin edilen her bir nokta için varyans değeri hesaplanabilmektedir. Böylece tahmin edilen değerlerin bir güven ölçüsü ortaya konulmuş olur. Bu yaklaşım Kriging enterpolasyonunu diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliktir. Genel formül Eşitlik 6'da gösterilmiştir.

$$N_p = \sum_{i=1}^n P_i N_i \quad (6)$$

$N_p$  = P noktasının hesaplanan yükseklik değeri

$P_i$  = her bir dayanak noktasının ağırlığı

$N_i$  = dayanak noktalarının geoit ondülasyon değeri

$n$  = dayanak noktası sayısına karşılık gelmektedir.

Dayanak noktalarının geoit ondülasyon değerleri bilinmektedir. Ancak ağırlık değerlerinin ( $P_i$ ) hesaplanması gerekmektedir. Kriging enterpolasyonunda bu ağırlık değerleri kestirim

hata ortalaması sıfır ve varyansları minimum olacak şekilde hesaplanır (Yaprak ve Arslan 2008).

### 2.2.5 İnce Tabaka Eğrileri Enterpolasyonu

İnce Tabaka Enterpolasyonu, kontrol noktaları arasında pürüzsüz bir enterpolasyon yüzeyi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda dayanak noktaları kullanılarak enterpolasyon parametreleri hesaplanır. Yöntem matematiksel olarak aşağıdaki bağıntıyla ifade edilir (Eşitlik 7-9).

$$F(u, v) = a_0 + a_1 u + a_2 v + \sum_{i=1}^N f_i r_i^2 \ln r_i^2 \quad (7)$$

$$r_i^2 = [r_i(u, v)^2] = (u - u_i)^2 + (v - v_i)^2 \quad (8)$$

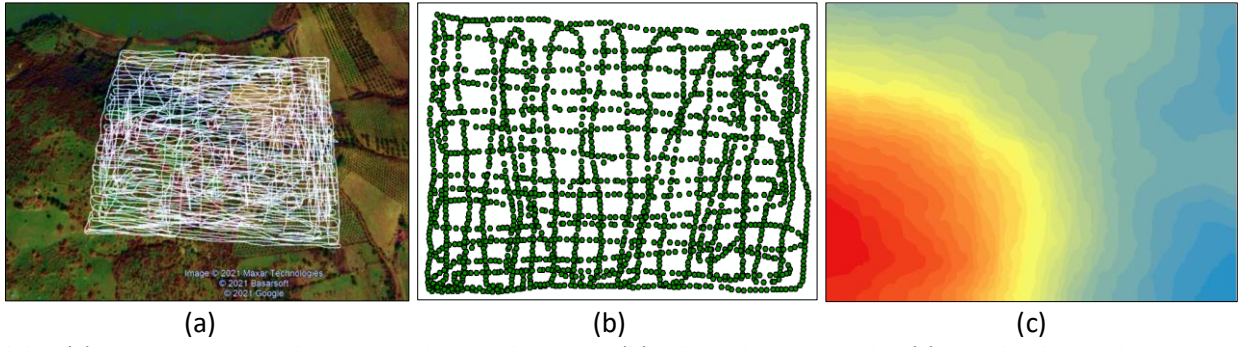
$$\sum_{i=1}^N f_i = \sum_{i=1}^N f_i u_i = \sum_{i=1}^N f_i v_i = 0 \quad (9)$$

Eşitlik 7,  $a_n$  ve  $f_i$  katsayıları çözümü için kullanılır. Bu eşitlikte,  $u$  ve  $v$  katsayıların çözüleceği nokta koordinatlarını ifade eder.  $r$  ise parametrelerin çözüldüğü nokta ile diğer noktalar arasındaki Öklid mesafesidir. Hesaplanan katsayılardan  $f_i$  ile ilgili toplamların sıfır olması gerekmektedir (Atik vd. 2020).

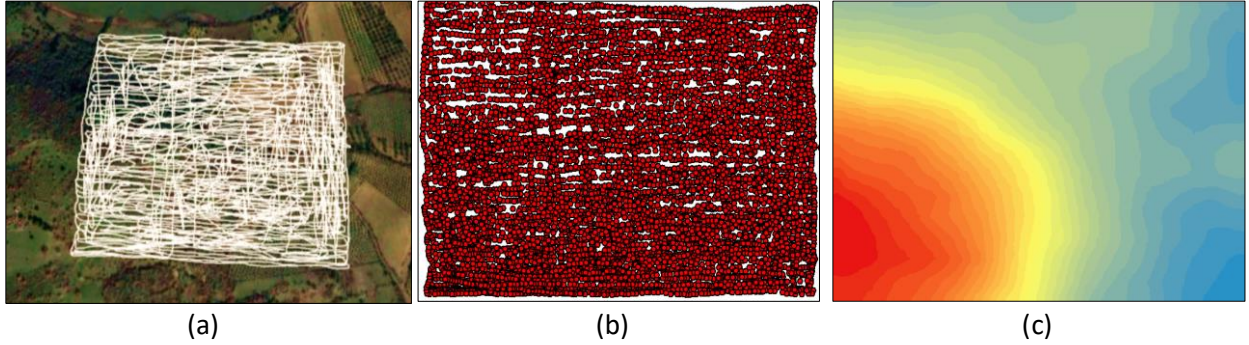
### 2.3 Google Earth Pro üzerinden yükseklik verisi elde edilmesi

Google Earth Pro üzerinden noktaların mümkün olduğunca homojen olarak dağılmasına dikkat edilerek 450 x 430 m'lik alan üzerinde rastgele az noktalı (2048 nokta/m<sup>2</sup> de yaklaşık 0.01 nokta) ve çok noktalı (8402 nokta/m<sup>2</sup> de yaklaşık 0.04 nokta)

olmak üzere 2 farklı nokta kümesi oluşturulmuştur (Şekil 3a, Şekil 4a). GEP üzerinden seçilen noktalar GPX formatına çevrilmiş yükseklik verisine sahip bu noktalar ile (Şekil 3b, Şekil 4b) farklı enterpolasyon yöntemleri ile SYM leri elde edilmiştir. IDW enterpolasyon yöntemi ile elde edilen SYM'leri Şekil 3c ve Şekil 4c' de verilmiştir.



Şekil 3. (a) GEP üzerinde yapılan az noktalı rastgele tarama (b) elde edilen 2048 nokta (c) IDW ile oluşturulan SYM.

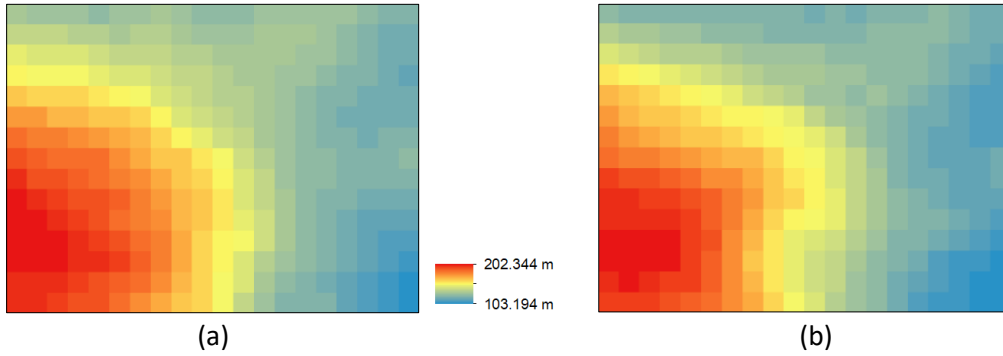


Şekil 4. (a) GEP üzerinde yapılan az noktalı rastgele tarama (b) elde edilen 8402 nokta (c) IDW ile oluşturulan SYM.

## 2.4 SRTM ve ASTER GDEM SYM

İndirilen SRTM (n39\_e027\_1arc\_v3) ve ASTER (ASTGTMV003\_N39E027\_dem) SYM verilerinden

çalışma bölgesi kesilmiş ve elde edilen SYM'leri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. (a) SRTM SYM (b) ASTER SYM.

## 2.5 Üç farklı yükseklik verisi ve beş farklı yöntem ile elde edilen SYM'leri

LIDAR yükseklik verileri ile beş farklı enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulan SYM'leri ile GEP'den elde edilen yükseklik verileri ile yine beş enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulan SYM'leri Şekil 5'te verilmiştir.

## 2.6 Doğruluk Analizleri

Her bir yöntem referans veri ile karşılaştırılarak KOH hesapları yapılmıştır. Doğruluk analizi için arazi

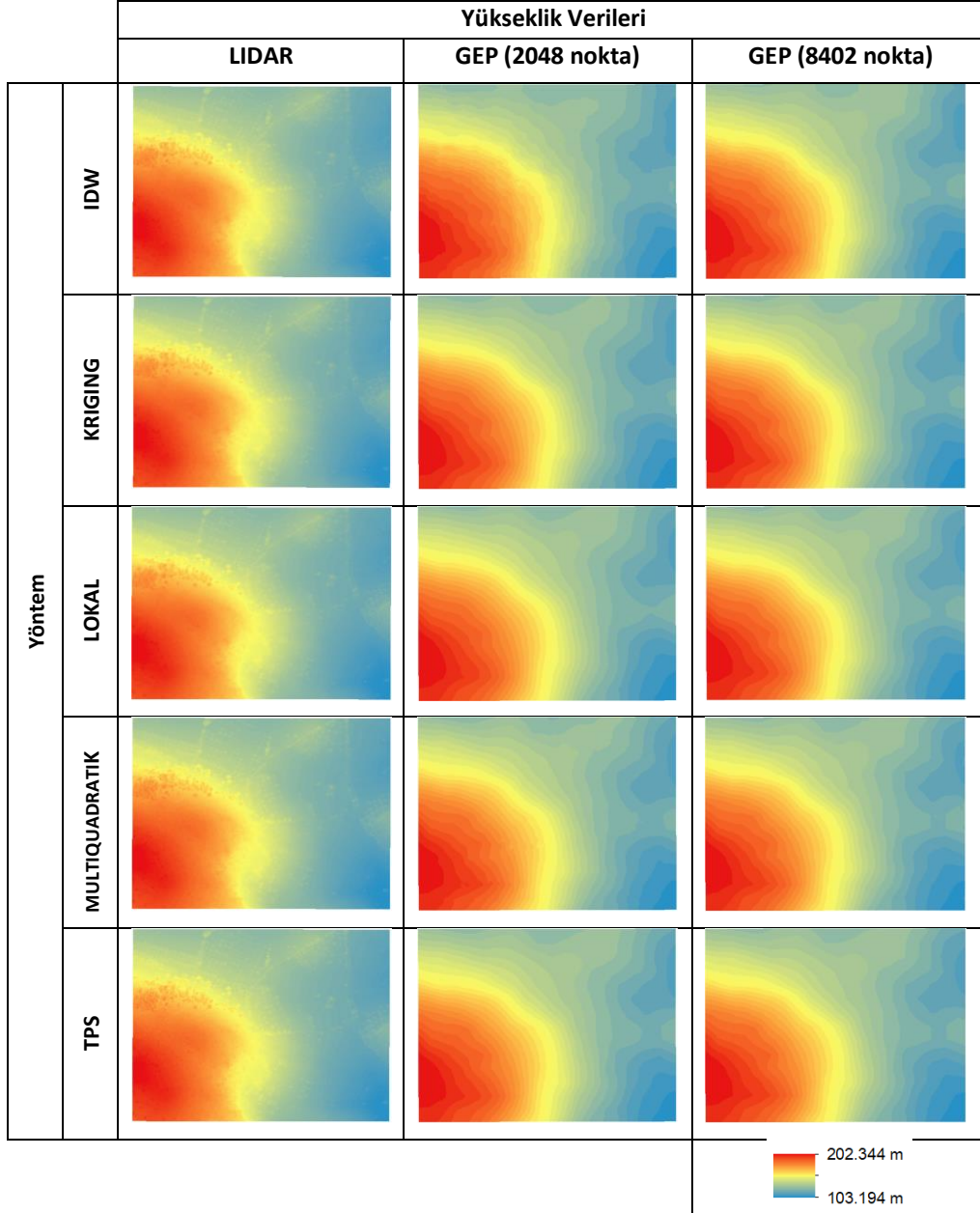
üzerinde rastgele 90 test noktası seçilmiştir. Test noktalarının her bir modelde karşılık geldiği değerler belirlenerek LIDAR nokta bulutundan elde edilen model ile 5 farklı modelden elde edilen değerler arasındaki yükseklik farkları hesaplanmıştır. Bu farklar kullanılarak KOH hesaplanmıştır. KOH ( $\sigma$ ) hesabı Eşitlik 10'da gösterilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (10)$$

v referans SYM ile GEP' den elde edilen modelleri arasındaki farkı ifade eder. n değeri bilinen sayısını yani test noktalarının sayısını ifade eder.

LIDAR yükseklik verileri kullanılarak farklı enterpolasyon yöntemleri ile elde edilmiş SYM'leri ile GEP yükseklik verileri kullanılarak elde edilen SYM kullanılarak 90 rastgele noktada yapılan analizleri ile elde edilen KOH'lar Çizelge 1'de

verilmiştir. Yine LIDAR yükseklik verileri kullanılarak farklı enterpolasyon yöntemleri ile elde edilmiş SYM'leri ile SRTM ve ASTER SYM'leri 90 rastgele noktada karşılaştırılmış, elde edilen KOH'lar Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 6. LIDAR ve GEP verileri ile oluşturulan SYM'leri.

**Çizelge 1.** K.O.H Hesapları ile Doğruluk Karşılaştırması.

Referans SYM	K.O.H (m)			
	GEP SYM (2048 nokta)	GEP SYM (8402 nokta)	SRTM SYM	ASTER SYM
LIDAR SYM (Ters Mesafe Ağırlık/IDW)	3.50	3.53	4.14	5.9
LIDAR SYM (Kriging)	3.44	3.45	4.05	5.88
LIDAR SYM (Lokal Polinom)	3.58	3.57	4.46	6.43
LIDAR SYM (Multiküadratik)	3.90	3.83	4.79	6.68
LIDAR SYM (İnce Plaka Eğrileri/TPS)	3.92	3.90	4.87	6.73

### 3. Sonuç

LIDAR verileri ile oluşturulan beş farklı SYM referans veri olarak kullanılmış, GEP yükseklik verilerinden 2 farklı yoğunlukta veri ve beş farklı yöntemle oluşturulan SYM'leri ile karşılaştırılmıştır. Yine aynı referans veriler SRTM ve ASTER SYM'leri ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan GEP SYM'lerinin SRTM ve ASTER SYM'lerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

GEP verileri ile elde edilen SYM ne rastgele seçilen 90 nokta ile yapılan doğruluk değerlendirmesinde K.O.H  $\pm$  3.44 - 3.92m aralığında belirlenmiştir. Sonuçlara göre en iyi doğruluk az nokta ile Kriging enterpolasyon yöntemiyle  $\pm$  3.44 m olarak elde edilmiştir. En düşük doğruluk ise yine az nokta kullanılarak Multiküadratik enterpolasyon ile üretilen SYM'de  $\pm$  3.90 m olarak elde edilmiştir. Seçilen çalışma alanında en yüksek ve en düşük nokta yükseklikleri arasında yaklaşık 99.1 m'lik bir fark bulunmaktadır. Yükseklik farklarının çok olmadığı düz alanlarda GEP'den elde edilen nokta yükseklikleri ile LIDAR verilerinden elde edilen yükseklik verileri karşılaştırıldığında farkların cm mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. İki farklı nokta yoğunluğunda GEP yükseklik verileri kullanılarak yapılan enterpolasyonlar da kullanılan nokta sayısı değiştiğinde, model doğruluğunda anlamlı değişim olmadığı görülmüştür. Seçilen alanın 450x430m'lik küçük bir alan olmasının bu sonuçta etkili olduğu söylenebilir. GEP yükseklik verilerinin doğruluk değerlendirmesinde, farklı referans verilerinin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Çeşitli ölçeklerde topografik paftalardan üretilen SYM'leri, nivelman yöntemi ile üretilen çok sayıda nokta verisi, ulusal yükseklik ağı verileri bunlardan birkaçıdır. Bu çalışmanın literatüründe verilen, farklı

referans verileri ile GEP, SRTM ve ASTER GDEM doğruluklarını araştıran çalışmalar ile bu çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır (Çizelge 2). Doğruluk değerlerindeki farklılıkların referans verilere bağlı olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada yüksek doğruluklu LIDAR verisi referans veri olarak kullanıldığı için güvenilir bir doğruluk analizi sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Çalışmanın diğer çalışmalar ile karşılaştırılması (K.O.H değerleri m cinsinden verilmiştir).

Çalışma	GEP	SRTM	ASTER
El-Ashmawy (2016)	5.6	-	-
Wang vd. (2017)	2.27	-	-
Hu vd. (2020)	1.46	-	-
Luana vd. (2015)	-	13.74	12.12
Varga ve Bašić (2015)	-	21.3	7.1
Elkhrachy (2018)	-	6.87	7.97
Bildirici ve Abbak (2020)	-	7-9	7.12
Bu çalışma	3.44	4.05	5.88

SRTM SYM ile referans SYM'leri karşılaştırıldığında  $\pm$  4.05 - 4.87 m aralığında doğruluklar elde edilmiş, kriging yöntemiyle oluşturulan referans SYM diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç vermiştir.

LIDAR yükseklik verileri ile oluşturulan SYM'leri ile ASTER SYM'i karşılaştırıldığında  $\pm$  5.88 - 6.73 m doğruluklar elde edilmiş ve yine kriging enterpolasyon yöntemi en iyi sonucu vermiştir.

Literatürde yapılan çalışmalara benzer şekilde SRTM, ASTER GDEM'den daha iyi sonuçlar vermiş; GEP verileri ile oluşturulan SYM ise SRTM den daha da iyi sonuçlar vermiştir. GEP üzerinden alınacak yükseklik verileri kullanılarak kriging enterpolasyon yöntemi ile oluşturulacak SYM'lerinin, SRTM SYM'nin kullanılabilirliği tüm mühendislik ve akademik çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilacağı

söylenbilir. Eğimin yüksek olmadığı düz arazilerde SYM doğruluğu artacaktır. Gelecek çalışmalarda, farklı eğime sahip çalışma alanları seçilerek, arazinin düz ya da eğimli olmasının oluşturulacak SYM'nin doğruluğuna etkisi araştırılabilir.

#### Teşekkür

LIDAR verileri için Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

#### 4. Kaynaklar

Atak, V. O., 2019. Google Earth Uydu Görüntülerinin Konumsal Doğruluğu. *Harita Dergisi*, **85(161)**, 11-25.

Atik, M. E., Ozturk, O., Duran, Z., and Seker, D. Z. 2020. An automatic image matching algorithm based on thin plate splines. *Earth Science Informatics*, **13**, 869-882.

Bildirici, I. O., Ustun, A., Ulugtekin, N., Selvi, H. Z., Abbak, R. A., Bugdayci, I., and Dogru, A. O., 2008. Comparison of SRTM and 25K topographic maps in Turkey. In The Second international conference on cartography and GIS. Proceedings 1, January 21-24,2008, Borovets, Bulgaria.

Bildirici, İ. Ö., ve Abbak, R.A., 2020. Türkiye ve Çevresinde SRTM Sayısal Yükseklik Modelinin Doğruluğu. *Geomatik*, **5(1)**, 1-9.

El-Ashmawy, K. L., 2016. Investigation of the accuracy of google earth elevation data. *Artificial Satellites*, **51(3)**, 89-97.

Elkhrachy, I., 2018. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*, **9(4)**, 1807-1817.

Erol, S., Özögel, E., Kuçak, R. A., Erol, B., 2020. Utilizing Airborne LIDAR and UAV Photogrammetry Techniques in Local Geoid Model Determination and Validation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **9(9)**, 528.

Erol, B., Işık, M., Erol, S., 2020. Global ve Bölgesel (Yüksek Çözünürlüklü) Sayısal Yükseklik Modellerinin Doğruluk Analizi Üzerine Bir İnceleme. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20(4)**, 598-612.

Hu, F., Ge, J., Lu, C., Li, Q., Lv, S., Li, Y., ... and Lin, D., 2020. Obtaining elevation of Oncomelania Hupensis habitat based on Google Earth and it's accuracy evaluation: an example from the Poyang lake region, China. *Scientific Reports*, **10(1)**, 1-9.

Isioye, A. O., and Jobin, P., 2012. An Assessment of Digital Elevation Models (DEMs) From Different Spatial Data Sources. *Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology*, **2(1)**.

Kuçak, R. A., Kılıç, F. and Kısa, A, 2016. Analysis of terrestrial laser scanning and photogrammetry data for documentation of historical artifacts. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 155.

Kuçak, R. A., Özdemir, E. and Erol, S., 2017. The segmentation of point clouds with k-means and ANN(artificial neural network). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**, 595.

Kuçak, R. A., Erol, S., and İşiler, M., 2020. Comparative Accuracy Analysis of LIDAR Systems. *Türkiye LIDAR Dergisi*, **2(2)**, 34-40.

Luana, S., Hou, X., and Wang, Y.,2015. Assessing the Accuracy of SRTM Dem and Aster Gdem Datasets for the Coastal Zone of Shandong Province, Eastern China. *Polish Maritime Research*, **22(s1)**, 15–20.

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., and Factor, J. K., 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth*, **117(B4)**.

Varga, M., and Bašić, T., 2015. Accuracy validation and comparison of global digital elevation models over Croatia. *International journal of remote sensing*, **36(1)**, 170-189.

Wang, Y., Zou, Y., Henrickson, K., Wang, Y., Tang, J., & Park, B. J. (2017). Google Earth elevation data extraction and accuracy assessment for transportation applications. *PloS one*, **12(4)**, e0175756.

Yanalak, M., 2002. Sayısal arazi modellerinde yükseklik enterpolasyonu. *Harita Dergisi*, **69(128)**, 44-58.

Yanalak, M., 2002b. Yön ve Ters Uzaklık Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon. *Harita Dergisi*, **127**, 55.

Yanalak, M., and Baykal, O., 2003. Digital elevation model based volume calculations using topographical data. *Journal of Surveying Engineering*, **129(2)**, 56-64.

Yaprak, S., ve Arslan, E., 2008. Kriging Yöntemi ve Geoit Yksekliklerin Enterpolasyonu. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, **(98)**, 36-42.

Yu, L., and Gong, P., 2012. Google Earth as a virtual globe tool for Earth science applications at the global scale: progress and perspectives. *International Journal of Remote Sensing*, **33(12)**, 3966-3986.

### **İnternet kaynakları**

- 1-<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>, (20.03.2021)
- 2-<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (20.03.2021)
- 3- <http://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid> (15.03.2021)



AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055601 (1137-1145)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055601 (1137-1145)

DOI: 10.35414/akufemubid.977280

Araştırma Makalesi / Research Article

## The Effect of Marble Powder and Fly Ash on Mechanical Properties of Cement Mortars

Cüneyt DOĞAN<sup>1\*</sup>, İsmail DEMİR<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Afyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Afyonkarahisar.corresponding author e-mail: \* [cdogan@usr.aku.edu.tr](mailto:cdogan@usr.aku.edu.tr)  
[idemir@aku.edu.tr](mailto:idemir@aku.edu.tr)ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6662-8381>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8493-0309>

Geliş Tarihi: 01.08.2021

Kabul Tarihi: 30.10.2021

### Abstract

Marble powder and fly ash have a significant influence on building technology. Fly ash and marble powder allow the production of cement-based composites with different properties. The use of marble powder and fly ash in mortars was researched and the findings of the study to understand the effect of these materials on mortar were presented. The fine aggregate was substituted with marble powder, fly ash, and both marble powder and fly ash in a total of 15 mortar mix produced with CEM I 42.5 R cement. 7 and 28 days bending and compression tests were applied to the samples produced with a constant (0.58) water/cement ratio. The microstructure of the samples was investigated by XRD technique. In the substitution of standard sand with marble powder, it was discovered that a 5% substitution increased flexural and compressive strength. Similarly, 20% fly ash substitution in mortars resulted in maximum mechanical properties, with a compressive strength of 49.5 MPa. It was also determined that using 15% marble powder and 15% fly ash increased the mechanical properties of mortars. It has been concluded that fly ash is a very effective additive in mortar thanks to its pozzolanic properties, and the use of fly ash and marble dust in cement-based composites is an important application to protect the environment.

### Keywords

Marble Powder;  
Fly ash;  
Cement Mortar;  
Mechanical Properties

## Mermer Tozu ve Uçucu Külün Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

### Öz

Mermer tozu ve uçucu kül, yapı teknolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uçucu kül ve mermer tozu, farklı özelliklerde çimento esaslı kompozitlerin üretilmesine olanak sağlar. Bu çalışmada, harçlarda mermer tozu ve uçucu kül kullanımı incelenmiş ve bu malzemelerin harcın mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini belirleyen çalışmanın sonuçları sunulmuştur. Çalışmada CEM I 42.5 R çimentosu ile ince agreganın mermer tozu, uçucu kül ve uçucu kül ile birlikte mermer tozu ikame edildiği toplam 15 harç karışımı üretilmiştir. Sabit (0.58) su/çimento oranıyla üretilen numunelere 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç testleri uygulanmıştır. Numunelerin mikro yapısı XRD tekniği ile incelenmiştir. Mermer tozunun standart kum ile %5 oranında ikame edilmesi basınç ve eğilme dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, %20 uçucu kül ikamesi, harçlarda 49.5 MPa basınç mukavemeti elde edilerek en yüksek mekanik özellikler bulunmuştur. Benzer şekilde, %15 mermer tozu ve %15 uçucu kül kullanımının harçların mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Uçucu külün pozolanik özelliklerinin sayesinde harçta oldukça etkili bir katkı malzemesi olduğu ve uçucu kül ile mermer tozunun çimento esaslı kompozitlerde kullanımı çevreyi korumak için önemli uygulama olduğu sonucuna varılmıştır.

### Anahtar Kelimeler

Mermer Tozu;  
Uçucu Kül;  
Çimento Harcı;  
Mekanik Özellikler

## 1. Introduction

Rapid population growth and technological innovations increase the amount and diversity of industrial, mining, domestic, and agricultural sourced solid wastes (Dhanapandian *et al.* 2009). Community policy on waste management is based on minimizing waste generation by reducing waste generation, but promoting recycling and reusing waste through clean technologies is the best way to reduce pollution caused by waste (Eliche-Quesada *et al.* 2012).

Since the use of thermal power plants for power generation, millions of tons of fly ash (FA) and related by-products have been released. Annual FA production is approximately 800 million tons which are expected to be increased in the future (Golewski 2020). Storage of FA in waste sites is the first option for many countries. However, the elements and components of FA increase the potential of the FA to be recovered as raw materials. In this way, in addition to the benefits of waste disposal and conservation of natural resources, it contributes to the use of low-cost raw materials (Ferreira *et al.* 2003).

Fine-sized marble wastes can be easily dispersed by the effect of wind and mixed with soil with the impact of rain and snow. Thus, fine-sized marble wastes cause more pollution than other marble wastes. Exposing particles smaller than 2 mm when cutting marble blocks is an essential problem for the marble industry. When 1 m<sup>3</sup> marble block is cut into 2 cm thick slabs, the marble powder (MP) is 25% of the total waste amount (Bilgin *et al.* 2012).

Hwang *et al.* (1998) investigated a study on strength development in fine aggregate 25% and 45% FA substituted mortar samples resulted in increased flexural and compressive strength and increased resistance to carbonation shrinkage.

Mangaraj and Krishnamoorthy (1994) examined the ratio of 0% to 30% FA substitution with fine aggregate for mortar samples with a water/cement

ratio of 0.60, an increase in compressive strength was achieved.

Pofale and Deo (2010) determined in their study that the substitution of sand with 27% of the FA increases the compressive strength by about 20% and the flexural strength by 15%. In this study, fly ash-based portland pozzolan cement was used. Also, it has been determined that fly ash-based concrete has an approximately 25% increase in workability compared to reference concrete.

Maslehuddin (1989) examined concretes produced by fine aggregate by substitution of 0%, 20%, and 30% with FA. FA substitution in the concrete mixture increased early wet compressive strength and long-term corrosion resistance properties.

Bonavetti and Irassar (1994) observed that the use of fine aggregate 5% and 20% MP in mortar mixtures prepared in water/cement 0.48 ratio increases the pressure and flexural strengths at an early age. The 28-day strength of the mortar up to 20% substitution of MP showed strength similar to the reference sample. In mortars with MP substitution rates of 5% and 10%, an increase in strength values of 28 days was recorded.

Keleştemur *et al.* (2014) found that partial substitution of fine aggregate with MP increases the compressive strength of the mortar. Strength increase has been linked to the filler effect and the improvement in the transition zone. In addition, the flexural strength of glass fiber reinforced mortar increased with the substitution of MP.

Almeida *et al.* (2007) determined that the 7 and 28 days compressive strength of fine aggregate samples with 5% MP substitution was higher than the reference sample compressive strength. This increase in strength has been linked to the improvement in hydration and the micro filler effect caused by MP.

Rai *et al.* (2011) examined the mechanical properties of concretes that fine aggregate was substituted with MP at the rates of 5%, 10%, 15%,

and 20%. Compared to the reference sample, 28 days of compressive strength of 20% substituted sample is decreased slightly. It has been determined that the 15% substitution of MP increases the flexural strength by 25% and, at higher rates, reduces the flexural strength. In this study, the effect of marble powder and fly ash on the mechanical properties of cement mortars were investigated.

## 2. Material and Method

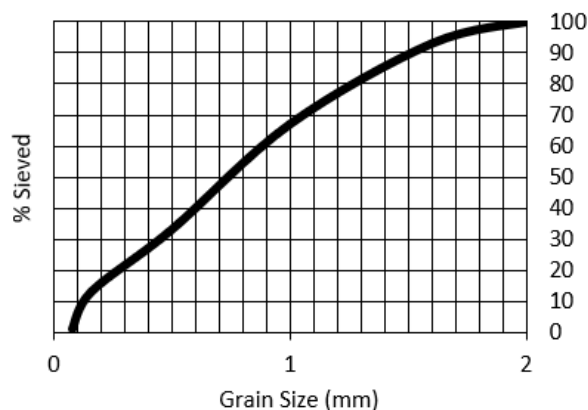
### 2.1 Materials

CEM I 42.5 R portland cement produced by Afyon Cement Industry was used as a binder material in the prepared cement pastes. The chemical properties of CEM I 42.5 R cement in accordance with EN 197-1 standard are given in Table 1.

**Table 1.** CEM I 42.5 R portland cement chemical properties.

Constituent	Value (%)	EN 197-1
SO <sub>3</sub>	2.91	<3.5
MgO	2.33	<5.0
LOI	1.92	<4.0
Cl	0.06	<0.1
Insoluble matter	0.67	<1.5

Rilem Cembureau (CEN) standard sand in accordance with EN 196-1 standard is used. Standard sand was supplied from Trakya Cement Factory. The grain size analysis of the standard sand is given in Figure 1. Accordingly,  $d_{20} = 0.32$  mm,  $d_{50} = 0.75$  mm,  $d_{80} = 1.35$ mm and  $d_{max} = 2$ mm.



**Figure 1.** Grain size analysis of standard sand.

The total amount of silicon dioxide, aluminum oxide, ferric oxide (SAF) of FA used in mortar samples is 88.21%, it is in class F, and the 28-day pozzolanic activity index of the FA was determined 72.5%. FA chemical properties are presented in Table 2.

**Table 2.** Chemical composition of fly ash and marble powder.

Constituent	Fly ash (%)	Marble powder (%)
SiO <sub>2</sub>	56.020	0.200
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.380	0.120
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.810	0.050
CaO	2.100	55.030
MgO	3.720	0.390
Na <sub>2</sub> O	0.180	0.050
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.220	0.030
K <sub>2</sub> O	2.050	0.010
TiO <sub>2</sub>	1.000	-
SO <sub>3</sub>	0.560	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	88.210	0.370
Loss of ignition	1.010	-

MP obtained in Afyonkarahisar region and MP chemical properties used in the samples are presented in Table 2. Accordingly, MP contains 55% CaO as major oxide, and loss of ignition has 43.7%. The loss of ignition is largely due to the CO<sub>2</sub> released during the calcination of CaCO<sub>3</sub>. FA and MP, grain size analysis, is presented in Figure 2. In MP,  $d_{50} = 0.007$  mm and  $d_{90} = 0.060$  mm, while in FA,  $d_{50} = 0.045$  mm and  $d_{90} = 0.130$  mm (Figure 2).

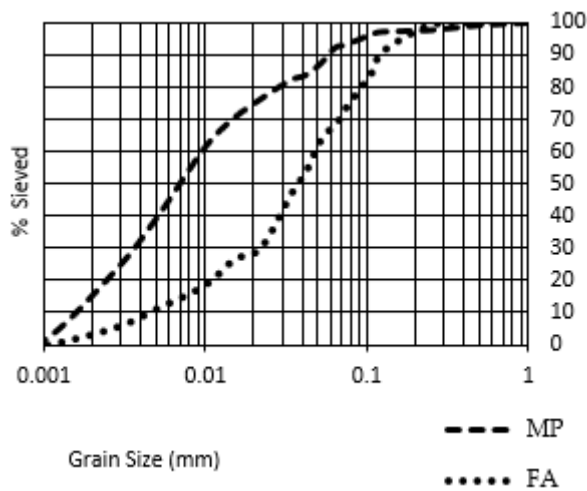


Figure 2. Grain size distribution of MP and FA.

### 2.2 Preparation of mixtures

Mixtures were prepared in 3 series: MP series (marble powder), FA series (fly ash), and MU series (marble powder and fly ash). In the MP series, standard sand is substituted by 0% (reference sample) 5%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% MP by weight. In the FA series, standard sand is substituted by 5%, 10%, 20%, and 30% FA by weight. In the MU series, standard sand was substituted by MP and FA in equal proportions of 2.5%, 5%, 10%, 15% by weight (Table 3). In all series, the water/cement ratio is kept constant as 0.58, and 900 gr of cement was used. MP substitution rates were chosen higher since MP is an industrial waste and causes environmental problems.

Table 3. Substitution amount of sand, MP, and FA by weight.

Sample	Sand (g)	MP (g)	FA (g)
Reference	2700	—	—
MP5	2565	135	—
MP10	2430	270	—
MP20	2160	540	—
MP30	1890	810	—
MP40	1620	1080	—
MP50	1350	1350	—
FA5	2565	—	135
FA10	2430	—	270
FA20	2160	—	540
FA30	1890	—	810
MU2.5	2565	67	67
MU5	2430	135	135
MU10	2160	270	270
MU15	1890	405	405

All materials were prepared by weighing separately on the sensitive scale according to the determined ratios. The prepared materials were placed in the mixer for mixing. Firstly, water and cement were added to the mixing bowl, respectively, and mixed for 20-30 seconds to obtain cement paste. Then, standard sand, MP, or FA was added and mixed for approximately 2-3 minutes until homogeneity was achieved and poured into prismatic moulds with dimensions of 40x40x160 mm and compressed using the vibrating table (Figure 3). After 24 hours of production, the moulds were removed, and the samples were placed in the curing tank at 20°C.



Figure 3. Sample mold process.

## 3. Results

### 3.1 Flexural and compressive strength

The three-point flexural strength test was performed on prism mortar samples of 40x40x160 mm cured 7 and 28 days in the curing pool. In the experiments, a standard cement press with 20 tons compressing and 2 tons flexural capacity was used. The compressive strength test was carried out on samples obtained from the flexural strength test.

The highest flexural strength value in MP series was obtained in MP5 series with 5% MP substitution. The flexural strength was obtained higher than the reference sample in all series with MP substitution. FA substitution in mortars increased the flexural strength of mortars. The flexural strength of the samples for 28 days is 6%, 16.6%, 25%, and 14.2% percent increase was achieved according to the reference sample. It is considered that the increase in strength in the FA doped series is due to the

pozzolanic property of the fly ash, leading to an increase in strength with secondary reactions (Figure 4).

In the MU series, 10% MP and 10% FA substituted MU10 samples provided the highest 28-day flexural strength. Flexural strength increased up to 10% substitution rate and decreased 15% substitution rate (Figure 4). MP series was determined to be the highest 7 and 28 days compressive strength MP5 sample. Compressive strength increased with the micro-filling effect of MP. However, the higher surface area and internal friction of MP at higher substitution rates reduced workability and resulted in a decrease in compressive strength (Figure 5).

With the increase of FA substitution in the FA series, an increase in compressive strength was achieved. The highest strength increase was obtained in the series containing 20% FA. According to the reference sample, 28-day compressive strength values are increased by 10.6%, 9.6%, 56.2%, and 39.55%, respectively. The occurrence of pozzolanic reactions at older ages increased the compressive

strength for 28 days. In addition, the substitution of the sand with the FA provided an increase in 7-day compressive strength (Figure 5).

Compressive strength decreased in MU2.5 and MU5 series compared to the reference sample. MU10 and MU15 samples have 6.9% and 7% higher 28 days compressive strength than the reference sample. It is evaluated that the increase in the amount of FA in the mixture improves the strength with the pozzolanic effect.

### 3.2 X-ray diffraction

The reference sample, MP20, MP40, MP50, FA20, and MU10 samples were selected by considering the mixture ratios, flexural, and compressive strength values for mineralogical analysis with the XRD qualitative method of cement paste mixtures. Ettringite, portlandite, quartz, calcium carbonate, C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, and C-S-H were detected in the XRD analyses. Patterns of XRD analyses and the crystal phases in the samples are given in Figure 6.

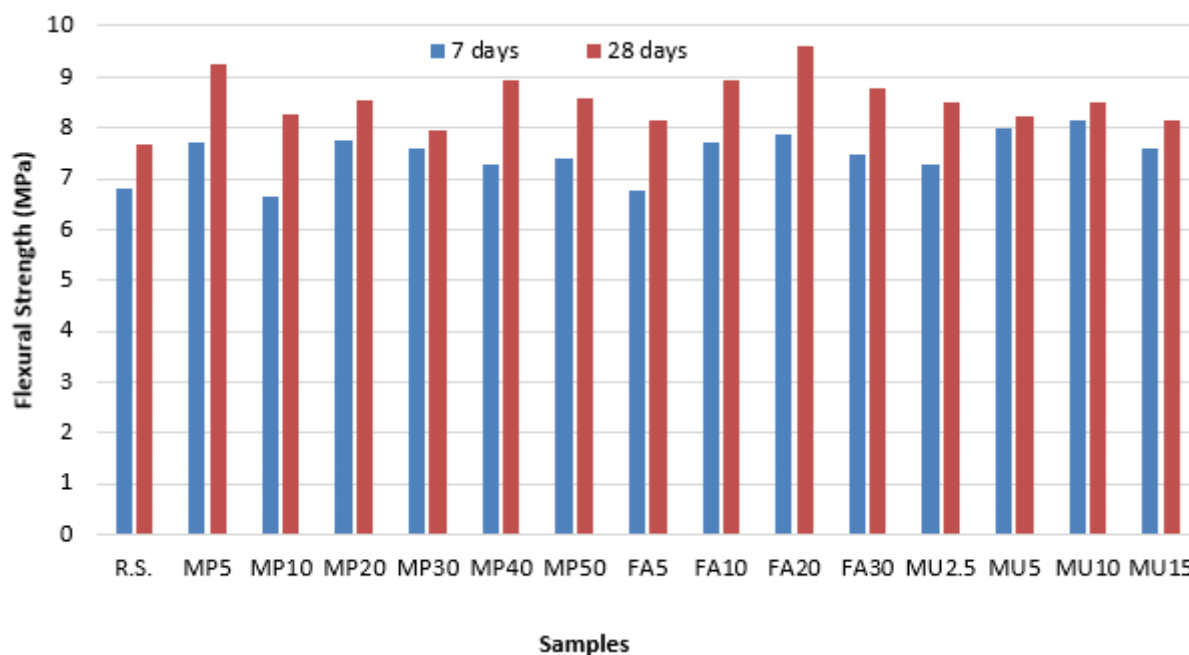


Figure 4. The 7 and 28 days flexural strength.

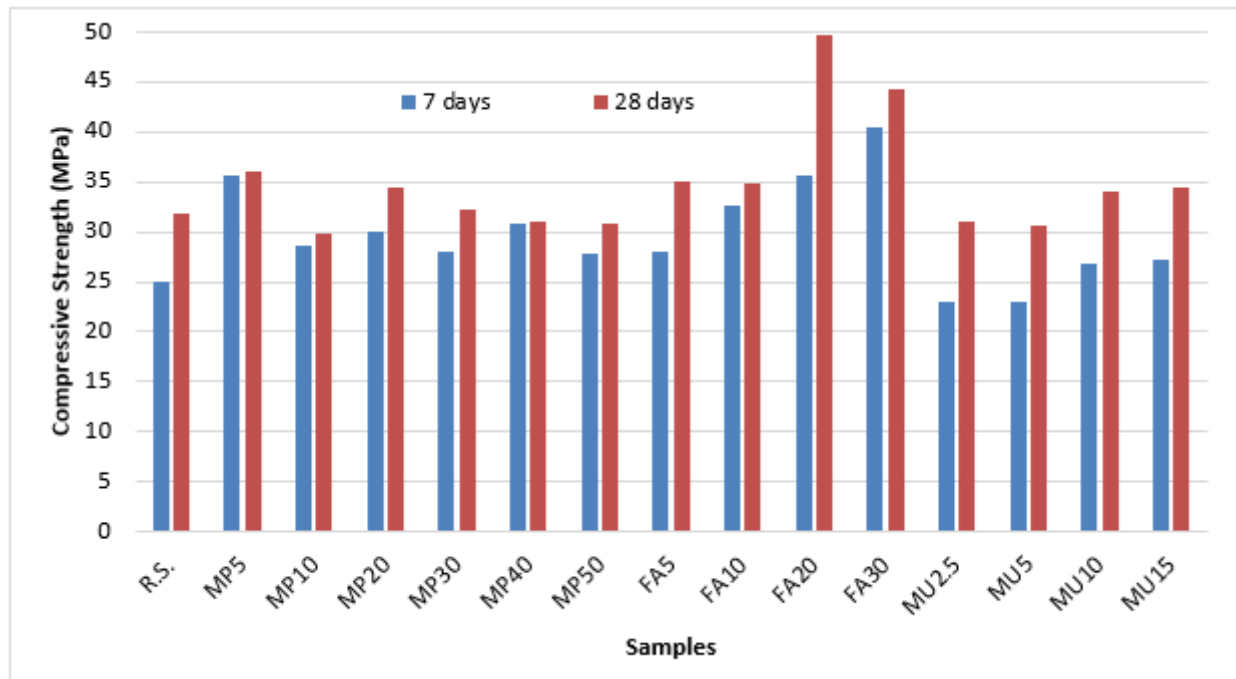


Figure 5. The 7 and 28 days compressive strength.

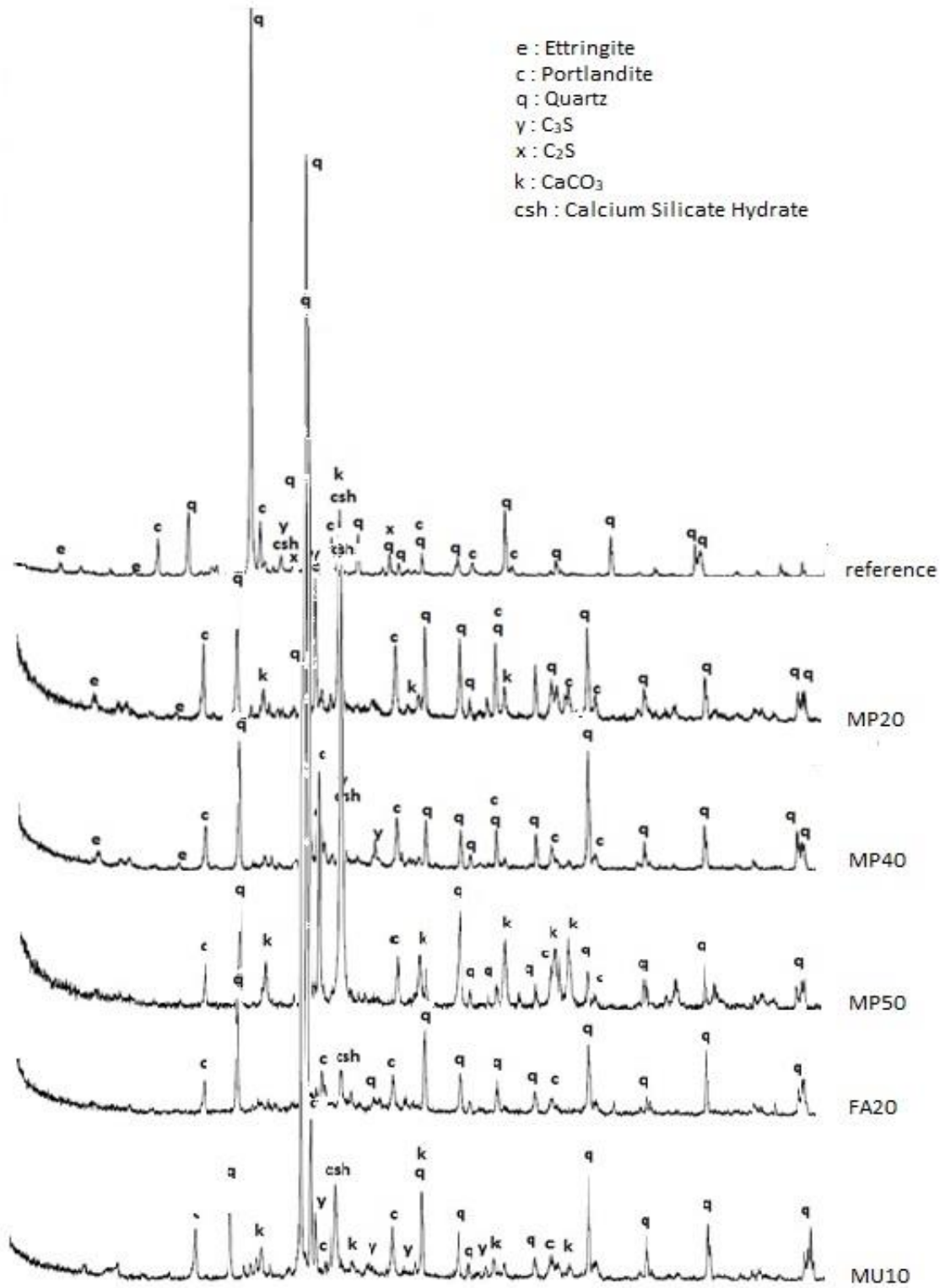


Figure 6. XRD analyses of selected samples.

In the XRD analysis of cement paste mixtures, generally the quartz, calcium carbonate and C-S-H intensity increased as the MP substitution rate increased (Figure 6).

#### 4. Conclusions

Samples were produced by substitution marble powder and fly ash with fine aggregate in certain proportions. Physical and mechanical tests were



carried out on the samples, microstructure properties were examined. The flexural and compressive strength values of mortars produced using MP have increased compared to the reference sample. Accordingly, the highest flexural and compressive strength values were obtained in samples with 5% MP substitution. As a reason, it is thought that 5% MP has a microfill effect and increases the adherence to the interface. The fine aggregate surface area has increased greatly, and the workability has decreased in substitutes with mortars over 10%. Although the rate of substitution increases in mixtures of 10% or more compared to the reference sample, it is considered that this is due to the fact that the fine grains fill the void structure and increase the composition (occupancy) of the mortar.

The use of FA has increased the strength of mortars with its pozzolanic effect. With the substitution of the FA by 20%, the compressive strength increased by 56.2% was achieved compared to the reference sample. Substitution of fine aggregate with F class FA in mortars increased the amount of C-S-H gels as a result of pozzolanic reactions and improved the mechanical properties of the mortar.

In mortars where MP and FA are used together, strength values are higher than the reference (MU10, MU15). Accordingly, with the use of FA and MP, it will be possible to produce higher performance mortars and also using more amount waste mineral materials.

Although the sample with an MP substitution rate of 5% offers optimum strength values, FA provides high strength at high substitution rates due to its pozzolanic feature.

In the study, the effect of marble powder, which is an industrial waste produced at a large scale in Afyonkarahisar region, on cement mortars was investigated. As a result, it has been determined that using marble powder with fly ash in certain proportions improves the mechanical properties of mortars and enables an environmentally friendly and sustainable production.

## 5. References

- Almeida, N., Branco, F. and Santos, J.R., 2007. Recycling of stone slurry in industrial activities. *Application to concrete mixtures, Building and Environment*, **42**, 810-819.
- Bilgin, N., Yeprem, H.A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. and Marşoglu, M., 2012. Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, **29**, 449–457.
- Bonavetti, V.L. and Irassar, E.F., 1994. The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Research*, **24**, 580-590.
- Dhanapandian, S., Gnanavel, B. and Ramkumar, T., 2009. Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, **4**, 147 – 160.
- Eliche-Quesada, D., Corpas-Iglesias, F.A., Pérez-Villarejo, L. and Iglesias-Godino, F.J., 2012. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. *Construction and Building Materials*, **34**, 275–284.
- Ferreira, C., Ribeiro, A. and Ottosen, L., 2003. Possible applications for municipal solid waste fly ash. *Journal of Hazardous Materials*, **B96**, 201-216.
- Golewski G.L., 2020. Energy Savings Associated with the Use of Fly Ash and Nanoadditives in the Cement Composition. *Energies*, **13(9)**, 2184, 2020.
- Hwang, K.R., Noguchi, T. and Tomosawa, F., 1998. Effects of fine aggregate replacement on the rheology, compressive strength and carbonation properties of fly ash and mortar. *American Concrete Institute Special Publication*, **178**, 401–410.
- Keleştemur, O., Arıcı, E., Yıldız, S. and Gökçer, B., 2014. Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, **60**, 17-24.
- Mangaraj, B.K. and Krishnamoorthy, S., 1994. Use of pond fly ash as part replacement for mortar and concrete. *Indian Concrete Journal*, **1994(May)**, 279–82.

Maslehuddin, M., 1989. Effect of sand replacement on the early – age strength gain and long – term corrosion – resisting characteristics of fly ash concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, **86**, 58–62.

Pofale, A.D. and Deo, S.V., 2010. Comparative Long Study of Concrete Mix Design Procedure for Fine Aggregate Replacement with Fly Ash by Minimum Voids Method and Maximum Density Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **14**, 759-764.

Rai, B., Khan, N.H., Abhishek K, Tabin R.S. and Duggal S.K., 2011. Influence of Marble powder/granules in Concrete mix. *International Journal of Structural and Civil Engineering*, **1**, 827–834.

## Pasif Ev Sertifika Sisteminin Mevcut Binalarda Uygulanması: EnerPHit Sertifika Sistemi

Ahunur AŞIKOĞLU<sup>1</sup>, Müjde ALTIN<sup>2</sup>, Necla Seval BAYRAM<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir.

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir.

<sup>3</sup> Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli.

Sorumlu yazar e-posta: ahunur.asikoglu@deu.edu.tr

mujde.altin@deu.edu.tr

nsevalerdem@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7227-1788>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6948-9463>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9522-0270>

Geliş Tarihi: 03.08.2021

Kabul Tarihi: 07.10.2021

### Öz

Günümüz koşullarını iyileştirmek ve gelecek nesillerin sağlıklı bir dünyada yaşamasını sağlamak amacıyla, dünyada farklı alanlarda farklı çözüm arayışlarına başlanmış ve bu doğrultuda önemli adımlar atılmıştır. Yapı sektörü, enerji tüketimi açısından önde gelen sektörlerden biri olduğu için, binalarda enerji kullanımını azaltılırken, konforlu ve sağlıklı mekânlarda yaşam koşullarının oluşturulmasına yönelik adımlar çeşitli yönetmelik, direktif vb. çalışmalarla atılmaya başlanmıştır. 2010 yılında Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi revizyonuna göre, üye devletlerden kendi NZEB (neredeyse sıfır enerjili bina) hedeflerini belirlemeleri ve uygulamaya koymaları istenmiştir. Bu süreçte, mevcut sertifika sistemlerinden, kriterleri ülkenin NZEB hedeflerine uygun olanların kullanımında bir artış meydana gelmiştir. Son yıllarda, farklı iklim bölgelerinde bulunan ülkeler tarafından Pasif Ev sertifika sistemi ve mevcut binalarda kullanılan versiyonu olan EnerPHit sertifika sistemi kriterlerine uygun yapılar inşa edilmeye başlanmıştır. Çalışmada; biri Türkiye’de olmak üzere, dünyadaki 34 farklı EnerPHit sertifikalı yapı teknik özellikleri ve ulaşılan sonuç değerler üzerinden detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma ile literatüre EnerPHit sertifika sisteminin kriterlerinin, uygulama tekniklerinin incelenmesi ve analizi ile katkıda bulunulması, Türkiye için potansiyelinin aktarılması amaçlanmıştır. Türkiye’de mevcut yapı stokunun enerji etkin iyileştirilmesi ile ülkenin enerjide dışa bağımlılığının büyük ölçüde azaltılması, sağlıklı ve konforlu binalar yaratılması ve enerji tüketim maliyetlerinin büyük oranda azaltılması sağlanmış olacaktır.

### Anahtar kelimeler

Yalıtım malzemesi;  
Pasif Ev; EnerPHit;  
Enerji tüketimi

## Application Of The Passive House Certification System In Existing Buildings: EnerPHit Certification System

### Abstract

In order to improve today's conditions and to ensure a healthy life for future generations, different solutions have been sought in different areas around the world and important steps have been taken in this direction. As the building sector is one of the leading sectors in terms of energy consumption, steps towards creating living conditions in comfortable and healthy spaces made by various regulations, directives, etc. started to be taken with studies, while reducing the energy use in buildings. According to the Energy Performance in Buildings Directive-recast published by the European Union in 2010, member states were asked to set and implement their own NZEB (nearly zero energy building) targets. During this period, there has been an increase in the use of existing certification systems whose criteria meet the country's NZEB objectives. In recent years, countries in different climatic zones have started to construct buildings that comply with the Passive House certification system and the EnerPHit certification system, the version used in existing buildings. In the study, specifications have been analyzed in detail and the results achieved over values through 34 different EnerPHit certified buildings in the world, including one in Turkey. With this study, it is aimed to contribute to the literature with the examination the analysis of EnerPHit certification system criteria, the application techniques, potential for Turkey. Reducing the dependence on foreign energy in Turkey with energy efficient improvement of the existing building stock in country, creation of healthy and comfortable and energy consumption costs will be provided.

### Keywords

Insulation material;  
Passive House;  
EnerPHit; Energy  
consumption

## 1. Giriş

Endüstri devrimi sonrasında, teknolojinin, üretimin, enerji talebi ve tüketiminin hızla artışı enerjiye bağımlılığı da büyük oranda arttırmıştır. “Dünyada teknolojinin gelişmesi ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç çoğalırken, diğer taraftan ortaya çıkan nüfus artışı, enerjiye olan ihtiyacı daha da arttırmıştır. Kaynakları etkin ve verimli bir şekilde kullanmak, gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya miras bırakabilmek için gereklidir.” (Aşıkoğlu 2014)

Dünyada kaynaklar yenilenebilir ve yenilenemeyen kaynaklar (fosil kaynaklar) olarak iki grupta incelenebilir (Yeang 2008). Fosil yakıt tüketiminin azaltılması, enerji fiyatlarındaki artışlar, küresel ısınmaya bağlı çevresel sorunlar, enerjinin sanayi ve ulaşım sektörleri gibi yapılarda verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. (Yıldız vd. 2011) Petrol krizi, küresel ısınma, fosil kaynakların tükenmesi gibi pek çok çevresel sorun enerjiyi etkin kullanan yapı tasarımı doğrultusunda çözümlerin geliştirilmesine yönelik arayışlara ve çalışmalara neden olmuştur. Bu süreçte; çevreyle uyumlu, sürdürülebilir, enerjiyi etkin ve verimli kullanan, çevreye verilen zararı minimize eden yapı kabuğu tasarımına dair sistemler ortaya çıkmıştır. (Şenyurt ve Altın 2020).

Son 18 yılda Türkiye’de toplam enerji tüketiminin %284, başka bir deyişle 3 kata yakın arttığı görülmektedir (Yearbook Enerdata 2020). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’na göre; Türkiye’de 2017 yılında toplam enerji tüketimi 145,3 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olmuştur. 2017 yılında Türkiye’deki toplam enerji tüketiminin sektörlere göre dağılımına bakıldığında ise; en yüksek tüketimin %24,8 ile mesken ve hizmetlerde olduğu görülmektedir. Mesken ve hizmetleri takiben; %24,4 ile sanayi sektörü, %23,1 ile enerji ve çevrim sektörü, %19,6 ile ulaştırma, %5,1 ile enerji dışı ve %2,9 ile sektörlere göre enerji tüketimi oranlar dağılımda yer almaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020).

2 Ocak 2018 tarihli, 30289 sayılı Resmi Gazete’de yayınlanan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023’te; Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)

verilerine göre Türkiye’de 2017 yılı itibarıyla 9,1 milyon adet bina bulunduğu ve bu binaların yaklaşık %87’sini konutların oluşturduğu belirtilmektedir. Yapı kullanma izni istatistiklerine göre Türkiye’nin bina stokuna her yıl 100.000’den fazla yeni bina eklenmektedir (Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017).

Belirtilen istatistiklerden yola çıkarak; Türkiye’de yapı stoku açısından hızlı bir büyüme olduğu söylenebilmektedir. Enerji tüketiminde ülke çapında en büyük yüzdelik dilimi kapsayan binalar, en büyük enerji tasarrufunu yaratma potansiyeline sahiptir. Bu kapsamda; yeni yapılacak binaların daha verimli olması, mevcut binaların da enerji etkin iyileştirmelerinin yapılması, enerji tasarrufuna büyük katkı oluşturacaktır. Türkiye’de 2000 ve sonrasında inşa edilmiş yapılar, benzer derece-gün sayısına sahip Avrupa ülkelerindeki benzer yapılar ile karşılaştırıldığında, yapılarda ısıtma için %50’den fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu görülmüştür. Örneğin; izin verilen maksimum ısıtma tüketim değeri Danimarka’da 23kWh/m<sup>2</sup>, Hollanda’da 34 kWh/m<sup>2</sup>, İngiltere’de ise 35 kWh/m<sup>2</sup> iken, Türkiye’de ortalama ısıtma enerjisi ihtiyacı 110kWh/m<sup>2</sup>’dir. Türkiye’de, binalarda enerji tasarrufu potansiyelinin %20-%50 arasında olduğu belirtilmektedir (OEEB 2013).

2010 yılında yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi (EPBD) revizyonuna göre, doğal gaz, katı yakıt gibi tükenen temel yakıt kaynaklarının; etkin, rasyonel ve sürdürülebilir kullanılması aynı zamanda karbondioksit emisyonunun yönetimini de önemli kılmaktadır. Avrupa Birliği Enerji Komisyonu tarafından yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi’ne göre; 31 Aralık 2018’e kadar tüm kamu binaları, 31 Aralık 2020 tarihine kadar da tüm yeni binalar, NZEB (Neredeyse Sıfır Enerjili Bina) koşullarına uygun olmalıdır (European Union [EU] 2010). Üye devletler, NZEB sayısını arttırabilmek için bina kategorilerine göre farklılaşmış hedefleri içeren ulusal planlar düzenlemektedirler. Bu doğrultuda, başta Avrupa’da olmak üzere tüm dünyada

binalarda enerjiyi etkin ve verimli kullanacak çözümler geliştirilmeye başlanmıştır (ECOFYS 2014).

Türkiye’de ve Avrupa’da bina sektöründeki enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. Yapıların sürdürülebilirliği açısından, tasarım aşamasında verilen kararlar büyük önem taşımaktadır. Yapı kabuğunun uygun tasarımıyla, yapıların ömrü uzatılabilirken, kullanıcıların konforlu bir ortamda yaşamaları sağlanıp, enerji tüketimini azaltmak mümkün olmaktadır (Umaroğulları vd. 2011).

Bir yapının bulunduğu iklim kuşağının karakteristik özellikleri; yapının ısıtılması, soğutulması, aydınlatılması ve havalandırılmasına büyük ölçüde etki etmektedir. Yapı içindeki konfor koşulları sağlanırken; aktif ısıtma, soğutma, havalandırma ve aydınlatma sistemlerine olan ihtiyacı en aza indirecek pasif sistem çözümleri geliştirilmiştir (Aşıkoğlu ve Altın 2016).

Günümüzde enerji etkin binalar üretmek için aktif ve pasif sistem çözümleri kullanılmaktadır. Bu çalışma; binalarda enerjiyi etkin kullanmak üzere pasif teknikler kullanılarak geliştirilmiş bir sertifika sistemi olan Pasif Ev standartlarının mevcut binalarda kullanımını içeren EnerPHit sertifika sisteminin kriterlerini ve farklı iklim bölgelerindeki uygulama örneklerini kapsamaktadır. Bu çalışmada; EnerPHit sertifika sisteminin uygulanma yöntemleri, yapı bileşenlerinde yalıtım için kullanılan malzeme tipleri ve kullanım sıklıkları, yapılan iyileştirmelerde yapı bileşenlerine göre yalıtım kalınlığı seçimleri, ulaşılan U-değerleri ve tüm müdahaleler sonucunda farklı bölgelerde elde edilen sonuç enerji tüketim değerlerini analiz etmek amacıyla; bu sertifikayı almış dünyanın çeşitli bölgelerinde bulunan yapılar ele alınıp incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Dünyada yaygın kullanıma sahip Pasif Ev EnerPHit sertifikasına sahip binalar kullanılan malzeme, elde edilen yapı bileşeni U-değerleri (ısıl iletkenlik katsayısı) ve ulaşılan enerji ihtiyacı vb. parametreler açısından analiz edilmiştir. İzmir ili için kriterleri

asgari düzeyde karşılayan bir uygulama, simülasyon programı aracılığı ile yapılmış ve elde edilebilecek enerji tasarrufu saptanıp değerlendirilmiştir.

### 2.1 Pasif Ev ve EnerPHit Sertifika Sistemi

Binaların tasarımı ve inşasında pasif yaklaşımlar; ilk çağlardan günümüze sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Yaşam alanlarındaki konfor koşullarının pasif havalandırma, aydınlatma, soğutma gibi teknikler kullanılarak iyileştirilmesi, hemen her mimari dönemde görülebilmektedir. Pasif standartlara uygun olarak yapılmış bir bina, rahat ve sağlıklı kullanım için tasarlanmış, farklı iklim bölgelerinde farklı çözümlerle, geleneksel yapı yöntemleri ile inşa edilmiş yapılara göre daha az enerji tüketen yapıdır” (Cotterel and Dadeby 2014). Pasif Ev; enerji verimli, konforlu ve düşük enerji kullanım maliyetli bir bina standardıdır. Pasif Ev’ler, geleneksel yöntemlerle inşa edilmiş bir binaya göre büyük oranda ısıtma ve soğutma ile ilgili enerji tasarrufu sağlamaktadır. Pasif Ev standartlarını belirlemek ve kontrol etmek amacıyla Wolfgang Feist tarafından 1996 yılında Darmstadt’da “Passivhaus Institut” (Pasif Ev Enstitüsü) kurulmuştur. (İnt Kyn. 1)

Farklı iklim bölgelerinde, 2013 yılından bu yana yaklaşık 50,000 Pasif Ev yapısı inşa edilmiş olduğu göz önünde bulundurularak, Pasif Ev sertifika sisteminin, dünyanın önde gelen binalarda enerji verimliliği sertifika sistemlerinden biri olduğu söylenebilmektedir. (Liang et al. 2017)

Pasif Ev standartları temel olarak karasal iklime sahip bölgelerde, ısıtma enerjisi ihtiyacının azaltılmasına yönelik oluşturulmuştur. Son yıllarda soğutma enerjisi tüketiminin büyük önem taşıdığı güney Avrupa ülkelerine yönelik çözümler de geliştirilmeye başlanmıştır.(Eerg 2, Causeone et al. 2017, Hopfe and McLeod 2015) Pasif Ev tasarımının temel prensiplerini; minimize edilmiş veya azaltılmış ısı kayıpları, pasif güneş enerjisi kullanımı, havalandırma ve yaz için güneş kontrolü olarak sıralamak mümkündür. (Schnieders et al. 2020)

Pasif Ev standartları ile bir yıl boyunca bir metrekare yaşam alanını ısıtmak için 1.5 litreden az petrol, 1.5

m<sup>3</sup>'ten az gaz, 15-20 kWh/m<sup>2</sup>'den az elektrik kullanımı hedeflenmektedir (İnt Kyn. 2)

Günümüzde; binaların aktif soğutmaya ihtiyaç duyduğu sıcak iklimlerde de Pasif Ev sistemi ile büyük enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Pasif Ev; güneşi, iç ısı kaynaklarını ve ısı geri kazanımını verimli bir şekilde kullanırken, en soğuk kış aylarında bile geleneksel ısıtma sistemlerini gereksiz kılabilir. Sıcak aylarda ise, Pasif Ev, serinletme için stratejik gölgeleme gibi pasif soğutma tekniklerinden de yararlanmaktadır. (İnt Kyn. 2)

Pasif Ev Enstitüsü'nün yeni binalar için belirlediği kriterler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- Isıtma enerjisi tüketimi yıllık metrekare başına 15 kWh/m<sup>2</sup>'den düşük,
- Soğutma ve nemlendirme enerjisi tüketimi yıllık metrekare başına 15 kWh/m<sup>2</sup> den düşük,
- Birincil enerji (sıcak su, evsel elektrik vb.) tüketimi yıllık metrekare başına 120kWh/m<sup>2</sup>'den düşük,
- Hava geçirmezlik 50 Pa basınç altında saatlik 0,6'dan düşük olmalıdır. (İnt Kyn. 3)

Pasif Ev Enstitüsü'nün mevcut binalar için belirlediği kriterler EnerPHit sertifika sistemi olarak tanımlanmaktadır. (Passipedia 2018.)

## 2.2 EnerPHit Kriterleri

Pasif Ev Enstitüsü'ne göre, mevcut binalarda EnerPHit kriterlerini sağlayabilmek için kullanıcıya iki yöntem alternatifi sunulmaktadır. Bu yöntemler;

Yöntem 1: Yapı bileşeni U değeri yöntemi (Çizelge 1)  
Yöntem 2: Enerji talebi yöntemidir. (Çizelge 2)

EnerPHit sertifikası için bu yöntemlerden sadece birinin kriterlerinin karşılanması gerekmektedir. EnerPHit sertifika sisteminde belirtilen kriterler, yapının bulunduğu iklim bölgesine göre farklılıklar göstermektedir. İklim bölgelerine göre standart sınır değerler Çizelge 1 ve Çizelge 2'de belirtilmiştir.

Pasif Ev Enstitüsü; yapının içinde bulunduğu bölge için iklim sınıflandırmasını; PHPP (Passive House

Planning Packet) iklim verileri sistemi aracılığı ile kullanıcıya belirtmektedir.

**Çizelge 1.** Yöntem 1; yapı bileşeni U değeri yöntemi (Passipedia 2018.)

PHPP'ye göre iklim bölgesi	Pencere (U-değeri W/(m <sup>2</sup> K)), (g-değeri)	Duvar/Çatı/Zemin (U-değeri W/(m <sup>2</sup> K))	Minimum ısı geri kazanım oranı
Arktik	0.45, U <sup>g</sup> *0.7≤0	0.09	80%
Soğuk	0.65, U <sup>g</sup> *1.0≤0	0.12	80%
Soğuk-ılıman	0.85, U <sup>g</sup> *1.6≤0	0.15	75%
Sıcak-ılıman	1.05, U <sup>g</sup> *2.8≤1	0.3	75%
İlman	1.25, -	0.5	-
Sıcak	1.25, -	0.5	-
Çok sıcak	1.05, -	0.25	-

**Çizelge 2.** Yöntem 2; Enerji talebi yöntemi (Passipedia 2018.)

PHPP'ye göre iklim bölgesi	Isıtma (Maksimum ısıtma talebi) [kwh/(m <sup>2</sup> a)]	Soğutma (Maksimum soğutma ve nemlenme talebi) [kwh/(m <sup>2</sup> a)]
Arktik	35	
Soğuk	30	
Soğuk-ılıman	25	
Sıcak-ılıman	20	PassivHaus kriterlerinde belirtilen değerlere eşittir
İlman	15	
Sıcak	-	
Çok sıcak	-	

Tasarımcı, yapının bulunduğu iklim bölgesi için, yapı bileşeni U değerleri yönteminde (Çizelge 1) belirtilen, opak yapı kabuğu bileşenleri, pencereler, dış kapılar ve havalandırma için sınır değerleri ya da enerji talebi yönteminde (Çizelge 2) belirtilen, maksimum ısıtma ve soğutma talebi sınır değerlerinin koşullarını sağlayarak mevcut yapıyı EnerPHit sertifikasına uygun hale getirebilmektedir.

## 2.3 EnerPHit Sertifikalı Binaların Analizi

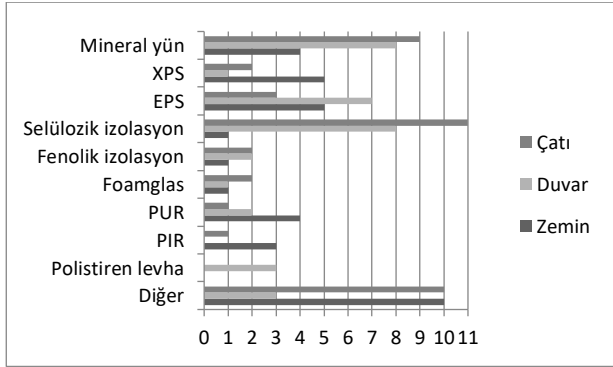
EnerPHit sertifikası kriterleri doğrultusunda; mevcut binalar üzerinde yapılan enerji enerji etkin iyileştirmelerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi amacıyla çalışmanın devamında sertifikalanmış yapıların analizi yapılmıştır. EnerPHit sertifikasının uygulanma teknikleri, malzeme seçimleri, farklı iklim bölgelerindeki seçimlerin analiz edilmesi amacıyla bu bölümde sertifikalı örnekler incelenmiştir. Bu doğrultuda; 2017 yılına kadar EnerPHit sertifikası

almış ve Pasif Ev veritabanında (İnt Kyn. 4) yer almış farklı bölgelerde bulunan yapıların tamamı (34 yapı) bu çalışma kapsamında ele alınmıştır.

EnerPHit sertifikası almış 34 yapı; aşağıdaki parametreler açısından incelenmiştir;

- Yapım yeri,
- Kullanım tipi,
- Duvar yalıtım malzemesi, duvar U-değeri,
- Zemin yalıtım malzemesi, zemin U-değeri,
- Çatı yalıtım malzemesi, çatı U-değeri,
- Pencereler, pencere U-değeri,
- Yıllık metrekare başına ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/(m<sup>2</sup>a)),
- Yıllık metrekare başına birincil enerji ihtiyacı (kWh/(m<sup>2</sup>a)).

İncelenen 34 yapıdan 10'u ABD'de, altısı Almanya'da, beşi İngiltere'de, üçü Fransa'da, ikişer tanesi Avusturya, İrlanda, İspanya ve Japonya'da, birer tanesi de Türkiye ve Avustralya'da bulunmaktadır. İncelenen yapılarda duvar, çatı ve zeminde enerji etkin iyileştirme yapılırken, kullanılan malzemeler ve kullanım sıklığı incelendiğinde pek çok yalıtım malzemesinin kullanıldığı görülmüştür (Şekil 1).



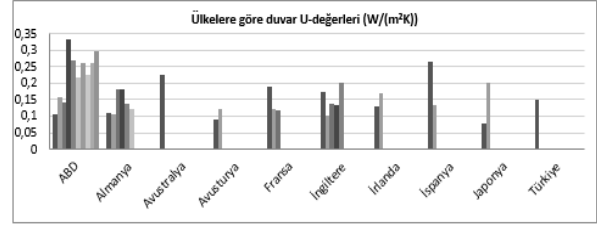
Şekil 1. Çatı, duvar ve zeminde kullanılan yalıtım Malzemesi cinsi ve kullanım sıklığı

Çatı yalıtım malzemesi olarak en yüksek sıklıkta sırasıyla; selülozik izolasyon, mineral yün ve EPS, duvar yalıtım malzemesi olarak en yüksek sıklıkta sırasıyla; selülozik izolasyon, mineral yün, EPS, PUR ve XPS, zemin yalıtım malzemesi olarak en yüksek sıklıkta sırasıyla; XPS, EPS, mineral yün kullanıldığı saptanmıştır. İncelenen yapıların bir kısmında kullanılan yalıtım malzemesi belirtilmemiştir. Bu

yapılar için malzeme seçimleri diğer olarak belirtilmiştir.

Çizelge 3. İncelenen örneklerde ülkelere göre duvar U-değerleri W/(m<sup>2</sup>K)

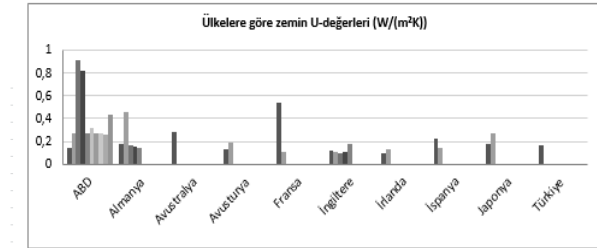
	Ülkelere göre duvar U-değerleri (W/(m <sup>2</sup> K))									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABD	0.106	0.158	0.14	0.332	0.268	0.219	0.259	0.226	0.26	0.296
Almanya	0.11	0.106	0.18	0.183	0.139	0.12				
Avustralya	0.223									
Avusturya	0.089	0.12								
Fransa	0.189	0.121	0.119							
İngiltere	0.173	0.101	0.136	0.132	0.2					
İrlanda	0.13	0.17								
İspanya	0.264	0.132								
Japonya	0.077	0.201								
Türkiye	0.149									



Şekil 2. İncelenen örneklerde ülkelere göre duvar U-değerleri grafiksel gösterimi W/(m<sup>2</sup>K)

Çizelge 4. İncelenen örneklerde ülkelere göre zemin U-değerleri W/(m<sup>2</sup>K)

	Ülkelere göre zemin U-değerleri (W/(m <sup>2</sup> K))									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABD	0.145	0.27	0.91	0.82	0.269	0.314	0.273	0.27	0.26	0.437
Almanya	0.174	0.452	0.169	0.16	0.14					
Avustralya	0.284									
Avusturya	0.128	0.189								
Fransa	0.538	0.108								
İngiltere	0.122	0.105	0.097	0.108	0.18					
İrlanda	0.1	0.131								
İspanya	0.222	0.143								
Japonya	0.178	0.276								
Türkiye	0.169									

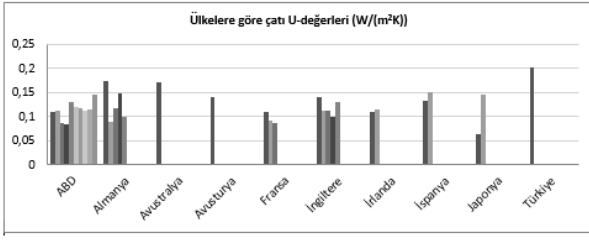


Şekil 3. İncelenen örneklerde ülkelere göre zemin U-değerleri grafiksel gösterimi W/(m<sup>2</sup>K)

Çizelge 5. İncelenen örneklerde ülkelere göre çatı U-değerleri W/(m<sup>2</sup>K)

	Ülkelere göre çatı U-değerleri (W/(m <sup>2</sup> K))									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABD	0.11	0.112	0.086	0.083	0.13	0.12	0.116	0.113	0.114	0.145
Almanya	0.174	0.088	0.117	0.148	0.1					
Avustralya	0.172									
Avusturya	0.141									
Fransa	0.108	0.092	0.086							
İngiltere	0.14	0.112	0.112	0.1	0.13					
İrlanda	0.11	0.115								
İspanya	0.133	0.149								
Japonya	0.063	0.145								
Türkiye	0.201									





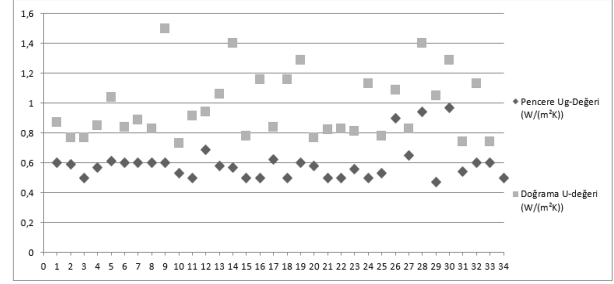
Şekil 4. İncelenen örneklerde ülkelere göre çatı U-değerleri grafiksel gösterimi W/(m²K)

Çizelge 1 ve 2’de gösterilen seçenekli EnerPHit kriterleri (yapı bileşenleri U-değerleri kriterleri ve enerji talebi yöntemi), yapının bulunduğu iklim bölgesine göre seçimler yapılması gerektiğini belirtmektedir. Her ülkenin bulunduğu iklim koşulları ve bu koşullara mekânların enerji etkin ve konforlu adapte edilmesi amacı; ülkelerin malzeme tip seçimlerini, kalınlık seçimlerini, detay çözümlerini, farklı yapı bileşenlerinde ulaştıkları ısı iletkenlik değerlerini farklılaştırmaktadır. Bu nedenle ülkelere ait duvar, zemin ve çatı U-değerleri, Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4’de ve Çizelge 3, Çizelge 4, Çizelge 5’de verilmiştir.

İncelenen yapılarda, duvar, zemin ve çatıda ulaşılan U-değerleri; yapı bileşenine göre ve ülkelere göre farklılık göstermektedir. Ele alınan örneklerde, enerji etkin yenileme sonucunda duvarda ulaşılan en düşük U-değerinin 0,077 W/(m²K) ile Japonya’da, en yüksek U-değerinin ise 0,332 W/(m²K) ile ABD’de olduğu görülmektedir. Zeminde enerji etkin iyileştirme kapsamında yapılan yalıtıma bakıldığında ise; en düşük U-değerinin 0,097 W/(m²K) ile İngiltere’de, en yüksek U-değerinin ise 0,91 W/(m²K) ile ABD’de olduğu görülmektedir. İncelenen örnekler kapsamında çatıda, yapılan iyileştirme sonucunda ulaşılan en düşük U-değerinin 0,063 W/(m²K) ile Japonya’da, en yüksek U-değerinin 0,201 W/(m²K) ile Türkiye’de olduğu görülebilmektedir.

İncelenen örneklerin tamamı göz önünde bulundurulduğunda; yalıtım kalınlığının en çok arttığı, dolayısıyla U-değerinin en az olduğu yapı bileşeninin çatı olduğu saptanmıştır. Bu açıdan bakıldığında, yapılan yalıtımın kalınlığı sırasıyla; zemin, duvar ve çatıda arttığı görülmektedir. Örneklerde genel olarak; yalıtımın en az düzeyde

kullanıldığı yapı bileşeni olan zeminde; duvar ve çatıya kıyasla daha yüksek U-değerlerine ulaşıldığı saptanmıştır.

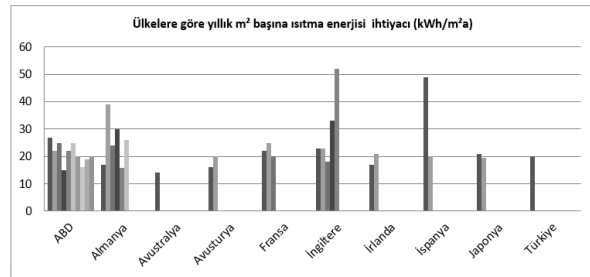


Şekil 5. İncelenen örneklerde pencere cam ve doğramalarına ait U-değerleri (W/(m²K))

İncelenen yapıların tamamı göz önüne alındığında; pencerelerde kullanılan cam Ug-değerinin büyük bir çoğunlukta 0,5 W/(m²K) ile 0,6 W/(m²K) arasında, yapıların sadece üçünde 0,8 W/(m²K)’ in üstünde olduğu saptanmıştır. Pencerelerin tamamının üçlü cam, birçoğunun Argon dolgulu seçildiği görülmektedir. Yüksek yalıtımlı, hava sızdırmaz, düşük U-değerli pencere seçimleri ile saydam yüzeylerde oluşan ısı kaybının önüne geçilebilmiştir.

Çizelge 6. İncelenen örneklerde yıllık m² başına ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m²a)

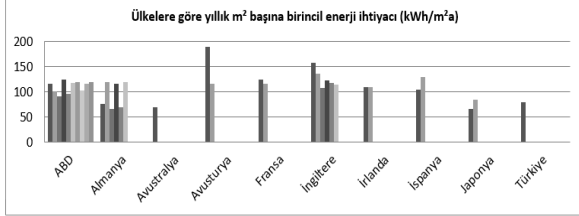
	Ülkelere göre yıllık m² başına ısıtma enerjisi ihtiyacı (kWh/m²a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABD	27	22	25	15	22	25	20	16	19	20
Almanya	17	39	24	30	15,7	26				
Avustralya	14									
Avusturya	16	20								
Fransa	22	25	20							
İngiltere	23	23	18	33	52					
İrlanda	17	21								
İspanya	49	20								
Japonya	21	19,5								
Türkiye	20									



Şekil 6. İncelenen örneklerde yıllık m² başına ısıtma enerjisi ihtiyacı grafiksel gösterimi (kWh/m²a)

**Çizelge 7.** İncelenen örneklerde yıllık m<sup>2</sup> başına birincil enerji ihtiyacı (kWh/m<sup>2</sup>a)

	Ülkelere göre yıllık m <sup>2</sup> başına birincil enerji ihtiyacı (kWh/m <sup>2</sup> a)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABD	117	102	92	125	96	118	119	103	117	120
Almanya	77	119	67	117	70	120				
Avustralya	69									
Avusturya	190	116								
Fransa	124	117								
İngiltere	158	136	108	123	118	114				
İrlanda	109	109								
İspanya	105	130								
Japonya	66	85								
Türkiye	79									



**Şekil 7.** İncelenen örneklerde yıllık m<sup>2</sup> başına birincil enerji ihtiyacı grafiksel gösterimi (kWh/m<sup>2</sup>a)

Çatı, duvar, zemin, pencerelerde EnerPHit sertifikası kriterleri doğrultusunda yapılan enerji etkin iyileştirmelere dair çözümler incelendikten sonra, yapılan iyileştirmelerin enerji tüketimine etkisi ve ulaşılan tüketim değerleri Şekil 6, Şekil 7 ve Çizelge 6, Çizelge 7’de belirtilmiştir. İncelenen EnerPHit sertifikalı yapılarda, ülkelere göre metrekare başına yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı en düşük 14 kWh/(m<sup>2</sup>a) ile Avustralya’da iken, en yüksek 52 kWh/(m<sup>2</sup>a) ile İngiltere’de görülmektedir. Metrekare başına yıllık toplam birincil enerji ihtiyacı ise en düşük 66 kWh/(m<sup>2</sup>a) ile Japonya’da, en yüksek 190 kWh/(m<sup>2</sup>a) ile Avusturya’da görülmektedir. Türkiye’de bulunan tek EnerPHit yapısında ise metrekare başına yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacının 20 kWh/(m<sup>2</sup>a), toplam birincil enerji ihtiyacının ise 79 kWh/(m<sup>2</sup>a) olduğu görülmekte ve bu değerler ile enerji tüketiminde yapılan tasarruf bakımından ülkeler arasında iyi bir konumda yer almaktadır. Ancak Türkiye’de EnerPHit sertifikasına sahip sadece bir örnek bulunmaktadır.

## 2.4 Mevcut Bir Bina İçin Uygulama

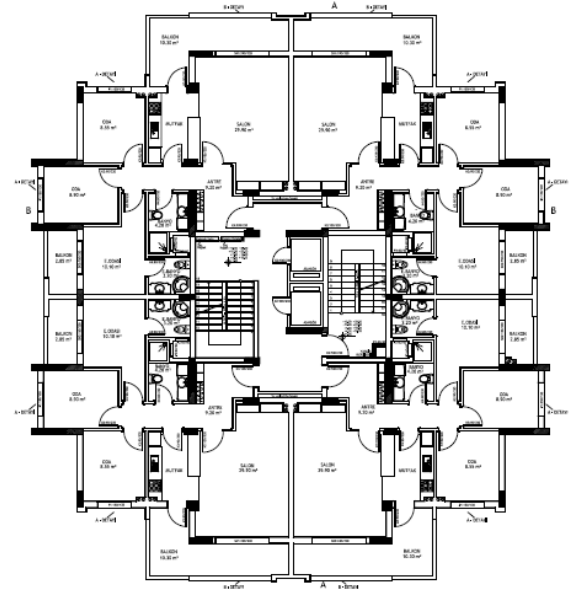
İzmir Karşıyaka’da bulunan 8 katlı, 36 dairesel bir bina, EnerPHit U-değerleri sınır değerleri uygulaması için seçilmiştir. Seçilen apartman yapısının her katında dört ayrı mesken bulunmaktadır. Her bir bağımsız meskenin kullanım alanı 82 m<sup>2</sup>’dir.

Seçilen binanın planı, önce Autocad programı ile 2 boyutlu düzenlemeler yapılarak Design Builder programında kullanılmak amacıyla hazırlanmış, ardından Design Builder programı ile modeli oluşturulmuştur.

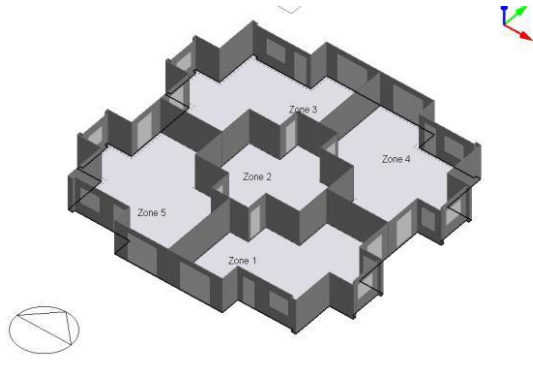
**Çizelge 8.** Çalışmanın uygulaması amacıyla seçilen binaya ait bilgiler

### Uygulama amaçlı seçilen binaya ait bilgiler ve özellikler

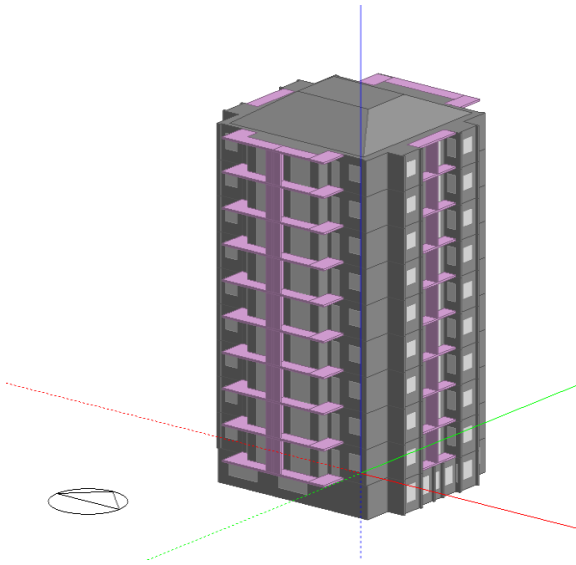
<b>Bina tipi</b>	Apartman
<b>Konum</b>	Karşıyaka, İzmir, Türkiye
<b>Yapım yılı</b>	2012
<b>Toplam kullanım alanı</b>	2952 m <sup>2</sup>
<b>Dış duvarlar</b>	U-değeri 2,261 W/m <sup>2</sup> K
<b>Çatı</b>	U-değeri 2,149 W/m <sup>2</sup> K
<b>Zemin</b>	U-değeri 1,575 W/m <sup>2</sup> K
<b>Pencereler</b>	U-değeri 1,96 W/m <sup>2</sup> K
<b>Mekanik havalandırma</b>	-
<b>Isıtma</b>	Doğalgaz
<b>Soğutma ve birincil enerji ihtiyacı</b>	Elektrik
<b>Isıtma enerjisi ihtiyacı</b>	51,08 kWh/m <sup>2</sup> (yıllık)
<b>Birincil enerji ihtiyacı</b>	234,87 kWh/m <sup>2</sup> (yıllık)



**Şekil 8.** Seçilen binanın kat planı



Şekil 9. Seçilen binanın Design Builder modelinde plan aksonometrisi



Şekil 10. Seçilen binanın Design Builder modeli

Model oluşturulduktan sonra sırasıyla aşağıdaki yöntem izlenmiştir;

- İzmir iklim verilerini yükleme,
  - Modelin yapı malzemelerini atama,
  - Modelde kullanıcı alışkanlıklarının girdisini oluşturma,
  - Yapının 24 saat içerisindeki (hafta içi, cumartesi ve pazar günleri ayrı ayrı) aydınlatma senaryosunu oluşturma,
  - Yapının 24 saat içinde doluluk senaryosunu oluşturma (hafta içi, cumartesi ve pazar günleri ayrı ayrı),
  - Yapının ısıtma ve soğutma sistemlerini belirleme.
- Yukarıda belirtilen adımlar tamamlanarak modelin simülasyonu yapılmış ve yapının mevcut halinin ve EnerPHit U-değerleri yönteminde belirtilen sınır

değerler çerçevesinde iyileştirilmiş halinin enerji tüketim değerlerine ulaşılmıştır.

### 3. Bulgular

Çalışmada kullanılan binanın mevcut ve iyileştirilmiş durumuna ait malzeme katmanları ve U-değerleri Çizelge 9'da gösterilmektedir. Yapının mevcut ve iyileştirilmiş durumu, Design Builder programı ile modellenip simülasyonu yapılmış ve enerji ihtiyacı değerlerine ulaşılmıştır. (Çizelge 10)

Çizelge 9. Yapının mevcut ve iyileştirilmiş durumuna ait malzeme katmanları

	Dış Duvar	Çatı	Zemin	Pencere
<b>Mevcut yapı</b>	2 cm. Sıva 19 cm. Dolu tuğla 2 cm. Sıva	2.5 cm. Kiremit 0.5 cm. Membran Hava boşluğu 12 cm. Betonarme Döşeme 2 cm. Sıva	2 cm. Mermer 3 cm. Şap 50 cm. Betonarme 0.5 cm. Membran 10 cm. Grobeton	4+12+4 (Hava dolgulu)
<b>U-değeri</b>	2,261 W/m <sup>2</sup> K	2,149 W/m <sup>2</sup> K	1,575 W/m <sup>2</sup> K	1,96 W/m <sup>2</sup> K
<b>İyileştirilmiş yapı</b>	2 cm. Sıva 12 cm. EPS 19 cm. Dolu tuğla 2 cm. Sıva	2.5 cm. Kiremit 0.5 cm. Membran 0.5 cm. Ahşap levha Hava boşluğu 11 cm. Cam yünü 12 cm. Betonarme Döşeme 2 cm. Sıva	2 cm. Mermer 3 cm. Şap 8 cm. XPS 50 cm. Betonarme 0.5 cm. Membran 10 cm. Grobeton	Isıcam 4+16+4+16+4 (Argon) K
<b>U-değeri</b>	0,254 W/m <sup>2</sup> K	0,287 W/m <sup>2</sup> K	0,294 W/m <sup>2</sup> K	0,6 (W/m <sup>2</sup> K)

Çizelge 10. Yapının mevcut ve iyileştirilmiş durumuna ait enerji ihtiyacı

	Toplam Birincil Enerji İhtiyacı kWh	Toplam Isıtma Enerjisi İhtiyacı kWh	m <sup>2</sup> için Birincil Enerji İhtiyacı kWh/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> için Isıtma Enerjisi İhtiyacı kWh/m <sup>2</sup>
<b>Mevcut yapı</b>	837166,26	182086,50	234,87	51,08
<b>İyileştirilmiş yapı</b>	425578,83	66158,62	119,40	18,56
<b>Tasarruf</b>			49%	63%

Bu aşamada yapının birincil enerji ihtiyacı ve ısıtma enerjisi ihtiyacının iyileştirme öncesi ve sonrası değerleri karşılaştırılmıştır. EnerPHit sertifikası U-değerleri kriterleri asgari düzeyde bir apartman yapısında karşılandığında elde edilen birincil enerji ihtiyacı tasarrufu %49 ve ısıtma enerjisi ihtiyacı tasarrufu ise %63 olmuştur. Belirtilen tasarruf miktarları; yalıtımın düzeyi, yapı tipi, iklim bölgesi, kullanıcı senaryosu, opak ve saydam yüzey alanı, yapının yönlenmesi gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilecektir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Türkiye’de Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği öncesinde yapılan yapıların büyük çoğunluğunun, enerjinin etkin ve verimli kullanılmadığı yapılar olduğu bilinmektedir. Mevcut yapılarda yapılacak enerji etkin iyileştirmelerin, ülke genelinde en yüksek tüketim payının binalarda olduğu düşünüldüğünde etkisinin hızlı ve büyük olacağı görülmektedir. İyileştirme EnerPHit gibi sertifika sistemleri çerçevesinde yapıldığında ise yaklaşık %50-%60 oranında tasarruf sağladığı, aktif sistemler ile desteklendiğinde ise %100’e varan tasarruf sağlayabileceği öngörülebilmektedir. “Konut sektöründeki enerji tüketiminin %70 oranında azaltılması 12 milyon TEP enerji tasarruf edilmesi demektir, bu durumda enerji istatistiklerinde verilen fiyatlara göre yıllık enerji faturasında 6 milyar ABD doları tasarruf sağlanmış olmaktadır.” (Dilmac ve Tırıs bt.) Avrupa Birliği tarafından yayınlanan Binalarda Enerji Performansı Direktifi doğrultusunda ülkeler kendi NZEB hedeflerini belirlerken; düşük enerji tüketimi, yaşam döngüsü sürecinde maliyet etkinlik, fosil yakıt tüketiminde ve karbon salımında önemli ölçüde azalma sağlayan yöntemlerin kullanılması ve geliştirmesini esas almışlardır. Pasif Ev ve mevcut yapılarda kullanılan versiyonu olan EnerPHit sertifika sistemi de ülkelerin çoğunun belirlediği enerji tüketimi değerlerini karşılayan bir sertifika sistemi olarak binalarda artan bir hızla kullanılmaya başlanmış ve sertifikalanmış yapı sayısında hızlı bir artış olmuştur.

Türkiye’de de Avrupa Birliği’ne uyum sürecinde; yeni yapıların enerji tüketimi açısından belirli sınır değerler çerçevesinde inşa edilmesi, mevcut yapıların kısa sürede EnerPHit sertifika sistemi doğrultusunda iyileştirilmesi, örneklerde de görüldüğü gibi enerji tüketim değerlerini büyük oranda düşürebilecektir. İncelenen örneklerle ve Türkiye’deki örneğe bakıldığında, ülkemizde yaygın kullanıma sahip XPS, mineral yün, EPS gibi yalıtım malzemelerinin büyük oranda tercih edildiği, dolayısıyla ülkemizde yalıtım malzemesi temini açısından da uygulanabilirliğinin olduğu görülebilmektedir.

Türkiye’deki yapı tipinin yaklaşık %87’sini oluşturan konutlarda, mevcut yapıların EnerPHit doğrultusunda iyileştirilmesi, bina sektörünün enerji tüketimini ve karbon salımını büyük oranda azaltacaktır. Enerjinin etkin ve verimli kullanılması ile gelecek nesillere sağlıklı bir dünya bırakmak konusunda çok büyük bir adım atılmış olurken, ülkenin enerji konusundaki dışa bağımlılığı azaltılmış, dünya enerji görünümüne uyum sağlanmış, daha düşük kullanım maliyetleri ile daha konforlu bir yaşam kazanılmış olacaktır. EnerPHit sertifika sisteminin Türkiye’de mevcut yapılarda kullanımının artmasıyla birlikte,

- Binalarda enerji tüketimi büyük oranda azalacak,
- Kullanım süresince enerji maliyetleri azalacak,
- Enerji maliyetlerinin azalması ile birlikte; kullanıcıların tasarruf için seçtiği yöntemlerden birisinin binalarda ısıtma-soğutma olmasının önüne geçilip daha konforlu mekânlarda yaşamın devam etmesi sağlanacak,
- Gelecek nesillere sağlıklı ve yaşanabilir bir dünya bırakmak konusunda çok büyük bir adım atılmış olacak,
- Fosil yakıt tüketimi ve karbon salımı azalmış olacak,
- Enerjide dışa bağımlılık azaltılmış olacaktır.

Binalarda enerjinin etkin ve verimli kullanılmasını, mevcut konfor koşullarının iyileştirilmesini, yakıt tüketiminin büyük oranda azaltılmasını sağlayan EnerPHit sertifika sisteminin, ülkemizde bilinirliğinin ve sertifikalı yapıların yaygınlaşmasının arttırılması hedeflenerek çalışmalar yapılması önerilmektedir. İlerleyen dönemlerde yapılacak çalışmalarda;

EnerPHit sertifika sisteminin ilk yatırım maliyeti, ilk yatırım maliyetinin geri dönüş süresi, yaşam döngüsünde enerji tasarrufuna katkısı gibi konular, bilimsel çalışmalar ile ortaya konmalı, faydaları ve etkinliği tartışılmalıdır. Türkiye’de binalarda enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik uygulamaların arttırılması amacıyla kullanıcılara; seçenekler, yöntemler, ilk maliyetler ve uzun vadede elde edilecek enerji tasarrufu konularında bilgi aktarımının yapılması gerekmektedir. Bu çalışma EnerPHit sertifika sisteminin, Türkiye’deki bina sektöründeki enerji verimliliğine potansiyel katkısını

incelemek ve uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla ortaya konmuştur.

## 5. Kaynaklar

Aşıkoğlu, A. 2014. Sürdürülebilir konut yapılarında pasif sistemlerin kullanılan teknikler açısından irdelenmesi; İzmir ili için bir uygulama önerisi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 222.

Aşıkoğlu, A., Altın, M. 2016. Passive system techniques used in sustainable buildings. *Proceedings of the 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition*. Afyonkarahisar

Causeone, F., Pietrobon, M., Pagliano, L. and Erba, S. 2017. A high performance home in the mediterranean climate: From the design principle to actual measurements. *Energy Procedia*, **140**, 67-79.

Cotterel, J. and Dadeby, A., 2014. The Passivhaus handbook. Devon: Green Books, 44-46.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2020. <https://cevresel.gostergeler.csb.gov.tr/sektorlere-goretoplam-enerji-tuketimi-i-85800> (Erişim tarihi: 7.01.2021)

Dilmac, Ş. ve Tırıs, M., b.t.. Türkiye’de konut sektöründe enerjitasarrufu. [http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/d616dd38211ebb5\\_ek.pdf?%20dergi=160](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/d616dd38211ebb5_ek.pdf?%20dergi=160) (Erişim tarihi: 27.05.2021)

ECOFYS, 2014. Overview of Member States information on NZEBs Working version of the progress report-final report

European Union [EU], 2010. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast).

Eerg., b.t. The Passive-On Project. <http://www.eerg.it/passiveon.org/e/> (Erişim tarihi: 05.12.2020)

Hopfe C.J. and McLeod R.S., 2015. Passivhaus designer's manual: a technical guide to low and zero energy buildings. London: Routledge, 98-101.

Liang, X., Wang, Y., Royapoor, M., Wu, Q. and Roskilly, T., 2017. Comparison of building performance

between Conventional House and Passive House in the UK. *Energy Procedia*. **142**, 1823-1828.

OeEB by Allplan GmbH. 2013. Allplan GmbH Energy Efficiency Potential Country Report: TURKEY. Vienna, AUSTRIA. <https://www.oeeb.at/dam/jcr:e9c73d64-c299-4452-b294-70491d7673f0/OeEB-Study-Energy-Efficiency-Finance-Turkey.pdf> (Erişim tarihi: 05.05.2021)

Passipedia, 2018. <https://passipedia.org> (Erişim tarihi: 05.12.2020)

Schnieders, J., Eian, T.D., Filippi, M., Florez, J., Kaufmann, B., Pallantzas, S., Paulsen, M., Reyes, E., Wassouf, M. and Yeh, S.-C. 2020. Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency*, **13**, 1561-1604

Şenyurt, S. ve Altın, M. 2020. Ofis yapıları için çevreyle uyumlu yapı dış kabuğu tasarım parametrelerinin enerji tüketimine etkisini belirlemede kullanılabilir bir yaklaşım. MEGARON, Cilt:15, 1, 55-66.

ULUSAL ENERJİ VERİMLİLİĞİ EYLEM PLANI, 2017. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/01/20180102M1-1-1.pdf> (Erişim tarihi: 03.01.2021)

Umaroğulları, F., Gedik, G. ve Mıhlayanlar, E., 2011. Periyodik rejimde yalıtımlı ve yalıtımsız betonarme duvarlarda yoğunlaşma denetimi: Edirne örneği. MEGARON, **6**, 13-20.

Yeang, K., 2008. Eko Tasarım. Burçin Yılmaz (editör), İstanbul: YEM Yayınevi, 234-235

Yearbook Enerdata., 2020. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumptionstatistics.html> (Erişim tarihi: 05.12.2020)

Yıldız, Y., Özbalta, T. ve Arsan, Z., 2011. Farklı cam türleri ve yönlere göre pencere/duvar alanı oranının bina enerji performansına etkisi: Eğitim binası, İzmir. MEGARON, **6**, 30-38.

### İnternet kaynakları

1-[https://passiv.de/en/01\\_passivehouseinstitute/01\\_passivehouseinstitute.htm](https://passiv.de/en/01_passivehouseinstitute/01_passivehouseinstitute.htm), (05.12.2020)

2-[https://passivehouse.com/02\\_informations/01](https://passivehouse.com/02_informations/01)

whisapassivehouse/01 whisapassivehous,  
(07.06.2021)

3- https://passipedia.org/certification/enerphit,  
(07.06.2021)

4-https://passivehouseinternational.org/index.php?page\_id=150, (07.06.2021)

5-https://passivehousedatabase.org/index.php?lang=en, (07.06.2021)

## Polimer Katkılı Bitümlü Sıcak Karışımların İzmir Hava Durumu Şartlarındaki Marshall Stabilite Performansının İncelenmesi

Sajjad HASSANPOUR KASANAGH<sup>1</sup>, Perviz AHMEDZADE<sup>2</sup>, Taylan GÜNAY<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

<sup>1</sup> Araştırma ve Geliştirme Merkezi, İstanbul Teknik İnaat Sanayi ve Ticaret A.S., 34235, İstanbul, Turkey

<sup>2,3</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.

<sup>1</sup> Sorumlu Yazare-posta:

<sup>1</sup> sajjad.hassanpour.kasanagh@mail.ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4324>

<sup>2</sup> Perviz.ahmedzade@ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8348-5901>

<sup>3</sup> taylan.gunay@ege.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-6320>

Geliş Tarihi: 01.05.2021

Kabul Tarihi: 25.09.2021

### Öz

Çalışmada, İzmir ili hava şartları dikkate alınarak, Superpave şartnamesine göre, bitümlü sıcak karışımlar (BSK) için uygun bağlayıcı seçim yöntemi incelenmiştir. Bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfını (PG) arttırmak amacıyla stiren-butadien-stiren (SBS) ve etilen-vinil-asetat (EVA) olmak üzere iki farklı elastomer ve plastomer kopolimerleri katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. BSK'nın ana bileşenleri olan orijinal ve polimer katkılı bağlayıcılar ile Superpave gradasyonlu agrega üzerinde çeşitli deneyler uygulanması suretiyle, bitüm ve BSK malzemelerin fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Marshall karışım numuneleri hazırlanarak orijinal bağlayıcının karışımdaki optimum içeriği belirlenmiş ve ardından polimer katkılı karışımlar hazırlanarak Marshall stabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı polimer katkılı BSK'ların İzmir ilinin iklim şartlarındaki performansının incelenmesidir. İki polimerin de deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde SBS katkılı karışımların İzmir ili yollarında kullanmaya daha uygun olabileceği tespit edilmiştir.

### Anahtar kelimeler

Bitüm; Agrega;  
Polimer; Bitümlü Sıcak  
Karışım; Marshall;  
Stabilite

## Investigation of Marshall Stability Performance of Polymer Modified Hot Mix Asphalt Under İzmir Weather Conditions

### Abstract

In this study, the determination of binder based on Superpave method considering the weather condition of state of İzmir were investigated. In order to enhance high temperature performance grade (PG) of the binder, two different copolymer namely styrene-butadiene-styrene (SBS) elastomer and ethylene vinyl acetate (EVA) plastomer were employed. The physical properties of the original and polymer modified asphalt binders and Superpave-graded aggregates, which are the main components of hot mix asphalt (HMA), were determined by means of multiple experiments. The optimum content of the original binder was determined by Marshall stability test. The comparison between the results that belong to two different polymer modified binders, it can be said that the mixtures with SBS additives is more suitable for using in flexible pavement roads of İzmir province.

### Keywords

Bitumen, Aggregate;  
Polymer; Hot Mix  
Asphalt; Marshall;  
Stability

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Giriş

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bağlayıcı ve mineral agregadan oluşan asfalt kaplama malzemesidir. Asfalt çimentosu veya modifiye asfalt çimentosunda rol alan bitüm, agrega taneciklerini kohezif bir kütleyle dönüştürmek için bir bağlayıcı madde görevi yapmaktadır. Bunun yanı sıra bitümün su

geçirmezliği aynı zamanda BSK'ları da suya karşı dirençli hale getirmektedir (Ameri *et al.* 2016, Behnood 2020). Mineral agrega asfalt bağlayıcıyla birleştiğinde, sisteme güç ve dayanıklılık kazandırarak bir taş iskeleti oluşturur. Karışımın davranışı, bileşenlerin (asfalt bağlayıcı ve mineral agrega) birebir özelliklerinden ve sistemde



birbirleriyle nasıl etkileşim gösterdiklerinden etkilenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ve ağır trafik seviyelerinde, kaplama yapısının performansını ve ekonomisini etkileyen çeşitli bozulmalar ortaya çıkmaktadır. Yorulma çatlakları, tekerlek izi, nem hasarı ve termal çatlakları gibi bozulmalar esnek kaplamalarda meydana gelen en önemli sorunlardır. Bu sorunlar çoğu zaman yapı malzemesi kalitesi, yetersiz bakım ve yanlış tasarım nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

Asfalt bağlayıcının modifikasyonu, kaplama performansını iyileştirmek için alınan bir yaklaşımdır. Günümüzde, polimerlerin eklenmesi bağlayıcı modifikasyonun en yaygın yöntemlerinden biridir. Polimer modifiyeli BSK'lar tekerlek izini azaltmada ve yorulma ve termal çatlak direncini arttırmada etkisini önemli ölçüde göstermiştir (Almusawi *et al.* 2020, Köfteci *et al.* 2020, Sadeghian *et al.* 2019).

Bağlayıcının modifikasyonunda elastomerler ve plastomerler olmak üzere iki ana polimer sınıfı kullanılmaktadır. Elastomerler, adından da anlaşılacağı gibi, asfalt bağlayıcının düşük sıcaklıklarda elastikiyetini, yüksek sıcaklıklarda stabilitesini artırma ve düşük sıcaklıkta asfalt betonunun kopma gerilimini artırma eğilimindedir. Asfalt bağlayıcıyı modifiye etmek için kullanılan tipik elastomerik polimerler arasında stiren-butadien-stiren (SBS), stiren-izopren-stiren (SIS) ve lastik tozu (GTR) gibi polimerler ve kopolimerler yer almaktadır (Airey 2003, Behnood and Olek 2017, Galooyak *et al.* 2010, Polacco *et al.* 2006, Vargas *et al.* 2005). Plastomerler ise sertliği ve stabilitesi artırmakta ancak karışımın esnekliğinde sınırlı şekilde artış sağlamaktadır. Plastomer, erime sıcaklıklarında plastik veya viskoz bir şekilde deforme olan ve düşük sıcaklıklarda sertleşen bir polimer grubudur. Başka bir ifadeyle, Plastomerler bitümün viskozitesini ve sertliğini arttırmaktadır. Etilen-vinil-asetat (EVA), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi polimerler bağlayıcı modifikasyonunda kullanılan en yaygın plastomerdir ve polimer modifiyeli BSK uygulamalı asfalt kaplamaları geleneksel karışımlara göre daha sert hale getirerek etkilemektedir (Ahmedzade *et al.* 2014, Ahmedzade *et al.* 2017, Sengoz *et al.* 2009, Zhu *et al.* 2014).

Günümüzde Türkiye'de de asfalt kaplamalarda polimer ile modifiye edilmiş bağlayıcılar kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, asfalt kaplamanın sıcaklık değişikliklerine göre bahsi geçen bozulmalara maruz kalmasını önlemek için Superpave yöntemiyle belirlenen yüksek sıcaklık performans sınıfları (PG) aracılığıyla bağlayıcı seçilmektedir. Bu yöntemde, farklı bölgelerde değişik iklim koşulları ve hava durumuna göre bağlayıcı seçimi gerçekleştirilmektedir. Diğer yandan, orijinal bağlayıcıların PG sınıfı kullanacağı bölgenin şartlarında Superpave yöntemine göre seçilirse bile yüksek sıcaklıklarda karışımın stabilitesi ve kalıcı deformasyona karşı direnci yeterli olmayabilir.

Mevcut araştırmada, karışımda kullanılan bağlayıcının PG sınıfı seçimi İzmir ilinin son 20 yıldaki hava durumuna göre Superpave yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve seçilen orijinal bağlayıcı sınıfı Marshall deneyiyle BSK'daki optimum içeriği bulunmuştur. Bunun ardından, orijinal bağlayıcının asfalt kaplamanın bozulmalara karşı performansını arttırmak amacıyla SBS ve EVA kopolimerleri kullanmıştır. Böylece bağlayıcının PG sınıfı iki sınıf daha üst seviyeye taşınmıştır. Dolayısıyla araştırmanın hedefi, İzmir hava durumu şartlarında uygun bağlayıcı seçimi ve seçilen bağlayıcının BSK içerisindeki etkisini artırma amacıyla asfalt kaplamanın stabilitesini arttırması ve bu şekilde yüksek sıcaklıklardaki bozulmaları önlemiş olmasıdır.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 Bitüm ve Katkı Malzemesi**

Çalışmada Türkiye'nin TÜPRAŞ A.Ş. rafinerisinden elde edilen 50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitüm bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. LCY grubu tarafından üretilen Globalprene 3501 markalı stiren-butadien-stiren (SBS), doğrusal ve blok yapıya sahip co-polimerdir. Yüksek dayanıklılık sağlamasından dolayı asfalt karışımlarında bitümde modifiyer olarak kullanılmıştır. Beyaz renkli ve granül şeklinde olan katkının kimyasal bileşimi stiren-butadien-stiren, birim hacim ağırlığı 0,20 – 0,45 g/cm<sup>3</sup>'tür. ASTM D792 standardına göre özgül

ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen SBS katkısının görünümü Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Stiren-butadien-stiren (SBS) katkısı

Bitüm modifikasyonunda kullanılan diğer polimer katkısı ise DuPont firması tarafından üretilen Elvax®420, ağırlıkça %18 vinil asetat komonomer içeriğine sahip bir etilen-vinil-asetat (EVA) kopolimerdir. Şeffaf renkli ve granül şeklinde olan katkının yumuşama noktası 53 °C'dir. ISO 1183 standardına göre özgül ağırlığı 0,94'tür. Çalışmada referans olarak seçilen EVA katkısının görünümü Şekil 2'de verilmiştir.

## 2.2 Agregada Malzemesi

Çalışmada, optimum bitüm yüzdesini belirlemek için Marshall karışım tasarımı kullanılmıştır. Çizelge 1'de verilen agregada gradasyonu için, B50/70 penetrasyon sınıfına sahip bitümlerin her biri için üçer Marshall numunesi hazırlanmıştır. Her karışım numunesi için agregada miktarı 1200 gr olarak hazırlanmış ve bitüm ağırlıkça 5 farklı yüzde de agregada eklenmiştir.

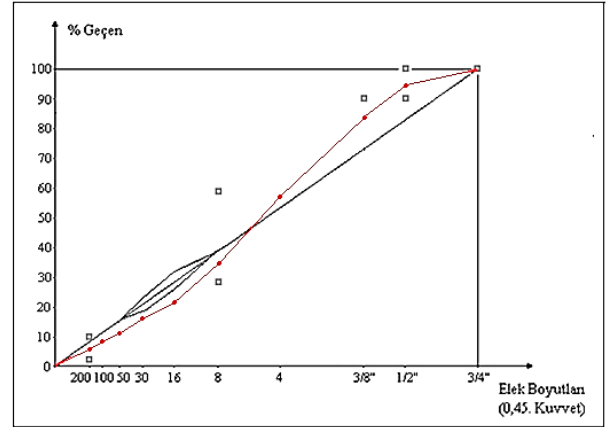
Dere Beton A.Ş.'den temin edilen kalker türü agregada Marshall numunelerinin hazırlanması için kullanılmıştır. Agregada gradasyonu limiti grafiği Şekil 3'te verilmiştir (Mohammad *et al.* 2006).



Şekil 2. Etilen vinil asetat (EVA) katkısı

Çizelge 1. Kullanılan agregada ait Superpave gradasyonu

Elek No	Elekten Geçen, (%)	Elekte Kalan, (%)	Elekte Kalan, (gr)	Toplam Elekte Kalan, (gr)
19 mm (3/4")	100	0	0	0
12,5 mm (1/2")	94	6	72	72
9,5 mm (3/8")	84	16	120	192
No: 4	58	42	312	504
No: 8	35	65	276	780
No: 16	22	78	156	936
No: 30	16	84	72	1008
No: 50	12	88	48	1056
No: 100	8	92	48	1104
No: 200	5	95	36	1140
Filler	-	-	60	1200



Şekil 3. Kullanılan agregada gradasyonu limiti grafiği

## 2.3 Marshall stabilite deneyi

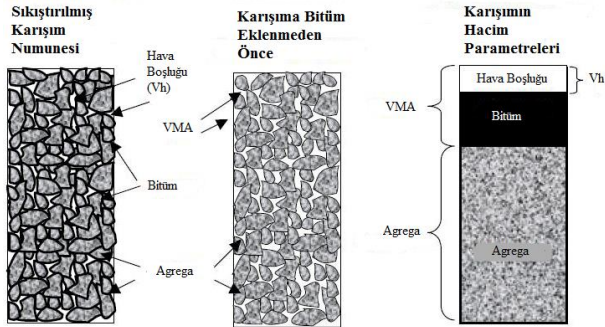
Elek analizi yapıldıktan sonra farklı boyutlara sahip agregada gradasyonu göre tartılarak metal bir plakaya yerleştirilmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 160 °C'ye ulaşacak şekilde etüv de bekletilmiştir. Bunun ardından akacak şekilde ısıtılan bitüm agregada ağırlıkça %3,5; %4; %4,5; %5; %5,5 olarak ilave edilmiştir. Bir sonraki aşamada, numunelerin sıcaklığı fazla düşmeyecek şekilde mikserde birer dakika karıştırılmıştır.

Karışım daha sonra yaklaşık 145-150 °C'de önceden ısıtılmış kalıplara yerleştirilmiş. Yağlı filtre kağıtları kalıbın altına ve üstüne konulmuş ve Marshall sıkıştırma tokmağı 457,2 mm yükseklikten ve 4,5 kg'lık bir çekiç kullanılarak numunenin üst ve alt yüzeylerine standarda göre (trafik seviyesine göre) 75 darbe uygulanmıştır. Kalıplardaki karışım numuneleri yaklaşık 24 saat bekletilmiş ve daha sonra kalıptan çıkarma aletine yerleştirerek çıkarılmıştır. Daha sonra numunelerin yükseklikleri bir kumpas kullanılarak 3'er taraftan ölçülmüş ve ortalaması numunenin yüksekliği olarak kaydedilmiştir.

Yükseklikleri ve gerekli ağırlıkları alınan numunelerin stabilite ve akma değerlerinin tayini için numune  $60 \pm 1$  °C suda 30–40 dakika bekletilmiştir. Sudan çıkarılan numune elektronik Marshall yükleme aletine yerleştirilmiş, akma çubuğu sabitlenmiş ve yükleme uygulanmıştır (Şekil 4). Marshall stabilitesi ve akışı, ASTM D1559-89’da anlatılan prosedüre uygun olarak her numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. 30-40 dakikalık bir süre boyunca  $60 \pm 1$  °C’lik bir su banyosunda bekletildikten sonra dakikada 50,8 mm’lik bir yükleme hızı ile kırıldığında sıkıştırılmış numune üzerindeki maksimum yük (Marshall stabilitesi) ve akış hızı belirlenmiştir. Örnek bir karışımın içeriğini temsil eden Marshall numunesi Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 4. Marshall stabilite aleti



Şekil 5. Örnek bir karışım içeriğini temsil eden Marshall numunesi

Yüklemeye, en yüksek yük değerine ulaşıncaya kadar devam edilir. En yüksek yük değeri ve buna karşılık gelen akma değeri aletin ekranından okunarak kaydedilir. Marshall stabilite deneyinde standart numune yüksekliği 63,5 mm’dir. Bu değerden farklı yükseklikte olan numunelerin stabilite değerleri düzeltme katsayıları ile çarpılarak düzeltilir. Aynı bitüm yüzdesindeki üç numunenin düzeltilmiş stabilite değerleri arasındaki farkın 120

kgf’den az olması durumunda üçünün ortalaması Marshall stabilitesi olarak alınır. Eğer fark bu değerden büyük ise, aralarında 60 kgf’den daha az fark olan iki değer ortalaması Marshall stabilitesi olarak belirlenir. Bu da sağlanmadığı takdirde deneyin yeniden uygulanması gerekmektedir (ASTM D1559 1989).

### 3. Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

#### 3.1 Orijinal Bitümün Superpave Yöntemiyle Performans Sınıfı (PG) Seçimi

Çalışmada, BSK’da kullanılacak bitümün performans sınıfı (PG) İzmir il bölgesinin hava durumuna göre seçilmiştir. İzmir Meteoroloji İl Müdürlüğü’nden temin edilen son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük hava sıcaklığının ortalaması ve toplam 20 yıldaki elde edilen hava sıcaklığının ortalaması 38°C ve her yılın en düşük bir günlük hava sıcaklık değerlerinin ortalaması -4°C olarak belirlenmiş ve çalışmada esas alınmıştır. Ayrıca, İzmir’in enlem derecesi 38°41 olarak kullanılmıştır.

Superpave yöntemine göre, kaplama yüzeyinden 20 mm derinlikteki kaplama yüksek dizayn sıcaklığı ( $T_{20mm}$ ) Denklem (1) ve kaplama yüzeyi düşük dizayn sıcaklığı ( $T_{min}$ ) Denklem (2) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$T_{20mm} = (T_{havamaks} - 0,00618E^2 + 0,2289E + 42,2) \times (0,9545) - 17,78 \quad (1)$$

$$T_{min} = 0,859T_{havamin} + 1,17 \text{ °C} = 0,859 \times (-4) + 1,17 = -2,27 \text{ °C} \quad (2)$$

Buna göre, son 20 yıldaki her yılın en yüksek 7 günlük sıcaklık periyotlarının aritmetik ortalaması (140 değer) alınarak yüksek hava sıcaklığı ve en düşük 1 günlük sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması (20 değer) alınarak düşük hava sıcaklık değerleri belirlenmiş ve her iki sıcaklık değerinin standart sapması hesaplanmıştır (Geçkil 2008). Superpave SHRP yöntemine göre hesaplanan yüksek ( $T_{20mm}$ ) ve düşük ( $T_{min}$ ) hava sıcaklıklarının değeri ve standart sapması Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Kullanılan agregaya ait Superpave gradasyonu

Özellikler	Yüksek Sıcaklık	Düşük Sıcaklık
Ortalama Sıcaklık (°C)	58,46	-2,27
Standart Sapma (°C)	2	2

Bunun yanı sıra yukarıda Superpave yöntemiyle %50 güvenilirlik derecesinde hesaplanmış kaplama dizayn performans belirlenmesindeki sıcaklıkların %98 güvenilirlik değerleri sapma değerleri Denklem (3) ve Denklem (4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$T_{20mm\%98} = T_{20mm\%50} + 2S_{maks} = 58,46 + 2 \times 2 = 62,46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(3)

$$T_{\min\%98} = T_{\min\%50} + 2S_{\min} = -2,27 + 2(-2) = -6,27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(4)

Superpave şartnamesine belirtildiği üzere bağlayıcı seçimindeki sıcaklık %98 güvenilirliği sağladığında bir üst sınıf sıcaklık grubu olan PG 64-12 veya PG 64-18 olarak seçilmiştir. Ancak mevcut çalışmada Marshall stabilite deneyi esas alındığından, bitüm ve karışımın yüksek sıcaklık performansı dikkate alınarak bitümlü bağlayıcının yüksek sıcaklık PG sınıfı dikkate alınmıştır.

### 3.2 Bağlayıcı Üzerinde Uygulanan Fiziksel ve Reolojik Deneyler

Çalışmada İzmir ilinin iklim koşulları esas alınarak yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64 olan bitüm orijinal bağlayıcı malzeme olarak BSK numunelerinde kullanılmıştır. Bunun yanı sıra asfalt kaplamalarda tekerlek izi ve yorulma gibi bozulmaların oluşmasını önlemek ve BSK'ların stabilitesini arttırma amacıyla bağlayıcı modifikasyonunda yaygın olarak kullanılan SBS ve EVA polimer katkıları optimum miktarlarda bağlayıcı modifikasyonunda kullanılarak sırasıyla SBS-PG76 ve EVA-PG76 deneylere tabi tutulmuştur. Böylece polimer katkılı BSK'ların karşılaştırmalı şekilde orijinal BSK üzerinde etkisi incelenmiştir.

BSK'lara önemli ölçüde etkisi olduğundan hem orijinal ve hem polimer modifiyeli bağlayıcıların üzerinde farklı fiziksel ve reolojik deneyler gerçekleştirilerek şartnamelerinin kriterleri göz önünde bulundurularak Çizelge 3'te listelenmiştir (Hassanpour Kasanagh 2020).

**Çizelge 3.** Orijinal ve polimer modifiyeli bağlayıcılara uygulanan deneyler ve sonuçları

Özellikler	Standart	B-PG64	SBS-PG76	EVA-PG76	Limit
Penetrasyon (dmm)	ASTM D5	52	38	32	-
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	43	63	56	-
Penetrasyon İndeksi (PI)	-	-3,03	-1,6	-0,78	-2<PI<+2
Vizkozite, 135 °C (cP)	ASTM D4402	398	1149	875	Maks. 3000
Vizkozite, 165 °C (cP)	ASTM D4402	112	338	237	-
Karıştırma Sıcaklığı (°C)	-	153-158	178-184	168-174	-
Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)	-	141-146	166-171	157-162	-
G*/sinδ, 64 °C (kPa)	AASHTO T315	1,40	4,18	4,74	Min. 1,0
G*/sinδ, 70 °C (kPa)	AASHTO T315	0,76	2,14	2,01	Min. 1,0
G*/sinδ, 76 °C (kPa)	AASHTO T315	-	1,19	1,09	Min. 1,0
RTFO deneyiyle kısa süre yaşlandırılma sonrası					
Kütle Kaybı (%)	ASTM D2872	0,46	0,34	0,40	Maks. 1,0
Penetrasyon (dmm)	ASTM D5	45	28	21	-
Kalıcı Penetrasyon (%)	-	86	76	66	Min. 50
Yumuşama Noktası (°C)	ASTM D36	46	52	57	-
Yum. Noktasındaki Artış (°C)	-	3	1	1	Maks. 12
G*/sinδ, 64 °C (kPa)	AASHTO T315	4,07	11,31	12,38	Min. 2,2
G*/sinδ, 70 °C (kPa)	AASHTO T315	1,78	5,30	5,98	Min. 2,2
G*/sinδ, 76 °C (kPa)	AASHTO T315	-	2,53	3,68	Min. 2,2

### 3.3 Agrega Üzerinde Uygulanan Fiziksel Deneyler

Çalışmada, İzmir bölgesi için 20 yıllık trafik dizayn sayısı tahmini 15 milyon eşdeğer standart dingil yükü (ESAL) tekerrür sayısı olarak seçilmiş ve trafiğin standart hızda (>70 km/saat) seyrettiği kabul edilmiştir. Kalker (kireçtaşı) türü agreganın maksimum tane boyutu 19 mm ve nominal maksimum tane boyutu 12,5 mm olan Superpave

agrega gradasyonu kullanılmıştır. BSK'larda kaba agrega oranı %16, ince agrega oranı %79, filler oranı ise %5'dir. Sonuç olarak, BSK'larda kullanılan kalker agregasının üzerinde aşınma kaybı (Los Angeles), yassılık endeksi, su emme ve özgül ağırlıkları deneyleri gerçekleştirilmiş ve değerleri Çizelge 4'te listelenmiştir.

**Çizelge 4.** Kullanılan agregaya ait Superpave gradasyonu

Özellikler	Standart	Mineral Agregata		
		Kaba	İnce	Filler
Aşınma kaybı, (%)	ASTM C131	26,5	-	-
Yassılık endeksi (%)	AASTM D4791	20,15	-	-
Su emme oranı	ASTM C127	0,23	-	-
Hacim Özgül Ağırlığı	ASTM C127	2,630	2,650	-
Zahiri Özgül Ağırlığı	ASTM C127	2,640	2,660	2,700

#### 4. Marshall Stabilite Deney Sonuçları ve Tartışma

Yüksek sıcaklık performans sınıfı PG64 olan orijinal bağlayıcı toplam agregata ağırlığının %3,5, %4, %4,5, %5,0 ve %5,5 oranı olarak seçilmiş ve her bir yüzde için üçer karışım numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin havadaki, sudaki ve doymun kuru yüzey ağırlıkları ilgili formüllerde kullanılarak BSK numunelerinin hacim özgül ağırlıkları (Dp), boşluk oranları (Vh), kuru agregalar arası boşluk oranları (VMA) ve ADB (asfalt dolu boşluk oranı, Vf) belirlenmiştir. Bu işlemin ardından numuneler Marshall stabilite cihazı ile kırılarak stabilite ve akma değerleri belirlenmiştir. Bulunan bu değerlerin kullanılmasıyla stabilite, Dp, Vh, VMA, Vf ve akma - % bitüm grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 5, PG64 bağlayıcı ile hazırlanmış olan karışım numunelerin sonuçlarını, Şekil 6-11 ise aynı bağlayıcıdan elde edilen Marshall numunelerin optimum bitüm içerikleri tayininde kullanılan grafiklerini sunmaktadır.

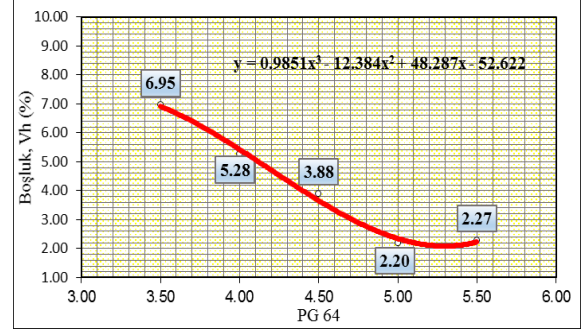
**Çizelge 5.** Marshall deney sonuçları

PG64 (%)	V <sub>h</sub> (%)	VMA (%)	V <sub>f</sub> (%)	D <sub>p</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Akma (mm)	Stabilite (kgf)
3,5	6,95	14,50	52,1	2,339	2,22	1125
4	5,28	13,98	62,2	2,364	2,38	1171
4,5	3,88	13,72	71,7	2,383	2,62	1232
5	2,20	13,21	83,4	2,408	2,81	1247
5,5	2,27	14,25	84,1	2,391	3,06	1199

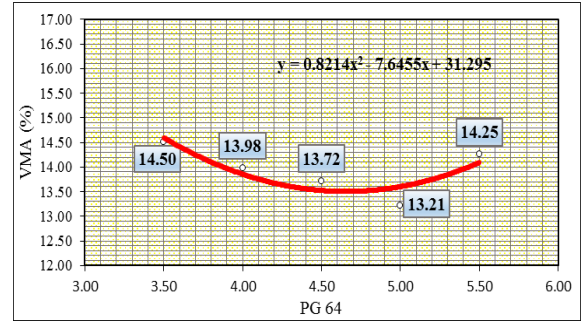
Şekil 6'da, karışımdaki hava boşluklarının yüzdesi bitüm içeriğinin artışıyla azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, bitüm içeriğinin sabit bir hacim için arttığını, havanın dışarı çıkarıldığını ve böylece artan bitüm içeriği ile doğru ilişkili hava boşluğu yüzdesinin azaldığını göstermektedir.

Şekil 7'de, mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi (VMA) ilk olarak bitüm içeriğindeki artışla azalmakta, ardından minimum seviyeye ulaştıktan

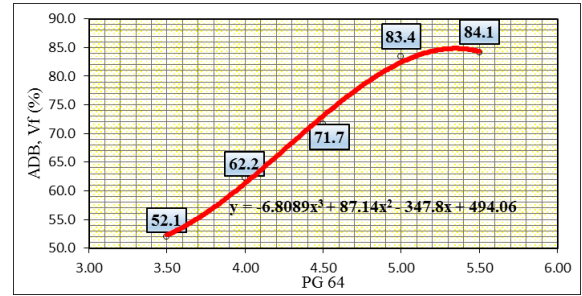
sonra yeniden artmaya başlamaktadır. Bu, sıkıştırılmış bir numunenin VMA yüzdesinin artan bitüm içeriği ile azalmasını, minimum seviyeye ulaşmasını ve ardından artması gerektiğini ifade etmektedir.



**Şekil 6.** PG64 bağlayıcı için hava boşluğu (Vh) – bitüm içeriği grafiği



**Şekil 7.** PG64 bağlayıcı için agregalar arası boşluk (VMA) – bitüm içeriği grafiği



**Şekil 8.** PG64 bağlayıcı için asfalt dolu boşluk (Vf) – bitüm içeriği grafiği

Şekil 8'de, asfalt dolu boşluk oranı artan bitüm içeriği ile artmaktadır. Bu, karışımlar için sıkıştırılmış numunelerin ADB yüzdesinin bitüm içeriğinde bir artışla arttığını ortaya çıkarmaktadır.

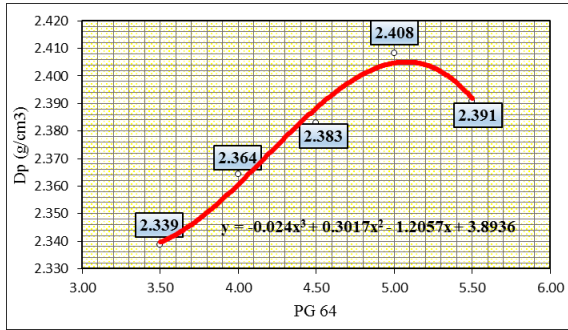
Şekil 9'da, hacim özgül ağırlık (Dp) genellikle artan asfalt içeriği ile artmış, maksimum seviyeye ulaşmış ve daha sonra azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin birim ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni, karışımdaki bitüm içeriği artarken



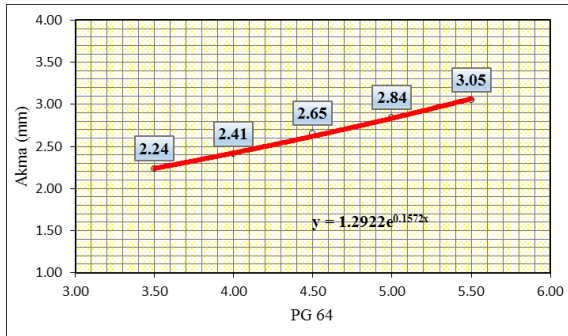
boşlukları doldurması dolayısıyla birim ağırlığını arttırmıştır.

Şekil 10'da, akış değeri bitüm içeriğindeki artışla artmaktadır, bu sonuç da akış değerinin karışımdaki sertliğin azalması nedeniyle bitüm içeriğindeki artışla arttığını meydana getirmektedir.

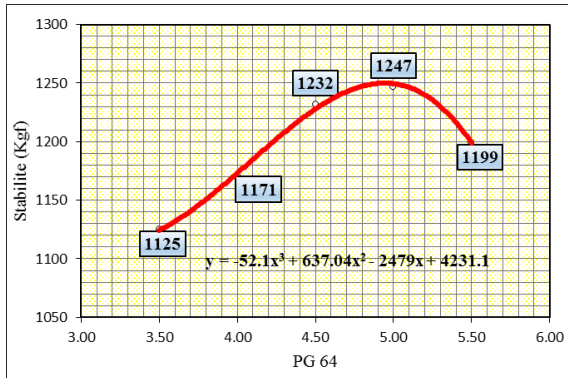
Şekil 11'de, artan bitüm içeriği ile stabilite artarak zirveye ulaşmış ve ardından azalmıştır. Bu, karışım için sıkıştırılmış numunelerin özgül ağırlığının başlangıçta bitüm içeriğindeki artışla arttığını, maksimum değere ulaştığını ve daha sonra azaldığı anlamına gelmektedir. Özgül ağırlığındaki artış ve düşüş eğilimleri numunenin stabilitesi ile doğru bağlantılıdır.



Şekil 9. PG64 bağlayıcı için hacim özgül ağırlığı (Dp)- bitüm içeriği grafiği



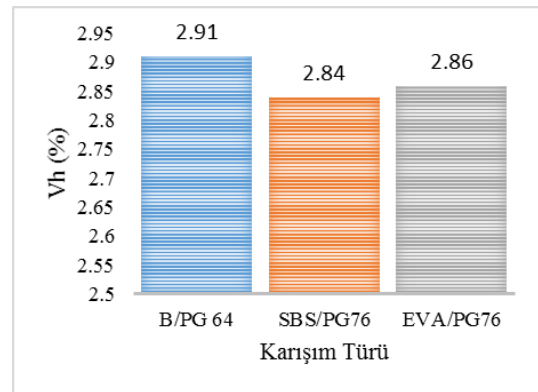
Şekil 10. PG64 bağlayıcı için akma değeri - bitüm içeriği grafiği



Şekil 11. PG64 bağlayıcı için stabilite - bitüm içeriği grafiği

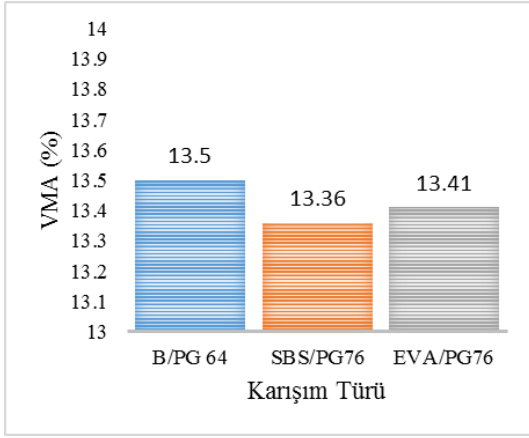
Orijinal PG64 bağlayıcıya sahip karışım numuneleri için gerekli özgül ağırlıkları, boşluk ve stabilite grafikleri çizilmesi ve ilgili analizlerin yapılmasının ardından, Dp - bitüm % ve stabilite - bitüm % grafiklerin maksimum olduğu bitüm içerikleri, hava boşluğu (Vh) - bitüm % grafiğinde boşluk oranının %4'e tekabül ettiği bitüm içerikleri, ADB - bitüm % grafiğinde asfalt dolu boşluk oranının %80'e tekabül ettiği bitüm içerikleri belirlenmiştir. Her dört grafikten elde edilen optimum bitüm değerinin aritmetik ortalaması alınarak, optimum bitüm içeriği bulunmuştur. Sonuç olarak, Orijinal PG64 bağlayıcının karışımdaki optimum bitüm içeriği %4,81 olarak bulunmuştur.

Yüksek sıcaklık performans sınıfı PG64 olan orijinal bağlayıcının karışım içerisindeki optimum yüzdesi hesaplandıktan sonra optimum içerikte kontrol amaçlı üçer karışım numunesi yapılmıştır. Bunun yanı sıra yaygın polimer katkı bağlayıcıların karışım üzerinde etkisini incelenmesi amacıyla orijinal PG64 bağlayıcının optimum içeriği miktarında SBS/PG76 ve EVA/PG76 Marshall karışımları hazırlanmıştır. Polimer katkı karışımlar orijinal karışımlarda olduğu gibi her karışım için üçer numune yapılmış ve tüm verilerin ortalaması Şekil 12-17'de sunulmuştur.



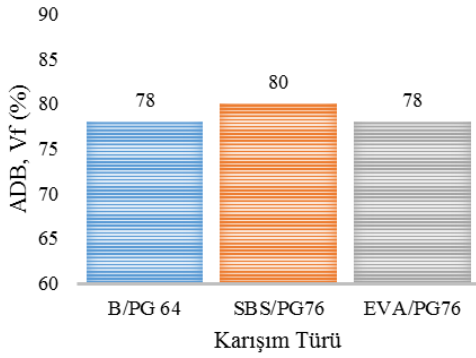
Şekil 12. Polimer katkı karışımların hava boşluğu (Vh)

Elde edilen sonuç incelendiğinde, orijinal bağlayıcıya sahip (PG-64) karışımın hava boşluğu polimer katkı karışımlara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Katkıların arasında kıyaslama yapıldığında, her iki bitümde en yüksek Vh değerine sahip olan katkı EVA ve en düşüğü ise SBS olmuştur (Şekil 12).

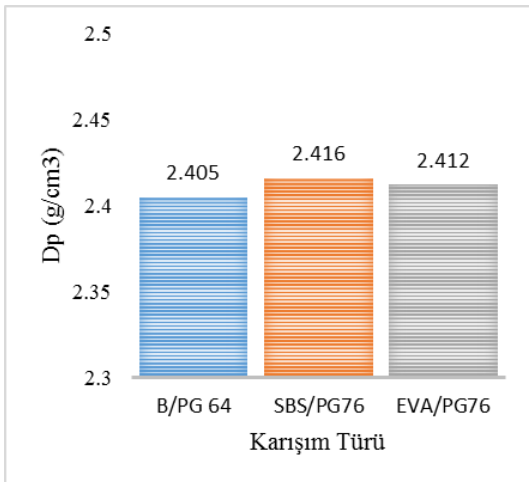


**Şekil 13.** Polimer katkılı karışımların agregalar arasındaki boşluğu (VMA)

Kuru agregalar arasında boşluk oranı her iki katkıda orijinal bağlayıcıya göre nispeten düşük değerler elde edilmiştir. Katkıların arasında en düşük değer SBS katkısına ve orijinal bağlayıcıya yakın olan en yüksek değer ise EVA katkısına ait olmuştur (Şekil 13).

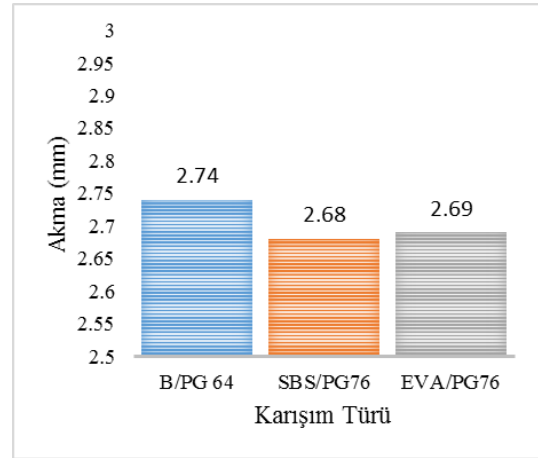


**Şekil 14.** Polimer katkılı karışımların asfalt dolu boşluğu (Vf)



**Şekil 15.** Polimer katkılı karışımların özgül ağırlığı (Dp)

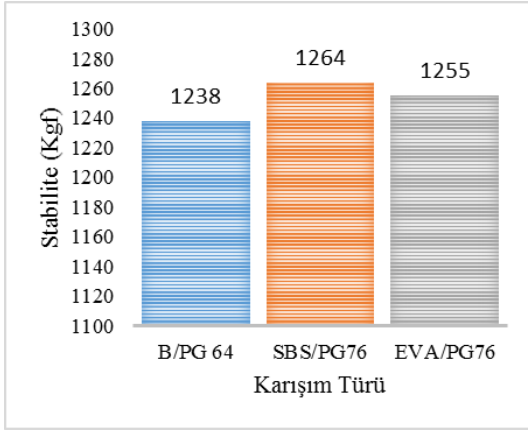
Orijinal ve EVA katkılı karışım numunelerin asfalt dolu boşluk oranı değerlerinin (Vf) aynı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, en yüksek değer SBS katkısında ortaya çıkmıştır (Şekil 14). SBS katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki boşluk oranı düşük olmasına rağmen hava boşluğu da diğer katkıya türüne ait BSK'ya oranla daha düşüktür. Bu parametreler bir arada dikkate alındığında tüm numunelerin hacim özgül ağırlığı (Dp) değerleri sırasıyla SBS/PG76, EVA/PG76, B/PG64 olmuştur (Şekil 15).



**Şekil 16.** Polimer katkılı karışımların akma değeri

Katkıların akma değeri orijinal bağlayıcıya göre düşük olmasına rağmen sonuçlar arasında çok belirgin farklar bulunmamaktadır. Ancak, diğer parametrelerde de olduğu gibi en iyi sonucu SBS katkısına sahip BSK numuneleri vermektedir (Şekil 16). Akma değerinin düşük olması karışım numunesinin daha yüksek mertebede yüklemeye maruz kaldığının göstergesidir. Dp değerinin büyük olması ise bir numunenin bütünlüğünün korunduğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla, bir numunenin yüksek Dp değeri ve düşük akma değeri yüksek stabilite anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım neticesinde en yüksek stabilite değerinin numuneler arasında SBS katkılı karışıma ait olduğu görülmektedir. EVA katkılı karışımın ise orijinal bağlayıcıya sahip karışıma göre daha yüksek stabilite değerine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 17).





Şekil 17. Polimer katkılı karışımların stabilitesi

## 5. Sonuç

Çalışma kapsamında İzmir ilinin son 20 yıldaki hava durumu şartı göz önünde bulundurularak Superpave yöntemiyle BSK'larda kullanılacak uygun bağlayıcı türü seçilmiş ve bunun yanı sıra SBS ve EVA katkıları olmak üzere iki farklı polimer ile BSK numunesi hazırlanarak Marshall stabilite deneyi gerçekleştirilmiştir. Marshall deneyi verilerinin analizi aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır.

- ✓ Superpave yöntemine göre İzmir iklimi şartları kapsamında BSK'larda kullanılan bağlayıcının yüksek sıcaklık performans sınıfı PG 64 olarak belirlenmiştir.
- ✓ Orijinal PG 64 bağlayıcı ve Superpave gradasyonlu agregalardan hazırlanmış bitümlü sıcak karışımın optimum bitüm içeriği %4,81 olarak belirlenmiştir.
- ✓ Orijinal karışımın hava boşluğu miktarının polimer katkılı karışımlardan daha fazla olduğu belirlenmiştir. Katkıların arasında kıyaslama yapıldığında, en yüksek  $V_h$  değerine sahip olan karışımın EVA katkılı bağlayıcıya ait BSK numunesi olduğu, buna karşılık en düşük  $V_h$  değerine sahip karışımın ise SBS katkılı bağlayıcıyla hazırlanan BSK karışımı olduğu tespit edilmiştir.

- ✓ SBS katkılı karışım numunesinin kuru agregalar arasındaki boşluk oranının EVA katkılı ve orijinal bağlayıcıya sahip karışımlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Buna göre, numunelerin hacim özgül ağırlıklarının ( $D_p$ ) değerleri sıra ile SBS/PG76, EVA/PG76, B/PG64 olarak büyükten küçüğe sıralanmaktadır.
- ✓ Karışımın yüksek  $D_p$  değeri ve düşük akma değeri yüksek stabilite değerini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşımı dikkate alarak en yüksek stabilite değerinin SBS katkılı karışıma ait olduğu, EVA katkılı karışımın ise orijinal bağlayıcıya göre daha yüksek stabilite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.
- ✓ TDV katkısının karışım içerisinde diğer katkılara kıyasen performansını daha detaylı incelemek amacıyla daha kapsamlı karışım esaslı deneylere ve standartlara tabi tutulması tavsiye edilmektedir.

## 6. Kaynaklar

- Ahmedzade, P., Fainleib, A., Günay, T., and Grygoryeva, O., 2014. Modification of bitumen by electron beam irradiated recycled low density polyethylene. *Construction and Building Materials*, **69**, 1–9.
- Ahmedzade, P., Günay, T., Grigoryeva, O., and Starostenko, O., 2017. Irradiated recycled high density polyethylene usage as a modifier for bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29(3)**, 4016233.
- Airey, G. D., 2003. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, **82(14)**, 1709–1719.
- Almusawi, A., Sengoz, B., and Topal, A., 2020. Evaluation of mechanical properties of different asphalt concrete types in relation with mixing and compaction temperatures. *Construction and Building Materials*, **228**, 121140.

- Ameri, M., Nowbakht, S., Molayem, M., and Mirabimoghaddam, M. H., 2016. A study on fatigue modeling of hot mix asphalt mixtures based on the viscoelastic continuum damage properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, **106**, 243–252.
- ASTM D1559., 1989. Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. In *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, USA, 4.
- Behnood, A., 2020. A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties. *Journal of Cleaner Production*, **259**, 120817.
- Behnood, A., and Olek, J., 2017. Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). *Construction and Building Materials*, **151**, 464–478.
- Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., and Moeini, A., 2010. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, **24(3)**, 300–307.
- Geçkil, T., 2008. *Siyah Karbonun Bitümlü Sıcak Karışımların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 273.
- Hassanpour Kasanagh, S., 20020. Geri Dönüştürülmüş Polimer ve Atık Lastik Tozu Esaslı Termoplastik Dinamik Vulkanizat (TDV) Katkısının Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımlar Üzerinde Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 217.
- Köfteci, S., Gunay, T., and Ahmedzade, P., 2020. Rheological Analysis of Modified Bitumen by PVC Based Various Recycled Plastics. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, **146(4)**, 4020063.
- Mohammad, L. N., Wu, Z., Obulareddy, S., Cooper, S., and Abadie, C., 2006. Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanistic–Empirical Pavement Design Software. *Transportation Research Record*, **1970(1)**, 133–142.
- Polacco, G., Stastna, J., Biondi, D., and Zanzotto, L., 2006. Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **11(4)**, 230–245.
- Sadeghian, M., Namin, M. L., and Goli, H., 2019. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier. *Construction and Building Materials*, **226**, 818–826.
- Sengoz, B., Topal, A., and Isikyakar, G., 2009. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, **23(5)**, 1986–1992.
- Vargas, M. A., Chavez, A. E., Herrera, R., and Manero, O., 2005. Asphalt modified by partially hydrogenated SBS tri-block copolymers. *Rubber Chemistry and Technology*, **78(4)**, 620–643.
- Zhu, J., Birgisson, B., and Kringos, N., 2014. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, **54**, 18–38.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055701 (1167-1180)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055701 (1167-1180)

DOI: 10.35414/akufemubid.821905

Araştırma Makalesi / Research Article

# A Numerical Study of Hydrogen Production via High-temperature and Low-temperature Water-Gas Shift Reactors' System: The Multi-Scale Modeling Approach and Simulation

Seçgin KARAGÖZ<sup>1</sup><sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Qatar University, P.O. Box: 2713, Doha, Qatarskaragoz@qu.edu.qa, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1287-7291>

Geliş Tarihi: 05.11.2020

Kabul Tarihi: 26.10.2021

## Abstract

The primary purpose of this study is to develop an advanced, and comprehensive multi-scale mathematical models of a packed bed reactors (PBRs) carrying out high and low temperature water-gas-shift reactions (WGSRs) for the hydrogen production. In industrial hydrogen generation applications, the water-gas-shift reactors are considered at high (called HTSR) and low (called LTSR) temperature stages with a cooling process between them. Therefore, detailed and advanced numerical studies on the HTSR and the LTSR in series are carried out to assess the overall performance of hydrogen production system. After completing a single-pellet, non-isothermal, steady-state simulation, we couple our model with a non-isothermal (adiabatic), steady-state packed-bed reactor model to form a hybrid multi-scale reactor model. The velocity, temperature and species' concentration profiles along both the reactor length and the pellet radius are captured by using rigorously defined momentum, energy, and species transport models, accounting for the physical mechanisms involved in the system such as convection, conduction, and reaction-diffusion. The model's equations are simultaneously solved for each domain: bulk gas domain and catalyst-pellet domain. The rigorous Maxwell-Stefan Model is applied on the reactor scale to account mass diffusion fluxes. On the other hand, Dusty Gas Model is considered to describe mass diffusion fluxes for the single pellet scale. Studies that include a broad range of the operating conditions and design parameters are carried out in this paper, in order to investigate the upper and lower limit conditions' effects on the results.

## Keywords

CFD Simulation; Dusty Gas Model; HTSR; LTSR; Multi-scale Modelling; Maxwell-Stefan Model

## Yüksek Sıcaklık ve Düşük Sıcaklık Su-Gaz Değişirme Reaktörleri Sistemi ile Hidrojen Üretimi Üzerine Nümerik Çalışma: Çoklu-Ölçekli Modelleme Yaklaşımı ve Simülasyonu

## Öz

Bu çalışmanın temel amacı, hidrojen üretimi için yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık su-gaz değişirme reaksiyonlarının (WGSR'ler) gerçekleştiği dolgu yataklı reaktörler sisteminin (PBR'ler) gelişmiş ve ayrıntılı çoklu-ölçekli matematiksel modellerini geliştirip, simülasyonlarını gerçekleştirmektir. Endüstriyel hidrojen üretimi için en yaygın kullanılan yöntem yüksek sıcaklık su-gaz değişirme reaktörünün (HTSR) düşük sıcaklık su-gaz değişirme reaktörüne (LTSR) aralarında soğutma işlemi olacak şekilde seri halde bağlanmasıyla oluşan sistemdir. Bu nedenle, bu çalışma hidrojen üretim sisteminin davranışını tahmin etmek için seri haldeki HTSR+LTSR sistemi üzerinde ayrıntılı ve gelişmiş nümerik simülasyonların gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışmada tek kataliz peletinin izotermal olmayan, kararlı durum simülasyonunu tamamladıktan sonra, hibrit çoklu-ölçekli reaktör modeli oluşturmak için izotermal olmayan (adyabatik), kararlı durum dolgu yataklı reaktör modeliyle birleştirilmiştir. Hem reaktör uzunluğu hem de kataliz pelet yarıçapı boyunca hız, sıcaklık ve türlerin konsantrasyon profilleri, konveksiyon, iletim ve reaksiyon-difüzyon gibi sistemde yer alan fiziksel mekanizmaları dikkate alarak titizlikle tanımlanmış momentum, enerji ve taşınım modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Model denklemleri her bir çalışma alanı (reaktör gaz fazı alanı ve kataliz pelet alanı) için eş zamanlı olarak çözülmüştür. Maxwell-Stefan Modeli kütle difüzyon akışlarını hesaba katmak için reaktör ölçeğine

## Anahtar kelimeler

CFD Simülasyon; Dusty Gaz Modeli; HTSR; LTSR; Çoklu-Ölçekli Modelleme; Maxwell-Stefan Modeli

uygulanırken, Dusty Gaz Modeli de tek kataliz pelet ölçeği için kütle difüzyon akışlarını hesaplama da kullanılmıştır. Bu çalışmada, üst ve alt limit koşullarının sonuçlar üzerindeki etkilerini araştırmak için çok çeşitli çalışma koşullarını ve tasarım parametrelerini içeren simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

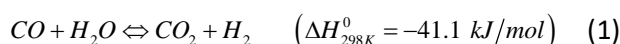
© Afyon Kocatepe Üniversitesi

## 1. Introduction

The importance of hydrogen and hydrogen technologies have increased recently for both mobile and stationary practices due to the global green processes trend, and the capability of the hydrogen is being a crucial energy source and industrial species (Karagöz *et al.* 2018). Therefore, hydrogen has a high interest and potential to be the leading energy source for the future, especially it is applications of the fuel cell technology improvement. Fuel cell technology has gained massive global attention because of being alternative to traditional technologies for clean power generation in the recent years (Adrover *et al.* 2009, Huang and Ho 2008, Karagöz *et al.* 2020). Hydrogen is the most widespread and the ideal fuel for the fuel cell applications. However, hydrogen must be generated from nonrenewable energy sources or renewable energy sources because it does not naturally exist as a pure compound on Earth. Traditionally, hydrogen is being produced from energy sources such as coal, natural gas, biomass, and liquid hydrocarbons (Abdollahi *et al.* 2010, Garshasbi *et al.* 2017). The improvement of the hydrogen economy is the main factor that will determine the worldwide use of hydrogen. Thus, more economical hydrogen production with significant cost reduction is required for the transition to achieve these goals.

The Water Gas Shift Reaction-WGSR is a historically well-studied/known commercial chemical process, and has many very important industrial applications (Karagöz *et al.* 2019a). Among these applications, the WGSR plays a very crucial role in the H<sub>2</sub> production process by serving as further H<sub>2</sub> enrichment and CO degradation. Because of this role, the WGSR is considered as a promising route for H<sub>2</sub> production, so the WGSR-based H<sub>2</sub> generation processes have been gaining a renewed interest recently. Thus, there are significant efforts in both industry and academia to demonstrate its applications on environmentally friendly gasified

coal power plants and fuel cells, and perspective applications of hydrogen as a clean energy carrier in the near future (Karagöz *et al.* 2019b). Aforementioned essential features of the WGSR in the literature are: (1) hydrogen is produced by the following moderately exothermic-reversible-equilibrium limited reaction:



(2) higher conversions are obtained at low temperatures with favorable kinetics at higher temperatures. (3) The reaction obeys the Le Chatelier's principle. (4) Since there is no change in the total number of moles in the process, the process does not influence on the equilibrium conversion. (5) The process temperature and feed composition are the two process parameters that have direct effect on the equilibrium conversion.

Most of the industrially relevant processes uses the multi-phase and multi-scale reactors to perform reactions. In these reactors types, multiple species involve in the process, so advanced models are necessary to reach success for the numerically related studies (Lim and Dennis 2012). Packed bed reactor is well-known and the most common among these reactor types. The conventional packed bed reactor-PBR models are pseudo-homogeneous and heterogeneous models (Froment 1974). To reach the desired level of accuracy on modeling and simulation, the heterogeneous models have some advantages over the pseudo-homogeneous models. The most crucial of these are solving transport model-equations individually for each phase in porous media, accounting explicitly gradients within of each phase and between phases, and satisfaction on one-dimensional reactor simulation (axial) even though being high-level dimensionality (Rout and Jakobsen 2015).

The study of the multiphase transport phenomena inside porous media is performed by a broad range of engineering disciplines (Rout and Jakobsen 2015). This is due to a high-level complication of

multiphase systems; create a complex set of problems and challenges. The most important features of these systems are having the character of the being nonlinear, and this requires a quantification of the multiple-coupled set of nonlinear differential equations for most of the problem solutions (Miller *et al.* 1998). Thus, the accurate modeling of the multiphase transport phenomena is crucial in many technological and industrial applications, involving of simultaneous heat-momentum-multi component mass transport. This study focuses on a non-isothermal, steady state spherical pellet of catalyst and a non-isothermal (adiabatic), multi-scale (Catalyst-pellet/Reactor Scale) reactor modeling and simulation. The numerical study is performed on the WGSR for the H<sub>2</sub> generation. In spite of the existence of the various numerical studies relating the WGSR (Ding and Chan 2008, Francesconi *et al.* 2007, Seo *et al.* 2006, Wright and Edgar 1994), insufficient attempt in the area of the multiscale world is realized at first glance.

However, this effort provides a detailed numerical insight into the transport phenomena with multiscale studies in porous media (pellet and reactor scales) on the HTSR and the LTSR system in series. This study and multi-scale model results provide a practical realization about the WGSRs systems from the standpoint of industrial application for H<sub>2</sub> production. The COMSOL Multiphysics Software is used to the solution of the derived multi-scale model's equations in this study. The rigorous DGM (Dusty Gas Model) and rigorous MSM (Maxwell–Stefan Model) are used to account diffusion fluxes in the reactor and the pellet scales, respectively. In the majority of the studies in the literature, it is recognized that the simplification on the application of the DGM by considering uniformity on the catalyst pellet's temperature and pressure profiles along the radius. However, this study performs calculations to obtain the temperature and the pressure profiles along the catalyst's radius to validate the assumptions above,

and the Dusty Gas Model is rigorously applied in the pellet model equations solution. Studies that include a broad range of the operating conditions and parameters are carried out in this paper, in order to investigate the upper and lower limit conditions' effects on the results.

## **2. Process Description and Solution Method**

In general, industrial hydrogen generation applications, the water-gas-shift reactors are considered at high (called HTSR) and low (called LTSR) temperature stages with a cooling process between them. The flow of process gas stream occurs from the reformer unit through the adiabatic two-stage water gas shift reactors' system, such as Figure 1.

The HTSR is performed between the 300 °C – 450 °C, while LTSR is carried out between the 200 °C – 300 °C. For HTSR and LTSR, specific catalysts are used for each reactor types. Typically, Cu–ZnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based catalysts (for LTSR) and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> –Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CuO-based catalysts (for HTSR) are used in industry (Chen *et al.* 2008, Natesakhawat *et al.* 2006). In the HTSR, rapid CO conversion is obtained (the majority of the CO is consumed in the HTSR) and then, the HTSR reactor's exit gas stream goes into an inter-stage cooling system. To convert the rest of the CO and enrich the H<sub>2</sub> product, LTSR process takes place following the cooling. The aforementioned H<sub>2</sub> production system is preferred industrially due to its capability of achieving higher CO conversions and desired level of hydrogen production.

The Packed Bed Reactors (PBRs) multi-scale mathematical models are developed (Figure 2). In this study, the PBRs are considered as micro (catalyst pellet) and macro (reactor) scale levels. All pellet characteristic parameters of average pore size, reaction kinetic rates, pellet material properties and pellet shape is modeled at micro (pellet) scale.

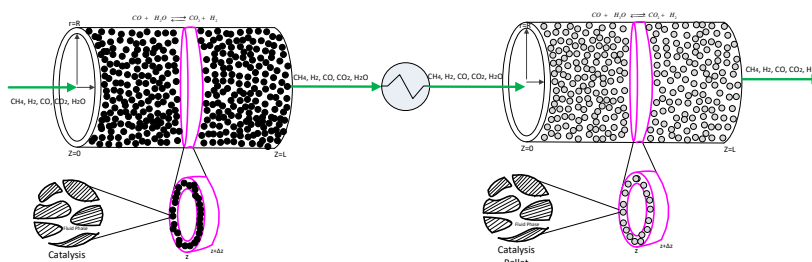


Figure 1. 1D Representation of control volumes in a two-stage process of WGSR unit.

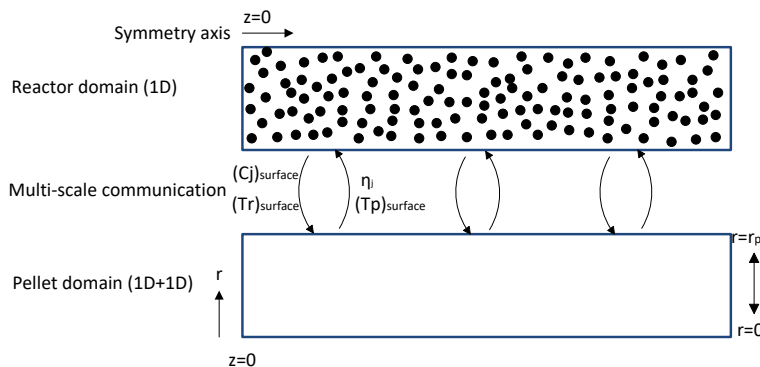


Figure 2. Representation of the Multiscale Modeling Approach.

On the other hand, macro (reactor) scale is modeled by considering reactor tube dimensions, catalyst packing void fraction, and others as all PBR features. Numerical solutions of the derived transport equations in pellet-reactor scales are obtained by coupling of these scales. Throughout the PBRs axis, the solution of the distributed catalyst pellets domains contributes as a source terms to the solution of reactor domain equations by exchanging the necessary information from the pellets' boundaries. By this multi-scale approach, reactor scale information such as pressure, temperature, velocity, and species' concentrations and pellet scale information are exchanged between these domains. At the end of this process, temperature, pressure, and species profiles are known at each axial location within the reactor domain, and at each pellet domain radial, reactor domain axial local pair. After completing the single-pellet non-isothermal, dynamic, stand-alone simulations, formed a non-isothermal, steady-state, multi-scale reactor model by coupling the single-pellet with reactor model. The solution of the catalyst pellet's equations is repeatedly performed along the reactor axis (yielding the effectiveness factor along the reactor length for the locally prevailing reaction conditions) and is coupled with a 1-D (axial) reactor model that

captures species transport/reaction along the reactor. The effectiveness factor is defined as the ratio of the real rate of generation of the  $j$ th species within the catalyst pellet over the rate of production of the  $j$ th species. The conservation equations are solved by the Finite Element Method (FEM).

### 3. Mathematical Formulation and Modeling

In PBRs, mass-momentum-energy is constantly exchanged between the gas and solid phases that construct the catalyst and reactor scales. In this study, the Reynolds Transport Theorem is implemented individually to each of the domains, reactor scale gas-solid phases and catalyst scale gas-solid phases. The following assumptions are considered for model equations derivation; considering catalyst as a spherical shape, homogeneous porous structure of the pellet, same size of pallet forms the reactor, the gaps between the pellets are equal, the reaction does not cause any structural changes inside of the catalyst, stagnant solid-phase, active sites of catalyst are evenly distributed across the entire pellet, the assumption of being a mean pore diameter, and the ratio between the porosity and tortuosity is employed to qualify the fixed structure of the catalyst, the reaction kinetics and reaction orders

are assumed to be constant over the all performed simulation conditions, no side reaction happens, axisymmetric flow in a cylindrical tube, no radial and tangential velocities in a cylindrical tube, no diffusion throughout the reactor, negligible kinetic and potential energy terms, no heat flux by radiation, the reaction mixture does not have changing phase and ideal gas mixture is considered. For the following sections, the identification of the existing domains in reactors are the catalyst pellet:

**Catalyst-Pellet Domain:**

$$\sum_{i=1}^v \varepsilon_{s,V}^p \rho_s^p \bar{R}_{f,i}^p r^2 = \frac{d}{dt} \left( \varepsilon_{f,V}^p \sum_{i=1}^v c_{f,i}^p \right) + \frac{d}{dr} \left( r^2 \varepsilon_{f,A}^p \sum_{i=1}^v c_{f,i}^p \bar{v}_f^p \right) \quad (2)$$

**Reactor Domain:**

$$\sum_{i=1}^v \varepsilon_{s,V}^r \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \left[ \left( \varepsilon_{f,A}^p \bar{N}_i^p \right) \right]^{CS^p} = \frac{d}{dt} \left( \varepsilon_{f,V}^r \sum_{i=1}^v c_{f,i}^r \right) + \frac{d}{dz} \left( \varepsilon_{f,A}^r \sum_{i=1}^v c_{f,i}^r \bar{v}_f^r \right) \quad (3)$$

**Catalyst-pellet Domain:**

$$\varepsilon_{s,V}^p \rho_s^p \bar{R}_{f,i}^p r^2 = \frac{d}{dt} \left( r^2 \varepsilon_{f,V}^p x_{f,i}^p c_f^p \right) + \frac{d}{dr} \left( r^2 \varepsilon_{f,A}^p \bar{N}_{f,i}^p \right) \quad (4)$$

**Reactor Domain:**

$$\varepsilon_{s,V}^r \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \left[ \left( \varepsilon_{f,A}^p \bar{N}_{f,i}^p \right) \right]^{z,r^p} = \frac{d}{dt} \left( \varepsilon_{f,V}^r x_{f,i}^r c_f^r \right) + \varepsilon_{f,A}^r \frac{d}{dz} \left( c_f^r \bar{v}_f^r x_{f,i}^r + \bar{n}_{f,i}^r \right) \quad (5)$$

Quantification of species transport inside the catalyst is carried out by using the DGM. In general, the most industrial multiphase reactors run under the reactions condition involving more than two species. Thus, the modeling of the complicated multi-component systems necessitates to use advanced diffusion such as the DGM that enable to achieve the desired level of accuracy in modeling of the transport mechanisms and reaction kinetics. DGM accounts 3 transport mechanisms; (1)

*p*, reactor domains: *r*, solid phases: *s* and fluid phases: *f*. The symbols  $\gamma$  and  $\alpha$  will represent phases and domains, respectively.

The final molar based total mass conservation equations of the catalyst-pellet and reactor domains can be expressed as shown in Eq. (2) and (3), respectively. The Eq. (4) and (5) demonstrates the final molar-based species mass conservation equations for the domains of the catalyst and reactor, respectively.

continuum-or-regular transport: the species in the system gains the motion due to concentration variations, derived using the MSM. (2) viscous diffusion-or-convection: pressure variations causes the motion for species. (3) Knudsen diffusion: the transport mechanism defined as the motion of species by concentration variations in the presence of small pore walls. Thermal diffusion is not took into account in this study (da Cruz *et al.* 2017). The resulting DGM is:

$$-\frac{1}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i,p}}^{N_s} \left( \frac{c_j}{D_{ij}^{eff}} \bar{N}_i - \frac{c_j}{D_{ij}^{eff}} \bar{N}_j \right) - \frac{\bar{N}_i}{D_{iK}^{eff}} = \bar{V} c_i + \frac{c_i}{\sum_{i=1}^{N_s} c_i RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{iK}^{eff}} \frac{B_o}{\mu_f} \right) \bar{V} P \quad (6)$$



The combined molar fluxes  $\bar{N}_i$   $i=1, N_s$ , combined mass fluxes  $\bar{J}_i$   $i=1, N_s$ , and velocities  $\bar{v}_i$   $i=1, N_s$  for the  $i$ th species, are defined as  $\bar{N}_i = c_i \bar{v}_i$   $i=1, N_s$ ,  $\bar{J}_i = M_i c_i \bar{v}_i$   $i=1, N_s$ . By defining the gas mixture's molar average velocity  $\bar{v} = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{c_i}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j} \bar{v}_i$  and average mass velocity  $\bar{u} = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{M_i c_i}{\sum_{j=1}^{N_s} M_j c_j} \bar{v}_i$ , one can decompose the combined molar (mass) fluxes into convective

$c_i \bar{v}$   $i=1, N_s$  ( $M_i c_i \bar{u}$   $i=1, N_s$ ) and diffusive  $\bar{n}_i = c_i (\bar{v}_i - \bar{v})$   $i=1, N_s$  ( $\bar{j}_i = M_i c_i (\bar{v}_i - \bar{u})$   $i=1, N_s$ ) components, as follows:

$$\bar{n}_i = c_i (\bar{v}_i - \bar{v}) = \bar{N}_i - c_i \bar{v} = \bar{N}_i - c_i \sum_{j=1}^{N_s} \frac{c_j}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j} \bar{v}_j \quad i=1, N_s$$

$$\bar{j}_i = M_i c_i (\bar{v}_i - \bar{u}) = \bar{J}_i - M_i c_i \bar{u} = \bar{n}_i - M_i c_i \sum_{j=1}^{N_s} \frac{M_j c_j}{\sum_{j=1}^{N_s} M_j c_j} \bar{v}_j \quad i=1, N_s$$

The application considered here involves five species,  $i = CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4$ , and the DGM can be written in matrix equation form as:

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_1 \\ \bar{N}_2 \\ \bar{N}_3 \\ \bar{N}_4 \\ \bar{N}_5 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \left( \frac{\sum_{i=2}^5 \frac{c_i}{D_{ik}^{eff}} + 1}{\sum_{j=1}^5 c_j} \right) & \frac{-c_1}{D_{12}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_1}{D_{13}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_1}{D_{14}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_1}{D_{15}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} \\ \frac{-c_2}{D_{21}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \left( \frac{\sum_{i=1, i \neq 2}^5 \frac{c_i}{D_{2i}^{eff}} + 1}{\sum_{j=1}^5 c_j} \right) & \frac{-c_2}{D_{23}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_2}{D_{24}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_2}{D_{25}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} \\ \frac{-c_3}{D_{31}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_3}{D_{32}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \left( \frac{\sum_{i=1, i \neq 3}^5 \frac{c_i}{D_{3i}^{eff}} + 1}{\sum_{j=1}^5 c_j} \right) & \frac{-c_3}{D_{34}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_3}{D_{35}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} \\ \frac{-c_4}{D_{41}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_4}{D_{42}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_4}{D_{43}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \left( \frac{\sum_{i=1, i \neq 4}^5 \frac{c_i}{D_{4i}^{eff}} + 1}{\sum_{j=1}^5 c_j} \right) & \frac{-c_4}{D_{45}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} \\ \frac{-c_5}{D_{51}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_5}{D_{52}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_5}{D_{53}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \frac{-c_5}{D_{54}^{eff} \sum_{j=1}^5 c_j} & \left( \frac{\sum_{i=1, i \neq 5}^5 \frac{c_i}{D_{5i}^{eff}} + 1}{\sum_{j=1}^5 c_j} \right) \end{bmatrix}}_{DDGM} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{v} c_1 + \frac{c_1}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{1k}^{eff}} \frac{B_{O_1}}{\mu_f} \right) \bar{v} P \\ \bar{v} c_2 + \frac{c_2}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{2k}^{eff}} \frac{B_{O_2}}{\mu_f} \right) \bar{v} P \\ \bar{v} c_3 + \frac{c_3}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{3k}^{eff}} \frac{B_{O_3}}{\mu_f} \right) \bar{v} P \\ \bar{v} c_4 + \frac{c_4}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{4k}^{eff}} \frac{B_{O_4}}{\mu_f} \right) \bar{v} P \\ \bar{v} c_5 + \frac{c_5}{\sum_{j=1}^{N_s} c_j RT} \left( 1 + \frac{P}{D_{5k}^{eff}} \frac{B_{O_5}}{\mu_f} \right) \bar{v} P \end{bmatrix}}_{\bar{v} X}$$

Then, a DGM effective diffusivity matrix can be described as  $D^{DGM}$  and result to the equation:

$$\bar{N} = -D^{DGM} \cdot \bar{v} X \quad (7)$$

At moderate pressures, the regular diffusion, effective diffusion coefficients  $D_{ij}^{eff}$   $i=1, N; j=1, N; j \neq i$  used in the derived equations, are estimated by Chapman-Enskog theory. The equations derived by Poling, Praunitz

and O'Connell are used to calculate the binary diffusion coefficient for polar and non-polar gas mixtures (da Cruz *et al.* 2017). The identicalness of Stefan-Maxwell diffusivities and the binary diffusivities for ideal gas mixtures are reported in the literature (Rout and Jakobsen 2015).

For the reactor-fluid subsystem, MSM can be defined by Eq. (8) to quantify the diffusive flux  $\bar{j}_{f,i}^v$ :

$$\sum_{j=1}^{\nu} \left[ \frac{x_{f,i}^r x_{f,j}^r}{D_{ij}} \left( \frac{1}{\rho_{f,j}^r} \overrightarrow{j_{f,j}^r} - \frac{1}{\rho_{f,i}^r} \overrightarrow{j_{f,i}^r} \right) \right] = \overline{\nabla} x_{f,i}^r + \left( \frac{x_{f,i}^r - w_{f,i}^r}{p^r} \right) \frac{d}{dz} p_f^r + \sum_{j=1}^{\nu} \left[ \frac{x_{f,i}^r x_{f,j}^r}{\rho_f^r D_{ij}^r} \left( \frac{\tilde{D}_i^r}{w_{f,i}^r} - \frac{\tilde{D}_j^r}{w_{f,j}^r} \right) \right] \frac{1}{T_f^r} \frac{d}{dz} T_f^r \quad (8)$$

The cross-sectional averaged-momentum equation can be shown as (Rout and Jakobsen 2015):

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_f^r \overline{v_f^r} \right) + \overline{\nabla} \cdot \left( \frac{\rho_f^r \overline{v_f^r v_f^r}}{\varepsilon_v^r} \right) = \varepsilon_v^r \overline{\nabla} p_f^r + \varepsilon_v^r \left( K_D \overline{v_f^r} + K_V \overline{v_f^r}^2 \right) \quad (9)$$

However, the momentum equation can be reduced to the following form:

$$\overline{\nabla} p_f^r = -K_D \overline{v_f^r} - K_V \overline{v_f^r}^2 = \frac{d}{dz} p_f^r = -150 \frac{\mu_f^r (1 - \varepsilon_v^r)^2}{(\varepsilon_v^r)^3 d_p^2} - 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_v^r)}{(\varepsilon_v^r)^3 d_p} \rho_f^r \overline{v_f^r} \quad (10)$$

where  $K_D$  and  $K_V$  are constants for the viscous and kinetic pressure drop. The addition of the DGM for all species in the system results a source term for the momentum conservation inside the catalyst.

A high heat transfer coefficient is observed inside of the catalyst due to the proximity the solid and fluid phases which results a common temperature  $T^p$  for the pellet's solid-fluid combined system. The resulting combined energy conservation equation is dedicated by Eq. (11).

$$\left\{ \frac{d}{dz} \left[ \left( \varepsilon_{f,A}^p k_f^p + \varepsilon_{s,A}^p k_s^p \right) \frac{d}{dz} T^p \right] \right\} = \left\{ - \sum_{i=1}^{\nu} \tilde{h}_i^p R_{f,i}^p \right\} \left\{ \left[ \varepsilon_{s,V}^p \rho_s^p C_{V,s}^p + \sum_{i=1}^{\nu} \varepsilon_{f,V}^p \rho_f^p (c_{f,i}^p C_{P,i}^p) \right] \frac{dT^p}{dt} \right\} + \left\{ \left[ \sum_{i=1}^{\nu} \varepsilon_A \rho_f^p (c_{f,i}^p C_{P,i}^p) \right] \overline{v_f^r} \cdot \frac{d}{dz} T_f^r \right\} \quad (11)$$

In this study, the derived energy equation contains three terms which represent heat exchanged between the fluid and solid phases within the reactor domain, Eq. (12): the enthalpy carried by the

species' mass flux between the reactor and the pellet domains, Eq. (13); the convective heat flux interchanged between the fluid in the reactor and the catalyst-pellet solid phase, Eq. (14);

$$q_{f \rightarrow s}^r = q_m^r + q_c^r \quad (12)$$

$$q_m^r = \varepsilon_{s,V}^r \left( \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \right) \sum_{i=1}^{\nu} \left[ \left( \frac{1}{M_i} \tilde{h}_{f,i}^r \varepsilon_{f,A}^p \overline{N}_i^p \right) \right]^{CS^p} \cdot \overline{\#} \quad (13)$$

$$q_c^r = \varepsilon_{s,V}^r \left( \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \right) \left[ \varepsilon_{s,A}^p \lambda^{rp} (T_f^r - T^p) \right]^{CS^p} \quad (14)$$

The resulting energy equation of the reactor-fluid domain is given by Eq. (15).

$$\left\{ \begin{aligned} & -\varepsilon_{s,V}^r \left( \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \right) \sum_{i=1}^{\nu} \left[ \left( \frac{1}{M_i} \tilde{h}_{f,i}^r \varepsilon_{f,A}^p \overline{N}_i^p \right) \right]^{z,r,p} \\ & -\varepsilon_{s,V}^r \left( \frac{A^p}{\varepsilon_{s,V}^p V^p} \right) \left[ \varepsilon_{s,A}^p \lambda^{rp} (T_f^r - T^p) \right]^{z,r,p} \\ & + \frac{d}{dz} \left( \varepsilon_{f,A}^r k_f^r \frac{d}{dz} T_f^r \right) \end{aligned} \right\} = \left\{ \begin{aligned} & \varepsilon_{f,V}^r \rho_f^r \left( \sum_{i=1}^{\nu} c_{f,i}^r C_{P,i}^r \right) \frac{dT_f^r}{dt} + \\ & \varepsilon_{f,A}^r \rho_f^r \left( \sum_{i=1}^{\nu} c_{f,i}^r C_{P,i}^r \right) \overline{v_f^r} \cdot \frac{d}{dz} T_f^r \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

The kinetics of the WGS reaction has gained growing interest in recently. There are various studies in the literature and they report various rate expressions and mechanisms of the WGSR such as Langmuir-Hinshelwood, Redox, empirical-power-law etc. When we consider all these, empirical-power-law rate expression is being preferred by most of the studies in literature. Commercial catalyst of Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for LTSR and commercial catalyst of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for HTSR catalyst are used in the simulations. The parameters of the empirical model are obtained based on the experimental results, and the reaction

rate can be described by Arrhenius Law to ensure a prediction the rate of reaction computationally. Table 1 represents empirical power-law rate expression with Arrhenius Law, and reaction and equilibrium equations. The constitutive laws and other model equations can be found in Table 2.

**Table 1.** Chemical Model Equations.

<b>Reaction Rate:</b>
$r_j = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) P_{CO}^l P_{H_2O}^m P_{CO_2}^n P_{H_2}^q \left(1 - \frac{1}{K_{eq}} \cdot \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}\right)$
$K_{eq} = \exp\left(\frac{4577.8}{T} - 4.33\right)$

**Table 2.** Constitutive Laws and Other Model Equations.

<b>Ideal Gas Law:</b>
$P = ZcRT = \frac{Z\rho RT}{M}$
<b>Definitions:</b>
$\sum_{j=1}^{n_i} x_j = 1, c_{tot} = \sum_{i=1}^u c_i, \sum_{j=1}^{n_i} n_j = 0, P = \sum_{i=1}^{n_i} P_i$
<b>Heat Flux (Fourier's Law):</b>
$Q = -\lambda \nabla T$
<b>Interphase Heat Transfer Coefficient Correlation:</b>
$Nu = 2 + 1.1 Pr^{1/3} Re_p^{0.6}$
<b>Dimensionless Groups:</b>
$Nu = \frac{hd_p}{\lambda_g}, Re_p = \frac{\bar{v}_f \rho_g d_p}{\mu_g}, Pr = \frac{C_{p,g} \mu_g}{\lambda_g}$
<b>The viscosity of Gas Mixture:</b>
$\mu_g = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^{N_i} x_j \phi_{ij}}, \quad \phi_{ij} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{8 \left(1 + (M_i/M_j)^{1/2}\right)^{1/2}}$
<b>Thermal Conductivity:</b>
$\lambda_{pellet} = (1 - \varepsilon_v) \lambda_s + \varepsilon_v \lambda_g$
$\lambda_{reactor} = (1 - \varepsilon_v) \lambda_s + \varepsilon_v \lambda_g, \quad \lambda_s = \beta_{cat} \lambda_{cat} + \beta_{qua} \lambda_{qua}, \quad \beta_{cat} + \beta_{qua} = 1$
<b>Thermal Conductivity of Pure Gases:</b>
$\lambda_i = A_i + B_i T + C_i T^2 + D_i T^3$
<b>Thermal Conductivity of Gas Mixture:</b>
$\lambda_g = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i \lambda_i}{\sum_{j=1}^{N_i} x_j \phi_{ij}}, \quad \phi_{ij} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{8 \left(1 + (M_i/M_j)^{1/2}\right)^{1/2}}$
<b>The effective axial conductivity:</b>

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_g} = \frac{\lambda_s^0}{\lambda_g^0} + 0.75(Pr)(Re_p),$$

$$\frac{\lambda_s^0}{\lambda_g^0} = \varepsilon_v^r + \frac{1 - \varepsilon_v^r}{0.139 \varepsilon_v^r - 0.0339 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_p}\right)}$$

**Specific Heat Capacity of Pure Gases:**

$$C_i = a_{0,i} + a_{1,i}t + a_{2,i}t^2 + a_{3,i}t^3 + a_{4,i}/t^2, \quad t = (T/1000)$$

**Specific Heat Capacity of Gas Mixture:**

$$C_{p,g} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} x_i M_i C_i}{\sum_{j=1}^{N_i} x_j M_j}$$

**Standard Enthalpy of Gases:**

$$H_i = H^0 + a_{0,i}t + a_{1,i} \frac{t^2}{2} + a_{2,i} \frac{t^3}{3} + a_{3,i} \frac{t^4}{4} - \frac{a_{4,i}}{t} + a_{5,i} - a_{6,i}, \quad t = (T/1000)$$

## 4. Results and Discussion

As mentioned before, the objective of this study is to demonstrate the capability of advanced and detailed numerical modeling and simulation the system (HTSR+LTSR in series) to characterize the behavior of H<sub>2</sub> generation process. In both pellet and reactor scales, RTT-based derived model equations solved simultaneously by Finite Element Method to evaluate the species composition, pressure, temperature, velocity, diffusion fluxes, heat fluxes and convection. To obtain the accurate and reliable model equations, the multi-scale modeling approach is applied in this work. A typical syngas composition of coal/oxygen-blown gasifier off-gas, (H<sub>2</sub>/CO/H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) = (2.7637/1.00/a/2.1528/0.84475), used in the simulations, where 1<a<6. Table 3 shows the parameters used in the solution of the catalyst pellet and reactor scales' model equations. Thermal conductivity of the spherical pellet and the gas mixture, specific heat capacity of the gas mixture and standard enthalpies of the gases varies with temperature.

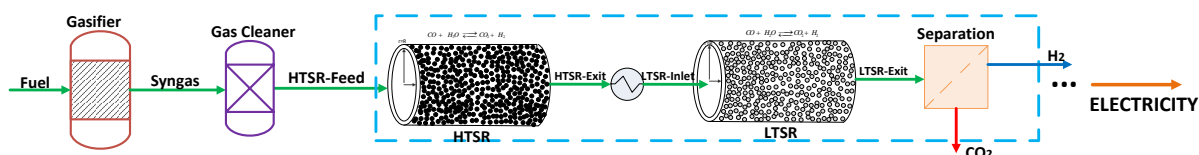
**Table 3.** HTSR and LTSR Parameters for Simulations.

Parameter	Value (LTSR)	Value (HTSR)	Dimension
Catalyst density	592.68	1008	kg/m <sup>3</sup>
Pellet void fraction	0.35	0.35	-
Pellet radius	0.004	0.004	m
Surface area of catalyst	160*10 <sup>3</sup>	160*10 <sup>3</sup>	m <sup>2</sup> /g
Pore volume of catalyst	0.55*10 <sup>-6</sup>	0.55*10 <sup>-6</sup>	m <sup>3</sup> /g
Tortuosity	2.8121	2.8121	-
Mean pore diameter	6.3*10 <sup>-9</sup>	6.3*10 <sup>-9</sup>	m
Inlet pressure	30	40	bar
Inlet temperature	493	573	K
Reactor void fraction	0.7	0.7	-
Chemical-model parameters			
l	0.8	0.74	-
m	0.29	0.47	-
n	-0.07	-0.18	-
q	0	0	-
k <sub>0</sub>	6.3	2623.4	LTSR: mol / atm <sup>l+m+n+q</sup> · h · g HTSR: (m <sup>3</sup> /mol) <sup>l+m+n+q</sup> · s <sup>-1</sup>
E <sub>a</sub>	5.9	80	LTSR: kcal / mol HTSR: kJ / mol

**4.1. Application of the Multi-scale Model to Industrial-Scale IGCC Plant's Reaction System (the HTSR and he LTSR in series).**

The integrated gasification combined cycle-IGCC produces electricity from a solid or liquid fuel. IGCC power plants have similar technology as modern gas fired power plants. IGCC power plants are widely considered being a promising and clean power generation technology. Initial step in IGCC is

converting the fuel to syngas which is a mixture of H<sub>2</sub> and CO. Hydrogen production from syngas can be enhanced by the exothermic shift reaction. In the conventional method, WGS catalysts operated sequentially in two stages at two different temperature levels in the presence of H<sub>2</sub>S followed by separation of the CO<sub>2</sub> from the hydrogen. In the final stage, a combined cycle power block (a gas turbine + a steam turbine process) is used to generate electricity.



**Figure 1.** Representation of hydrogen-based IGCC power plant design.

**4.1.1. Catalyst-Pellet Scale Results**

By using the developed multi-scale model calculations pressure and temperature profiles evaluations of both LTSR and HTSR catalysts along the pellet radius were performed for different operating conditions. These results confirm that there is very small pressure and temperature variation between the pellet surface and center. These results confirm that the general assumptions of the uniform pressure and temperature across the pellet in industry and academic research. These small temperature and pressure changes inside the

catalyst do not significantly influence the reaction kinetics. As a conclusion, it is acceptable to consider that the catalyst has uniform temperature profile and isobaric condition along the radius. These results will assist to obtain faster convergence for heterogeneous reactor studies in industry and academia.

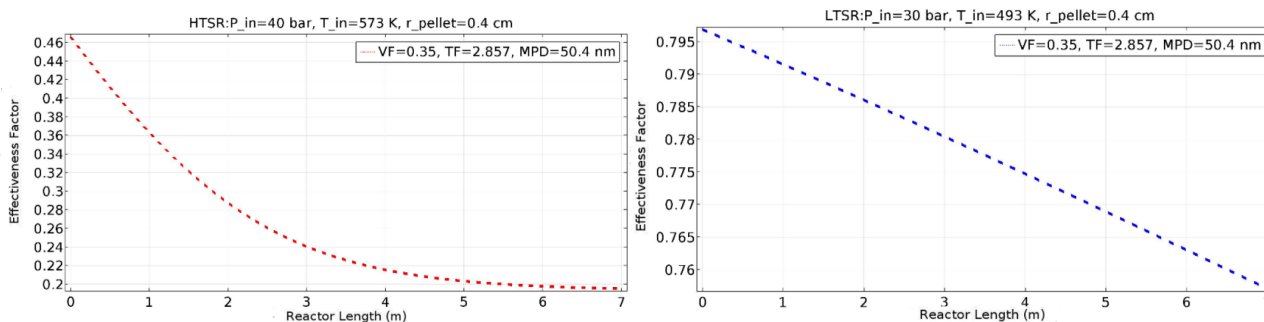
The local effect of the catalyst's features such as mean pore diameter, volumetric porosity and tortuosity was studied by simulations. As expected, the reaction rate is proportional to mean pore diameter and pellet's volumetric porosity increase. Due to having the nature of the unchanging total

mole numbers (being steady state), along the pellet radial position, it is necessary to obtain the result of being zero in sum of the species' molar fluxes- mass averaged velocities. These conditions fulfil consistency checks of the simulation results and the employed numerical accuracy. In this study, the mass/mole averaged velocities and total flux sum for the mole-based DGM at steady-state conditions were found to be zero as expected. Based on the obtained results, it is reasonable to say that the diffusion term evidently dominates over the convective term. Thus, neglect of the species' convective flux contribution in the calculations is an acceptable conclusion.

#### 4.1.2. Reactor Scale Results

Most of the existing studies related to WGS in literature assumes constant effectiveness factors of

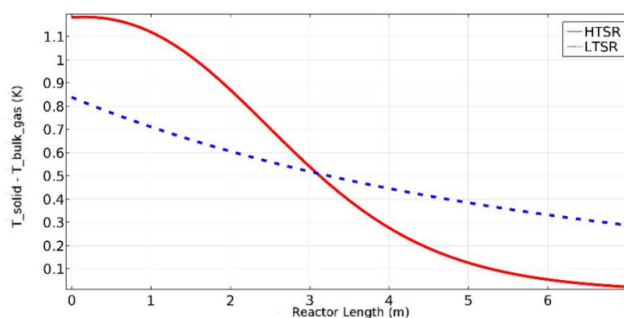
the catalysts along the reactors. However, in this study, the DGM is used to evaluate the effectiveness factor of the catalysts for throughout the system reactors' axes. Due to the WGS stoichiometric feature, the multi-scale model-based calculation of the effectiveness factors results same value for all reaction related species, CO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. Figure 4 demonstrates that the effectiveness factor declines throughout for both the HTSR and LTSR (adiabatic reactors) lengths. The reason for this decline can be explained as that because of the exothermicity of the WGS, the acceleration on the intrinsic kinetics of the reaction occurs through the axes of the both reactors (HTSR-LTSR due to temperature increments which causes more increment in the denominator of effectiveness-factor's equation respect to its numerator.



**Figure 2.** Effectiveness factor axial profiles for HTSR-Left and LTSR-Right, VF: void fraction, MPD: mean pore diameter and TF: Tortuosity Factor.

The temperature profiles along the both reactors' length are shown in Figure 5. Multi-scale modeling approach enables to quantify the temperature evaluations separately for all domains in both

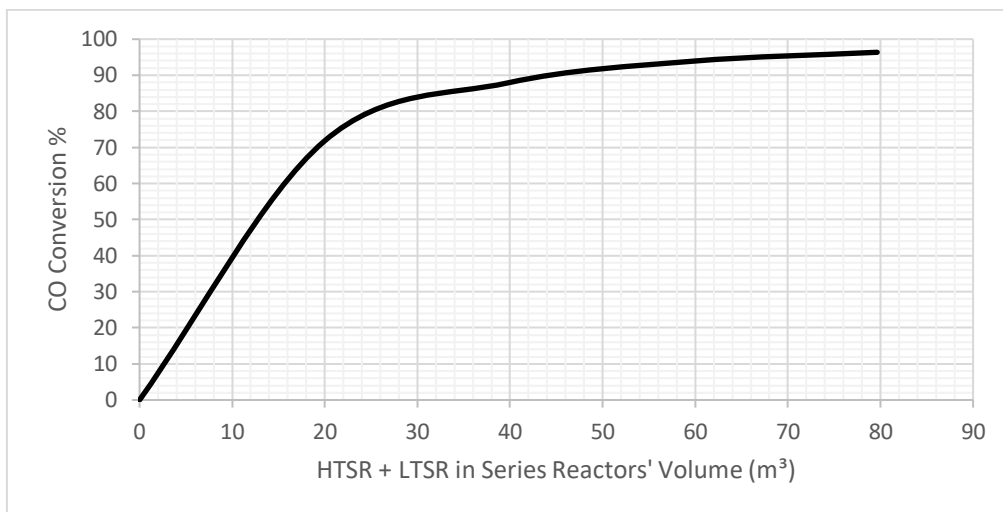
reactors. Throughout the reactor lengths for HTSR and LTSR, the observed maximum-minimum temperature differences between the bulk gas phase and catalyst pellet are 1.2-0.02 K for HTSR and 0.85-0.285 K for LTSR, respectively.



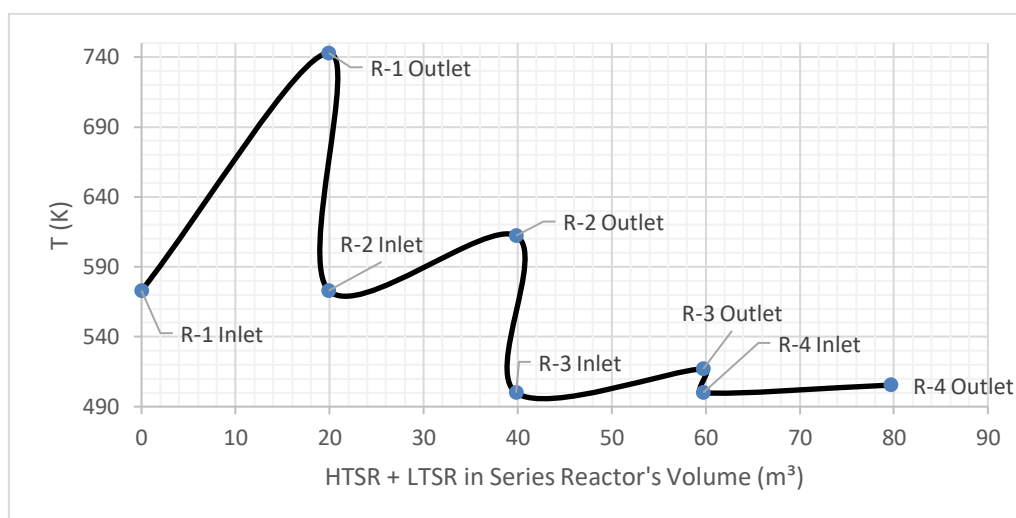
**Figure 3.** Axial temperature profiles (temperature difference between catalyst pellet and reactor bulk gas) for HTSR and LTSR at steady-state conditions.

For industrial applications, a integrated HTSR and LTSR system is preferred method to achieve a desired high conversions from the WGSR. Figure 6 shows the conversion evaluation of this system for the industrial scale process. The CO conversion is nearly completed or reached the high levels for the selected starting reaction temperature of the LTSR (493 K) and HTSR (573 K). In general, industrially,

observed CO conversion by using HTSR and LTSR system is above 97% and as can be seen in Figure 6, similar results achieved in this study by using multi-scale modeling approach. Operating both HTSR and LTSR at higher pressure and H<sub>2</sub>O/CO ratios promote to reach complete or higher-level conversions.



**Figure 4.** Combined conversion evaluation along the combined reactor's length for industrial scale application.



**Figure 5.** Combined system's (HTSR+Cooling+LTSR) temperature profiles evaluations along the combined reactor's length for industrial scale application.

Figure 7 shows the temperature profiles' evaluations along the combined reactor's length for the combined HTSR and LTSR system. In this study, 2 HTSR and 2 LTSR in series (industrial design) were simulated. In Figure 7, R-1 and R-2 indicates HTSR-1 and HSTR-2 while R-3 and R-4 represent LTSR-1 and LTSR-2 and all reactors operates adiabatically. R-1 and R-2 starting operating temperatures is 573 K

while R-3 and R-4 is 493 K and multi-scale model captured outlet temperatures are shown in Figure 7.

### 5. Conclusions

A multi-scale modeling and simulation of the LTSR and HTSR has been individually performed to investigate the mass and heat transfer effects on the

detailed behavior of the reactions in the catalyst beds and combined process. The developed multi-scale model is applicable to any catalyst for which kinetic data are available. A comparative investigation of two diffusion rate expressions Knudsen diffusion only, and both Knudsen and normal diffusion performed to determine the limiting diffusion step for the considered conditions and catalyst. As a result, it was found that Knudsen diffusivity is the limiting diffusion step for the considered conditions and catalysts. The influence of operating conditions and design parameters on the reactor performance is mainly addressed. The local influence of the catalyst pellet design parameters have been investigated using the rigorous dusty gas model (DGM), Chapman-Enskog models, and finite element method (FEM) theory. The single pellet simulations show us that the simplification on the application of the Dusty Gas Model (DGM), and conceding the uniformity on temperature and pressure gradient inside the spherical pellet are acceptable assumptions. Calculated and comparative temperature profiles of catalyst-pellet and bulk gas phase along the reactors were addressed. Then, the application of the Multi-scale Model to Industrial Scale IGCC Plant's Reaction System was performed, and it was demonstrated that the developed multi-scale model-based simulation outcomes result a very good match with real plant's operating conditions.

## 6. Notation

### English Symbols

$A^p$  ( $m^2$  of domain  $p$ ) = the control surface area of pellet domain.

$A_c^r$  ( $m^2$ ) = the tubular reactor's reactor cross section area.

$c_{\gamma,i}^\alpha$  (molar density) =  $\frac{\text{mole of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{m^3 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$

$C_{p,i}^\alpha$  (molar specific heat at constant pressure) =  $\frac{J \text{ of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(\text{mol} \cdot K) \text{ of the } i^{\text{th}} \text{ component of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$

$C_v^\alpha$  (molar specific heat at constant volume) =  $\left( \frac{J \text{ phase } s \text{ within domain } \alpha}{(\text{mol} \cdot K) \text{ of phase } s \text{ within domain } \alpha} \right)$

$CS^\alpha$  (Control surface) =  $m^2$  of domain  $\alpha$

$CV^\alpha$  (Control volume) =  $m^3$  of domain  $\alpha$

$D_{ij}^\alpha$  (binary diffusion coefficient) =  $\frac{m^2 \text{ of phase } f \text{ within of domain } \alpha}{s}$

$D_{ij}^{\text{eff}}$  (effective binary diffusion coefficient) =  $\frac{m^2 \text{ of domain } p}{s}$

$D_{ik}$  (Knudsen diffusion coefficient) =  $\frac{\text{total } m^2 \text{ of domain } p}{s}$

$d^p$  (m) = Diameter of the catalytic pellet

$d_{\text{pore}}^p$  (m) = Mean pore diameter in domain  $p$

$d^r$  (m) = Diameter of the tubular reactor

$h^\alpha$  (Interfacial heat transfer coefficient) =  $\frac{J \text{ from phase } f \text{ within domain } \alpha}{((m^2 \cdot K) \text{ of phase } s \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$H_\gamma^\alpha$  (Mass specific enthalpy) =  $\frac{J \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{kg of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$

$\tilde{H}_i^0$  (standard molar enthalpy of formation) =  $\frac{J \text{ of species } i \text{ in phase } f}{\text{mol of species } i \text{ in phase } f}$

$\tilde{h}_{\gamma,i}^\alpha$  (molar enthalpy) =  $\left( \frac{J \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{mol of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha} \right)$

$k_\gamma^\alpha$  (Thermal conductivity) =  $\frac{J \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{((m \cdot K) \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$\overline{j}_{\gamma,i}^\alpha$  (diffusion mass flux) =  $\frac{\text{mol of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(m^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$\overline{j}_{\gamma,i}^\alpha$  (combined diffusion – convection mass flux) =  $\frac{\text{mol of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(m^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$L^r$  (m) = Length of the tubular reactor

$M_i$  (molar mass) =  $\frac{\text{kg of } i}{\text{mol of } i}$

$\vec{n}$  (dimensionless) =

Unit vector direction of the differential area  $dA$  of the CS

$\overline{n}_{\gamma,i}^\alpha$  (diffusion molar flux) =  $\frac{\text{kg of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(m^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$\overline{N}_{\gamma,i}^\alpha$  (combined diffusion – convection mass flux) =  $\frac{\text{kg of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(m^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$p^\alpha$  (Pressure) =  $\frac{J \text{ of phase } f \text{ within domain } \alpha}{m^3 \text{ of phase } f \text{ within domain } \alpha}$

$\overline{Q}_\gamma^\alpha$  (Heat flux) =  $\frac{J \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(m^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$

$\overline{q}_{f \rightarrow s}^\alpha$  (Heat transfer) =  $\frac{J \text{ from phase } f \text{ to } s \text{ within domain } \alpha}{(m^3 \text{ of domain } \alpha) \cdot s}$



$$R_{\gamma,i}^{\alpha} \text{ (volumetric generation rate)} = \frac{\text{mols of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(\text{m}^3 \text{ of domain } \alpha) \cdot s}$$

$$\bar{R}_{f,i}^p \text{ (generation rate)} = \frac{\text{mols of species } i \text{ in phase } f \text{ within domain } p}{(\text{kg of phase } s \text{ within domain } p) \cdot s}$$

$$\tilde{R} \text{ (Universal gas constant)} = \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

$$r^p \text{ (m)} = \text{Radius of the pellet}$$

$$T_{\gamma}^{\alpha} \text{ (K)} = \text{Temperature}$$

$$T^p \text{ (K)} = \text{Temperature of the pellet}$$

$$T^w \text{ (K)} = \text{Temperature of inner wall}$$

$$V^p \text{ (Total volume)} = \text{m}^3 \text{ of domain } p$$

$$\bar{v}_{\gamma}^{\alpha} \left( \frac{m}{s} \right) = \text{Mass average velocity}$$

$$v_{\gamma,i}^{\alpha} \left( \frac{m}{s} \right) = \text{species velocity}$$

$$w_{\gamma,i}^{\alpha} \text{ (species mass fraction)} = \frac{\text{kg of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{kg of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$$

$$x_{\gamma,i}^{\alpha} \text{ (species molar fraction)} = \frac{\text{mol of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{mol of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$$

### Greek symbols:

$$\varepsilon_{\gamma,v}^{\alpha} \text{ (Volumetric fraction)} = \frac{\text{m}^3 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{total m}^3 \text{ of domain } \alpha}$$

$$\varepsilon_{\gamma,A}^{\alpha} \text{ (Surface fraction)} = \frac{\text{m}^2 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{total m}^2 \text{ of domain } \alpha}$$

$$\rho_{\gamma}^{\alpha} \text{ (Mass density)} = \frac{\text{kg of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{m}^3 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$$

$$\rho_{\gamma,i}^{\alpha} \text{ (species mass concentration)} = \frac{\text{kg of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{\text{m}^3 \text{ of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}$$

$$\tau \text{ (Tortuosity)} = \frac{\text{m of diffusion pathlength in phase } f \text{ within domain } p}{\text{m of CV length in domain } p}$$

$$\mu_f^{\alpha} \text{ (Viscosity)} = \frac{\text{kg of species } i \text{ in phase } \gamma \text{ within domain } \alpha}{(\text{m of phase } \gamma \text{ within domain } \alpha) \cdot s}$$

$$\nu \text{ (dimensionless)} = \frac{\text{Total number of species in the phase} - \text{domain}}{\text{Total number of species in the phase} - \text{domain}}$$

## 7. References

Abdollahi, M., Yu, J., Hwang, H.T., Liu, P.K., Ciora, R., Sahimi, M., Tsotsis, T.T., 2010. Process intensification in hydrogen production from biomass-derived syngas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **49**, 10986–10993.

Adrover, M.E., López, E., Borio, D.O., Pedernera, M.N., 2009. Simulation of a membrane reactor for the WGS reaction: Pressure and thermal effects. *Chemical Engineering Journal*, **154**, 196–202.

Chen, W.-H., Lin, M.-R., Jiang, T.L., Chen, M.-H., 2008. Modeling and simulation of hydrogen generation from high-temperature and low-temperature water gas shift reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 6644–6656.

da Cruz, F.E., Karagöz, S., Manousiouthakis, V.I., 2017. Parametric Studies of Steam Methane Reforming Using a Multiscale Reactor Model. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, 14123–14139.

Ding, O.L., Chan, S.H., 2008. Water–gas shift reaction – A 2-D modeling approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 4325–4336.

Francesconi, J.A., Mussati, M.C., Aguirre, P.A., 2007. Analysis of design variables for water-gas-shift reactors by model-based optimization. *Journal of Power Sources*, **173**, 467–477.

Froment, G.F., 1974. Fixed bed catalytic reactors. Technological and fundamental design aspects. *Chemie Ingenieur Technik*, **46**, 374–386.

Garshasbi, A., Chen, H., Cao, M., Karagöz, S., Ciora Jr, R.J., Liu, P.K., Manousiouthakis, V.I., Tsotsis, T.T., 2017. Membrane-based reactive separations for process intensification during power generation. *Catalysis Today*, **331**, 18-29.

Huang, J., Ho, W.W., 2008. Effects of system parameters on the performance of CO<sub>2</sub>-selective WGS membrane reactor for fuel cells. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, **39**, 129–136.

Karagöz, S., Chen, H., Cao, M., Tsotsis, T.T., Manousiouthakis, V.I., 2019a. Multiscale model based design of an energy-intensified novel adsorptive reactor process for the water gas shift reaction. *AIChE Journal*, **65**, e16608.

Karagöz, S., Tsotsis, T.T., Manousiouthakis, V.I., 2019b. Multi-scale modeling and simulation of a novel membrane reactor (MR)/adsorptive reactor (AR) process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **137**, 148–158.

Karagöz, S., da Cruz, F.E., Tsotsis, T.T., Manousiouthakis, V.I., 2018. Multi-scale membrane reactor (MR) modeling and simulation for the water gas shift reaction. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **133**, 245–262.

Karagöz, S., Tsotsis, T.T., Manousiouthakis, V.I., 2020. Multi-scale model based design of membrane reactor/separator processes for intensified hydrogen production through the water gas shift reaction. *International Journal of Hydrogen Energy, Hydrogen separation/purification via membrane technology*, **45**, 7339–7353.

Lim, J.Y., Dennis, J.S., 2012. Modeling reaction and diffusion in a spherical catalyst pellet using multicomponent flux models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **51**, 15901–15911.

Miller, C.T., Christakos, G., Imhoff, P.T., McBride, J.F., Pedit, J.A., Trangenstein, J.A., 1998. Multiphase flow and transport modeling in heterogeneous porous media: challenges and approaches. *Advances in Water Resources*, **21**, 77–120.

Natesakhawat, S., Wang, X., Zhang, L., Ozkan, U.S., 2006. Development of chromium-free iron-based catalysts for high-temperature water-gas shift reaction. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **260**, 82–94.

Rout, K.R., Jakobsen, H.A., 2015. A numerical study of fixed bed reactor modelling for steam methane reforming process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **93**, 1222–1238.

Seo, Y.-S., Seo, D.-J., Seo, Y.-T., Yoon, W.-L., 2006. Investigation of the characteristics of a compact steam reformer integrated with a water-gas shift reactor. *Journal of Power Sources*, **161**, 1208–1216.

Wright, G.T., Edgar, T.F., 1994. Nonlinear model predictive control of a fixed-bed water-gas shift reactor: An experimental study. *Computers & Chemical Engineering, An international journal of computer applications in chemical engineering*, **18**, 83–102.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055702 (1181-1186)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055702 (1181-1186)

DOI: 10.35414/akufemubid.946526

Araştırma Makalesi / Research Article

## Tungsten Borür Takviyeli Bakır Matrisli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi

Aytekin HİTİT<sup>1</sup>, Muhammed Emir KARA<sup>1\*</sup>, Emre AKDAĞ<sup>1</sup>, Lokman ERDOĞAN<sup>1</sup>, Yaşar Samet AZINÇ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

Sorumlu yazar: e posta:; muhammed-emir.kara@usr.aku.edu.tr  
hitit@aku.edu.tr,  
emre.kdg1@outlook.com,  
lokmanerd4242@yandex.com  
azinc42@hotmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9801-7860>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2312-7840>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0110-7753>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9578-2214>  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5506-7291>

Geliş Tarihi: 01.06.2021

Kabul Tarihi: 25.09.2021

### Öz

#### Anahtar kelimeler

Bakır;  
Mekanik Özellikler;  
Bakır Matrisli  
Kompozit;  
Mikrosertlik

Bakırın iyi ısı ve elektrik iletkenliğinin yanı sıra süneklik ve korozyon direncinin yüksek olması ve birçok uygulama alanının da yüksek çekme mukavemeti ve sünekliğin gereksinimi, çoğu alanda bakır vazgeçilmez kılmaktadır. Bu doğrultuda sertlik ve tokluğu aynı anda iyileştirebilmek adına bakır matrisli kompozitlerin imalatı iyi bir çözüm sunmaktadır. Bakır matrisli kompozit malzemeler, düşük yoğunlukları, çalışmalar sonucu gelişmiş yorulma mukavemetleri, yüksek ölgül mukavemetleri ve korozyon dirençleri sayesinde mühendislik alanının da önemini giderek arttırmaktadır. Bu çalışmada değişik oranlarda bakır, tungsten ve bor içeren Cu-W-B alaşımları sentezlenmiş ve alaşımların katılaşması sırasında yapıda tungsten borürlerin çökmesi ile kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Kompozitlerin yapısında oluşan fazların mikrosertlik değerine olan etkisi incelenmiştir. Tungsten içeriğinin artırılması ile kompozitlerin yapısında çökelen borürlerin hacim oranı kayda değer bir şekilde artmıştır. Bunun sonucunda da mikrosertlik değerlerinde önemli oranda bir artış meydana gelmiştir.

## Development of Tungsten-Boride Reinforced Copper Matrix Composite Materials.

### Abstract

**Keywords**  
Copper;  
Mechanical Properties;  
Copper Matrix  
Composites;  
Microhardness

Copper's good thermal and electrical conductivity, as well as its high ductility and corrosion resistance, and the need for high tensile strength and ductility in many application areas make copper indispensable in most areas. In this direction, the production of copper matrix composites offers a good solution in order to improve the hardness and toughness at the same time. Copper matrix composite materials are becoming increasingly important in the field of engineering, thanks to their low densities, improved fatigue strength, high specific strength and corrosion resistance. In this study, Cu-W-B alloys containing copper, tungsten and boron in different proportions were synthesized and composite materials were produced by the precipitation of tungsten borides in the structure during the solidification of the alloys. The effect of the phases formed in the structure of composites on the microhardness value was investigated. With the increase of tungsten content, the volume fraction of the borides precipitated in the structure of the composites increased significantly. As a result, there was a significant increase in microhardness values.

## 1. Giriş

İnsanlık tarihinin varoluşundan itibaren bakır elementi; iyi ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek korozyon direnci, imalat süreçlerinin kolay olması ve düşük maliyeti nedeniyle; çelik ve alüminyum-dan sonra en fazla kullanım alanına sahip olan element olarak yaygınca kullanılmaktadır (Uraylı, 2018). Fakat bu üstün özelliklerinin yanı sıra; düşük sertliği ve gerilme mukavemeti, zayıf aşınma direnci nedeniyle uygulama alanlarındaki kullanımları sınırlanmaktadır (Akhtar *et al.* 2009).

Bakırın mekanik özelliklerini arttırabilmek adına literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; genel olarak iki yol izlenmektedir (Zhou *et al.* 2005). Bunlardan birisi çökeltme sertleşmesi ile bakıra küçük miktarlar da belirlenen elementlerin eklenmesiyle daha düşük sıcaklık şartlarında sert ikinci bir fazın çökmesi sağlanmasıdır. Fakat yaşlanarak sertleştirilen alaşımların çoğunda çökelen fazın sıcaklık artışı ile büyümesi; yapısal kararsızlık sebebiyle yüksek sıcaklıklarda dayanım eksikliğine sebebiyet vermektedir. Bakıra zirkonyum veya krom eklenmesi ile çökeltme sertleşmesi gerçekleştirilerek yapılan bir çalışma incelendiğinde; 500° C'nin üzeri sıcaklıklar da elde edilen alaşımın dayanımının düştüğü ortaya koyulmaktadır (Correia *et al.* 1997, Morris & Morris 1988). Karşılaşılan bu sorun nedeniyle çökeltme sertleşmesi yerine daha uygulanabilir bir yöntem olan, bakır matrise elde edilmek istenen özelliklere göre takviye malzemesi eklenmesi sonucu bakır matrisli kompozit malzeme elde etme; var olan özellikler dışında daha üstün özelliklere sahip bir malzeme ortaya çıkarabilme açısından daha cazip hale gelmektedir (Islak vd. 2017, Akhtar *et al.* 2009).

Bakır esaslı alaşım sistemlerinin en önemli avantajı; gelişmiş kompozisyon üzerinde devamlı çalışmalar ile birçok uygulama alanında tercih edilmesidir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında; bakırın süneklik ve korozyon direncinin yüksek olması ve birçok uygulama alanının da yüksek çekme mukavemeti ve sünekliğin gereksinimi, çoğu alanda bakırı vazgeçilmez kılmaktadır. Bu doğrultuda sertlik ve

tokluk mekanik özelliklerini aynı anda iyileştirebilmek adına bakır matrisli kompozitlerin imalatı iyi bir çözüm sunmaktadır. Bakır matrisli kompozit malzemeler; düşük yoğunlukları, çalışmalar sonucu gelişmiş yorulma mukavemetleri, yüksek özgül mukavemetleri ve korozyon dirençleri sayesinde mühendislik alanının da önemini giderek arttırmaktadır (Schubert *et al.* 2008) Hem yüksek sertlik hem de yüksek sünekliğe sahip bakır esaslı malzemelerin araştırılması ve üretimi çalışılan konular arasındadır (Janovszky *et al.* 2018).

Son yıllarda ki bilimsel çalışmalar incelendiğinde; bakır matrise; karbür (SiC, WC, TiC, ZrC), borür (TiB<sub>2</sub>, ZrB<sub>2</sub>) ve oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) parçacıklarının eklenmesi ile bakır matrisli kompozit malzemeler üretilmektedir (Wąsik and Karwan-Baczewska 2016). Bakır matrisli kompozit malzeme eldesinin temel amacı; bakırın kendine has özelliklerinin dışında takviye elemanları ile mekanik özellikleri iyileştirerek ortaya üstün bir malzeme çıkarma motivasyonu olmaktadır (Islak vd. 2017).

Bakır matris içerisine tungsten refrakter metalinin takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur (Michael *et al.* 1999). Literatürde ki çalışmalara örnek verilecek olursa; tungstenin bakır ile birlikte kullanıldığı çalışmalar da aşınma direncini arttırdığı çalışmalar sonucu ortaya koyulmaktadır (Deshpande and Lin 2006).

Bu çalışmada Cu<sub>80</sub>W<sub>4</sub>B<sub>16</sub>, Cu<sub>70</sub>W<sub>6</sub>B<sub>24</sub>, Cu<sub>40</sub>W<sub>12</sub>B<sub>48</sub> ve Cu<sub>30</sub>W<sub>14</sub>B<sub>56</sub> alaşımları sentezlenmiş, yapıda çökelen tungsten borür miktarının değişimine bağlı olarak mikrosertlik değerinin değişimi incelenmiştir.

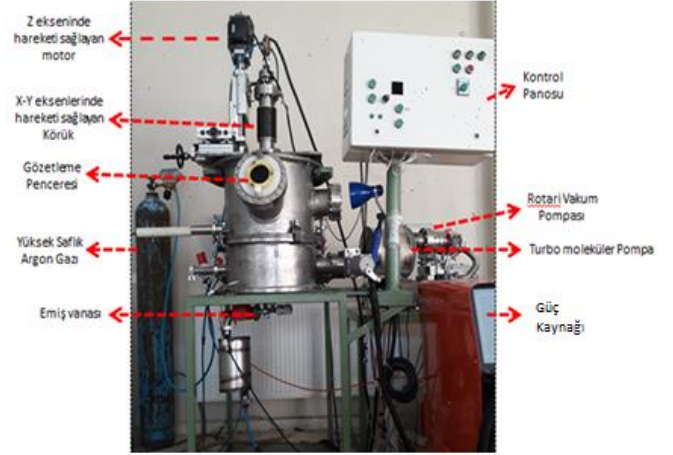
## 2. Materyal ve Metot

Tungsten ve bor oranlarını sistematik olarak artırılması ve bakır oranını da sistematik olarak azaltılması ile dört farklı Cu-W-B alaşımı tasarlanmıştır. Alaşımların kompozisyonları Çizelge 1'de verilmiştir. Alaşımlarının her biri %99,9 saflıkta tozlar kullanılarak hazırlanmıştır.

**Çizelge 1.** Alaşımların Kompozisyonları

Alaşım	Cu	W	B
Cu80	80	4	16
Cu70	70	6	24
Cu40	40	12	48
Cu30	30	14	56

Alaşımları oluşturan elementlerin tozları yaklaşık 25-30 dk boyunca manuel bir şekilde karıştırıldıktan sonra hidrolik pres ile 100 bar basınç altında tablet haline getirilmiştir. Ardından bu alaşım tabletleri vakum ark ergitme ve döküm fırınında (Resim 1.) 1.4 atm basınca sahip yüksek saflıktaki argon ortamında, tungsten elektrot ile ve 350 A akım kullanarak ergitilmiştir. Homojenizasyonu sağlamak için, ergitme işlemi her seferinde ters çevirmek suretiyle üç kez yapılmıştır. Daha sonra alaşımların 0,5 mm kesit kalınlığına sahip numuneleri bakır kalıp kullanarak, emme döküm yöntemi ile üretilmiştir. Elde edilen numunelerin yapısal karakterizasyonu Bruker D8 Advance X-ışınları kırınımı (XRD) cihazında Vantec dedektörü ile yapılmıştır. Tarama işlemi  $Cu-K\alpha$  x-ışını kullanılarak  $20-100^\circ$  ( $2\theta$ ) arasında  $0.04^\circ/s$  tarama hızıyla yapılmıştır. XRD kırınım desenlerinin analizi Rietveld yöntemi ile (MAUD yazılımı kullanılarak) yapılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri Olympus BX51M polarize optik mikroskop ile yapılmıştır. Alaşımların mikrosertlik değerleri Vickers mikrosertlik cihazı ile 2,94 N yük altında ölçülmüştür.

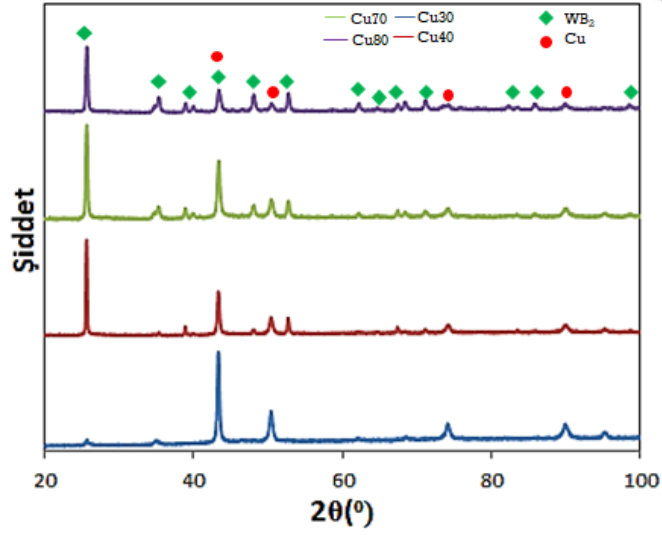


**Resim 1.** Ark Ergitme ve Döküm Fırını

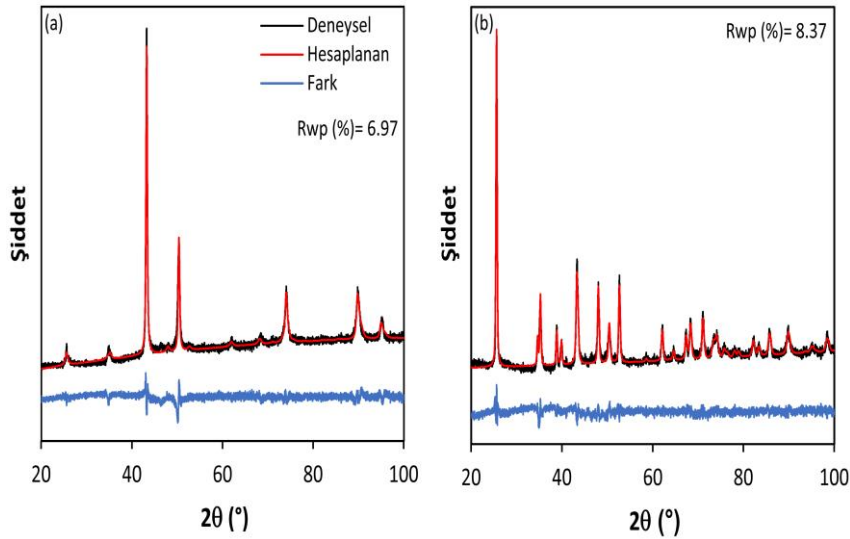
### 3. Bulgular

#### 3.1. XRD Analiz Sonuçları

Alaşımların XRD desenleri Şekil 1'de gösterilmiştir. En yüksek bakır oranına sahip olan CU80 alaşımı yüksek oranda Cu fazı içermektedir. Ayrıca yapıda çok düşük miktarda  $WB_2$  fazı da bulunmaktadır. Söz konusu fazların pik şiddetleri incelendiğinde, tungsten ve bor miktarı artırılması ile Cu fazının hacim oranının azaldığı  $WB_2$  fazının hacim oranının da arttığı görülür. Ayrıca tungsten ve bor miktarlarının değiştirilmesinin çökelen borür fazının türünü değiştirmediği de görülmektedir. En yüksek ve en düşük bakır içeriğine sahip  $Cu_{80}W_4B_{16}$  ve  $Cu_{30}W_{14}B_{56}$  alaşımlarının XRD desenlerinin Rietveld analiz sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.  $Cu_{80}W_4B_{16}$  alaşımının yapısında hacimce %96 Cu ve %4  $WB_2$  fazı bulunmaktadır. Bakır oranı en düşük ve tungsten ile bor oranı en yüksek olan olan  $Cu_{30}W_{14}B_{56}$  alaşımı ise %57 hacim oranında Cu fazı ve %43 hacim oranında  $WB_2$  fazı içermektedir.



Şekil 1. Alaşımların XRD Analizleri



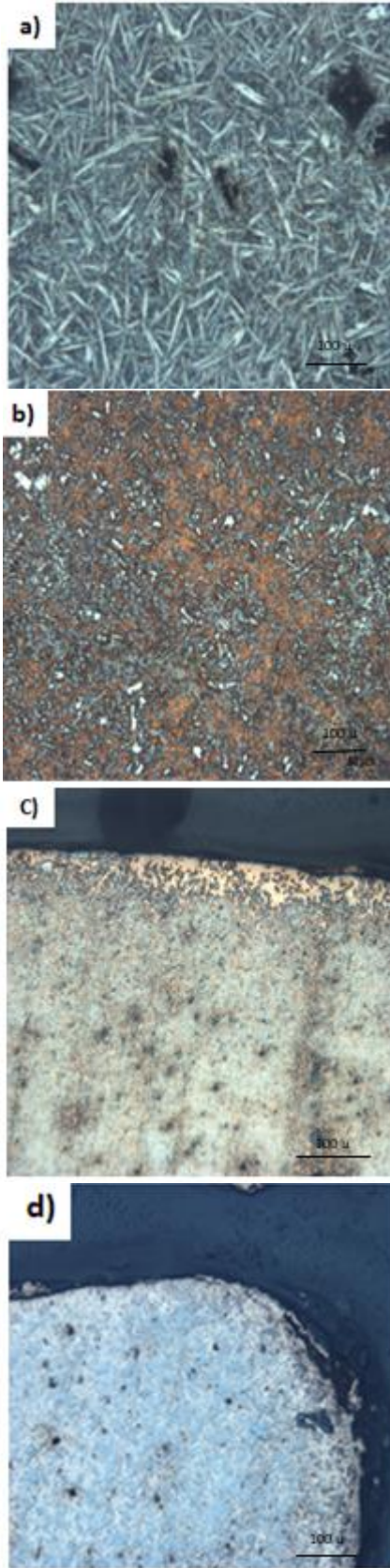
Şekil 2. a)  $Cu_{80}W_4B_{16}$  alaşımlarının, b)  $Cu_{30}W_{14}B_{56}$  alaşımlarının Rietveld Analizi

### 3.2. Polarize Optik Mikroskop Görüntüleri

Alaşımların numunelerinin polarize optik mikroskop görüntüleri Resim 2'de verilmiştir.  $Cu_{80}W_4B_{16}$  ve  $Cu_{70}W_6B_{24}$  alaşımlarının mikroyapılarında ikincil faz oranı oldukça düşüktür (Resim 2.a-b). Elde edilen bu sonuç XRD sonuçları ile de uyumludur.

$Cu_{40}W_{12}B_{48}$  alaşımlarının yapısında çökelen  $WB_2$  fazının oranı daha yüksek olduğu için mikroyapı görüntülerinde net bir şekilde görülmektedir. Tungsten ve bor içeriği en yüksek alaşım olan  $Cu_{30}W_{14}B_{56}$  alaşımlarının mikroyapısında çökelen iğnemsî yapıdaki  $WB_2$  fazı taneleri de ayrıntılı bir şekilde görülmektedir (Resim 2.d)





**Resim 2.** a)  $\text{Cu}_{80}\text{W}_4\text{B}_{16}$ , b)  $\text{Cu}_{70}\text{W}_6\text{B}_{24}$ , c)  $\text{Cu}_{40}\text{W}_{14}\text{B}_{56}$  ve d)  $\text{Cu}_{30}\text{W}_{12}\text{B}_{48}$  alaşımlarının polarize optik mikroskop görüntüleri

### 3.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları Çizelge 2' de gösterilmiştir. Alaşımların sertlikleri incelendiğinde bakır oranının azalması ve bunun sonucunda tungsten ve bor oranlarının artırılması ile alaşımların mikrosertlik değerlerinin arttığı gözlenmektedir.

**Çizelge 2.** Alaşımların Vickers mikrosertlik değerleri

Alaşımlar	Ölçümler			
	1	2	3	Ortalama
Cu80	160	125	142	142
Cu70	190	196	228	205
Cu40	226	288	233	249
Cu30	594	443	631	556

### 4. Tartışma ve Sonuç

Alaşımların bakır miktarının azaltılması ve tungsten ile bor miktarlarının artırılması sonucu yapıda çökelen borür fazının hacim oranı artmaktadır. Bunun sonucunda alaşımların sertliklerinde kayda değer bir artış meydana gelmektedir. % 80 bakır içeren alaşımın sertliği 142 Hv olarak ölçülmüştür. Bu alaşım çok düşük miktarda (%4)  $\text{WB}_2$  fazı içerdiği için mikrosertlik değeri de oldukça düşüktür. Bakır oranı %30 olan alaşımın sertliği de 556 Hv olarak belirlenmiştir. Mikrosertlik değerinde meydana gelen bu artışın sebebi yapıda çökelen  $\text{WB}_2$  fazının hacim oranının çok daha yüksek (%43) olmasıdır. XRD sonuçlarına göre yapıda sadece tek bir tip borür çökelmiştir ve bu faz da  $\text{WB}_2$ 'dir. Her ne kadar bu fazın çökmesi sonucu kayda değer sertlik değerleri elde edilmiş olsa da oldukça yüksek sertliğe (>4000 Hv) sahip olan  $\text{WB}_4$  fazı çökeltilebildiği takdirde çok daha yüksek sertliğe sahip kompozit malzemelerin elde edilmesi mümkün olacaktır.  $\text{WB}_4$  fazının çökeltilebilmesi için gerekli kompozisyonların tespit edilmesi için, alaşımda bulunan tungsten ve bor elementlerinin oranlarının sistematik olarak değiştirilmesi gerekmektedir.



## **Teşekkür**

Bu çalışma 18.KARİYER.220 numaralı AKU-BAPK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Zhou, Z. M., Wang, Y. P., Gao, J., & Kolbe, M.,2005. Microstructure of rapidly solidified Cu-25 wt.% Cr alloys. *Materials Science and Engineering A*, **398**, 318–322.

## **5. Kaynaklar**

Akhtar, F., Askari, S. J., Shah, K. A., Du, X., Guo, S., 2009. Microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and wear behavior of high volume TiC reinforced Cu-matrix composites. *Materials Characterization*, **60**, 327–336.

Correia, J. B., Davies, H. A., & Sellars, C. M., 1997. Strengthening in rapidly solidified age hardened Cu-Cr and Cu-Cr-Zr alloys. *Acta Materialia*, **45**, 177–190.

Islak, S., Akkaş, M., Kaya, Ü., Güleç, H.G., 2017. Cu-TiC Kompozitlerin Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları (YSA) Modeli ile Tahmini. *Technological Applied Science*, **12**, 122-129.

Morris, D. G. , & Morris, M. A. ,1988. Rapid solidification and mechanical alloying techniques applied to CuCr alloys. *Materials Science and Engineering*, **104**, 201–213.

Schubert, T. , Trindade, B., Weißgärber, T., & Kieback, B., 2008. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications. *Materials Science and Engineering A*, **475**, 39–44.

Science, M. M., 2018. Development of novel ultra-fine grain Cu Metal Matrix Composites reinforced with Ti-Cu-Co-M ( M : Ni , Zr ) amorphous-nano-crystalline powder. *Journal of Mining and Metallurgy*, **54**, 349–360.

Uraylı, Ç., 2018. Cu-B4C Kompozit Malzemelerdeki Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 140.

Wąsik, M., Karwan-Baczewska, J.,2016. Copper metal matrix composites reinforced by titanium nitride particles. *Key Engineering Materials*, **682**, 270–275.

## A Study on Physicochemical Characteristics of Surface Waters in The Area of Dereli (Giresun, Turkey)

Hulya KACMAZ

Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, İzmir.

Corresponding author email: hulya.kacmaz@deu.edu.tr; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7752-0408>

Geliş Tarihi: 01.08.2021

Kabul Tarihi: 19.10.2021

### Abstract

Some physicochemical characteristics of surface waters (main river and some streams) in the area of Dereli (Giresun) were investigated. Additionally, certain parameters and quality indices, which may affect the usability of waters for agriculture, were assessed. Available data indicate that the waters have slightly alkaline in character, with pH values ranging from 7.6 to 8.35. The waters are classified as fresh based on their EC values, which ranges from 210–590  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . The predominant anion in nearly all of the investigated waters is bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) is, after bicarbonate, the second most abundant anion in the waters, followed by chloride ( $\text{Cl}^-$ ). Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) is the most abundant cation in the waters examined, followed by magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) and potassium ( $\text{K}^+$ ) in descending order. The levels of all ions examined in the waters are in the ranges recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO) for irrigation water. Moreover, the calculated values of U.S. Salinity (SAR), Residual sodium carbonate (RSC), Sodium Percentage (Na %), Kelly's ratio (KR) and Magnesium hazard (MH) indicate suitable of the waters for irrigation. In general, the surface waters in the locations studied are of good physicochemical quality, and also adequate for irrigation.

### Keywords

Surface water;  
Physicochemistry;  
Quality; Dereli

## Dereli (Giresun, Türkiye) Bölgesi Yüzeysel Sularının Fizikokimyasal Özellikleri Üzerine Bir Araştırma

### Öz

Bu çalışmada, Dereli bölgesi yüzeysel sularının (ana nehir ve akarsular) bazı fizikokimyasal özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, suların tarımsal sulama için kullanılabilirliğini etkileyebilecek bazı parametreler ve kalite indeksleri değerlendirilmiştir. Mevcut veriler, suların hafif alkali karakterde olduğunu ve pH değerlerinin 7.6 ile 8.35 arasında olduğunu göstermektedir. İncelenen sular 210-590  $\mu\text{S}/\text{cm}$  arasında değişen EC değerlerine göre taze olarak sınıflandırılır. İncelenen suların neredeyse tamamında baskın olan anyon bikarbonattır ( $\text{HCO}_3^-$ ). Sülfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bikarbonattan sonra sulara en bol bulunan ikinci anyondur ve bunu klorür ( $\text{Cl}^-$ ) takip eder. İncelenen sulara en bol bulunan katyon ise kalsiyum ( $\text{Ca}^{2+}$ ) olup, bunu sırasıyla magnezyum ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodyum ( $\text{Na}^+$ ) ve potasyum ( $\text{K}^+$ ) izlemektedir. Sulara belirlenen tüm iyon seviyeleri Gıda ve Tarım Örgütü (FAO)'nün sulama suları için önerdiği aralıktadır. Ayrıca, ABD Tuzluluğu (SAR), Kalıntı Sodyum Karbonat (RSC), Sodyum Yüzdesi (Na %), Kelly oranı (KR) ve Magnezyum Tehlikesi (MH) için hesaplanan değerler, suların tarımsal amaçlı sulama için uygun olduğunu göstermektedir. Genel olarak, incelenen lokasyonlardaki yüzeysel suları fizikokimyasal kimyasal olarak iyi kalitededir ve tarımsal amaçlı kullanım için elverişlidir.

### Anahtar kelimeler

Yüzeysel Su;  
Fizikokimya; Kalite;  
Dereli

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### 1. Introduction

Water is the most essential necessities for all lives on the Earth. Based on its source, water may be classified, in general, ground and surface water (Gupta, and Gupta 2002). Surface waters are an extremely important water source. They make up the majority of the water used for public supply and irrigation. Rivers and streams constitute the flowing

surface waters (Int. ref. 1). However, natural processes or man's activities may cause the contamination of surface waters (Kabata-Pendias 2010). When the surface water is contaminated in an area, it not only affects the plants and animals, it harms also people. Therefore, in order to protect both human health and environment, it is essential to review existing water quality in the area.

Giresun is located in Eastern Black Sea Region, which is one of the most important metallogenic area in Turkey. The area hosts numerous metallic mineral deposits and occurrences, particularly in copper, lead and zinc (Int. ref, 2). Dereli is a district of Giresun province. The region has steep topography and a humid and rainy climate. The average annual precipitation is 867 mm with a mean temperature of 12.7 °C. The main river running through the Dereli is Aksu. (Figure 1). A large number of streams merge with the main river, and finally all the water flows into the Black Sea. There are many villages along Aksu river. The parts of the main river and some stream is used by nearby inhabitants for fish farming, agriculture and/or husbandry. However, agriculture and husbandry are fairly limited owing to very steep topography of the area. Corn, cabbage and green bean are the main crops cultivated in the area.

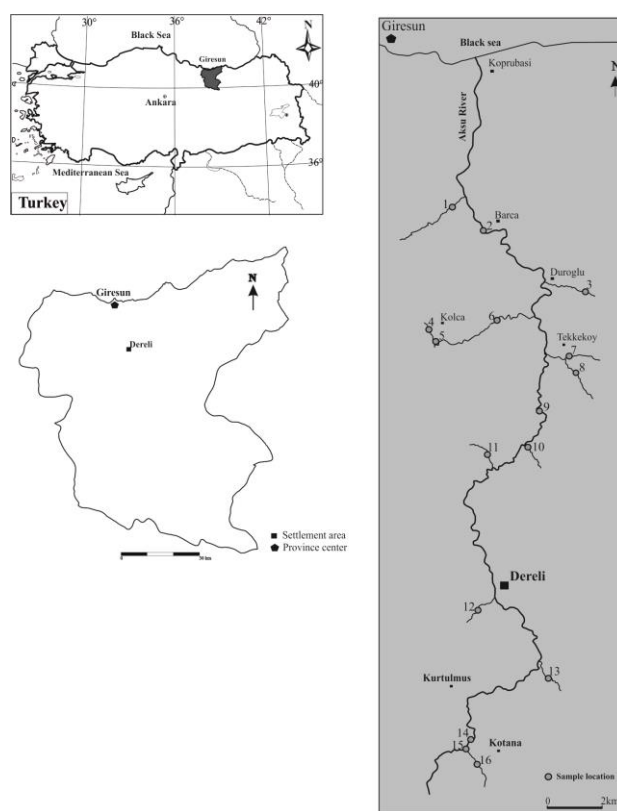
There are scarce number of studies concerning natural waters in the Dereli area. One of which has been made by Kazancı et al. (2010), is relevant to the assessment of the ecological quality of Aksu river water. The other one is a study carried out by Kacmaz (2020) to determine the heavy metal contamination in natural waters of the Dereli area. The present study has focused to assess primarily on some physicochemical characteristics might adversely affecting the quality of surface waters. In addition, the suitability of surface waters for irrigation purposes, was evaluated using various indices, such as sodium absorption ratio (SAR), Sodium percentage (Na %), residual sodium carbonate (RSC), Kelly’s ratio (KR) and magnesium hazard (MH).

## 2. Material and Methods

The studied area, Dereli, is a district of Giresun. The main river flowing through the Dereli area is the Aksu River. In total, 16 samples of surface water were collected from the area. The samples have been taken from the River Aksu and some streams that merge with Aksu River (Figure 1). The water samples taken in the field were filtered using a 0.45-µm membrane (milipore) filter and then divided into

two polyethylene bottles. One of bottle was acidified to pH< 2 with ultrapure HNO<sub>3</sub> and kept in a refrigerator at 4 °C until analysis. The other, unacidified sample was used for anion analyses. The samples acidified, were shipped to ACME laboratory (internationally accredited lab. in Canada) for chemical analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).

Electrical conductivity (EC), pH, and the temperature (T) values were determined at each sampling point by using WTW field kit. Alkalinity was measured by titration with hydrochloric acid (HCl) and expressed as bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).



**Figure 1.** Map showing sampling points in the study area.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Some physicochemical characteristics of sampled waters

The certain physicochemical properties of the waters are represented in Table 1. The range values recommended by the FAO (Ayers and Westcot 1985) for irrigation water are also included in Table 1.

pH is one of the most important parameter of water quality. In general, the surface waters are alkaline with pH value of 6.5 to 8.5 (Int. ref. 3). Aquatic organisms are extremely sensitive to pH levels. A slight change in the pH of natural waters can damage creatures that live in that water. For example, the optimal pH levels for fish are from 6.5 to 9.0. They cannot survive in waters below pH 4 and above pH 11 for long periods. (Int. ref. 4). Likewise, the measurement of pH is needed to determine the suitability of the water for irrigation. The FAO (Ayers and Westcot 1985) recommends a range of pH from 6.0 to 8.5 in irrigation water to protect crops. In this study, the pH of water samples varies from 7.60 to 8.35, which is within the safe range for fish as well as irrigation.

The other quality parameter preferred in all waters is a low total salt content. Total salt content in water is commonly expressed in terms of electrical conductivity (EC) (Wilcox, 1958). EC greatly affects the types of creatures that can survive in water. Most natural waters have EC value of much less than one mho/cm (Wilcox 1955). Freshwater streams ideally should have a conductivity between 150 to 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  to support varied aquatic life. The conductivity of rivers in the United States usually ranges from 50 to 1500  $\mu\text{mhos}/\text{cm}$  and this is ideal for fish (Int. ref. 5). Similarly, EC is an important factor affecting irrigation. An ECw of 3 dS/m is noted the upper limit for irrigation (Ayers and Westcot 1985), and water with an EC of less than 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  has no of restriction use for irrigation. As seen in Table 1, the measured EC values of the waters are in the range of 210–590  $\mu\text{S}/\text{cm}$  and are below the FAO upper limit value (Table 1). In addition, the waters could be classified as fresh water due to their EC values less than 1,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  stated by Charalambous (2013). Therefore, the values of present EC are appropriate for fish and some other forms of aquatic life in the water.

### **Major ions**

Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) is the predominant anion in nearly all the surface waters examined. its concentration varies between 1.08 and 5.18 me/L,

and these values are below the usual range (0-10 me/L) recommended by the FAO for irrigation.

Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) is an important source of sulfur, an essential nutrient for plants and animals. However, toxicity usually is not a problem, except at elevated concentrations, where can interfere with uptake of other nutrients (Weiner 2008). FAO (1985) recommends a maximum sulphate value of 20 me/L for irrigation. Sulfate is the second most abundant anion with values ranging from 0.13 to 1.44 me/L. The stream water samples (4 and 5) taken near the Kolca site demonstrated markedly elevated levels of sulphate relative to the other samples. However, levels are all considerably less than the maximum value recommended by the FAO (1985) for irrigation.

Chloride ( $\text{Cl}^-$ ) is present in all natural waters, but mostly the concentrations are low. In most surface streams, its concentrations are lower than those of sulfate or bicarbonate (Hem 1985). Low amounts of chloride are essential for plants. However, elevated concentrations are undesirable, as it is toxic to some plants (Wilcox, 1955). The usual range of chloride in irrigation water is 0-30 me/L and water with a chloride of less than 4 me/L has no of restriction use for irrigation (Ayers and Westcot 1985). The chloride is present in the studied waters, at low concentration ranged from 0.06 to 0.93 me/L and hence does not pose any restriction for irrigation.

Ca, Mg, and K are essential plant foods. Na is taken up freely by many plants, but it probably is not essential in the same quantity as the other nutrients and it may be toxic for some plants (Wilcox 1955). Usual range noted in irrigation waters is 0–20 me/L for Ca, 0–5 me/L for Mg, and 0-40 me/L for Na (Ayers and Westcot 1985). The predominant cation in the studied waters is calcium, which had concentration values varying between 1.39 and 4.78 me/L. Calcium is followed by magnesium that its concentration varied, ranging from 0.46 to 1.89 me/L. Sodium is much less abundant than calcium and magnesium in studied samples. The sodium concentrations of the samples changes from 0.23 me/L to 0.99 me/L. The concentrations of Ca, Na and

Mg are within the recommended ranges by the FAO (see Table 1).

**Table 1.** Some physicochemical properties of investigated water samples.

Sample	Type of water	pH	EC (µS/cm)	Ca <sup>2+</sup> me/l	Mg <sup>2+</sup> me/l	Na <sup>+</sup> me/l	K <sup>+</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> me/l	Cl <sup>-</sup> me/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> me/l	B mg/l
1	Stream	8.17	310	2.55	0.60	0.40	1.40	2.96	0.14	0.31	0.019
2	River	8.20	470	3.19	1.45	0.67	2.12	3.60	0.56	0.88	0.065
3	Stream	8.35	420	2.45	0.61	0.33	0.93	2.93	0.08	0.13	0.013
4	Stream	7.60	270	2.06	0.68	0.29	1.04	1.60	0.08	1.19	0.006
5	Stream	7.70	210	1.39	0.68	0.28	1.14	1.08	0.06	1.44	0.007
6	Stream	8.05	220	1.72	0.46	0.24	1.21	1.76	0.06	0.44	0.009
7	Stream	8.17	500	1.95	0.70	0.43	1.15	2.68	0.08	0.13	0.010
8	Stream	8.20	410	2.09	0.52	0.25	1.25	2.43	0.08	0.13	0.008
9	River	8.23	500	2.80	1.36	0.61	1.82	3.40	0.45	0.81	0.058
10	Stream	8.20	390	2.41	0.64	0.23	0.92	2.80	0.06	0.19	0.006
11	Stream	7.98	410	4.26	0.87	0.51	5.27	5.00	0.28	0.13	0.036
12	Stream	7.95	490	3.43	1.28	0.40	1.26	3.60	0.28	0.81	0.037
13	Stream	8.07	470	3.38	1.12	0.41	1.79	4.00	0.23	0.44	0.060
14	River	8.12	590	4.78	1.89	0.99	2.19	5.18	0.93	1.06	0.101
15	River	8.11	390	3.24	1.73	0.85	2.01	3.80	0.76	0.88	0.088
16	Stream	8.12	430	4.03	1.62	0.35	1.93	4.36	0.14	1.0	0.018
USEPA		6.5-8.5									

\* Usual range in irrigation water: pH 6.0-8.5, EC 0-3 ds/m, Ca 0-20 me/l, Mg 0-5 me/l, Na 0-40 me/l, K 0-2 mg/l, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 0-10 me/l, Cl<sup>-</sup> 0-30 me/l, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 0-20 me/l, B 0-2 mg/l

\* Ayers and Westcot 1985, me/l: milliequivalents per liter.

Potassium (K) seldom occurs in high concentrations in natural water (Hem, 1985). Its concentration is generally less than 10 mg/L in natural fresh waters (Int. ref. 6). The median potassium value is of 2.3 mg/L noted for surface water (Langmuir 1997). The usual range of K in irrigation water is recommended by the FAO as 0-2 mg/L. The concentrations of potassium in the waters examined are relatively lower in comparison with the other major cations and ranged from 0.92 to 5.27 mg/L. The highest value of 5.27 mg/L was recorded at sample number 11 taken from stream water. However, the K concentrations in the most samples are generally low, and rarely exceed FAO's maximum limit of 2 mg/L.

**Boron and other toxic elements**

Boron, like sodium, is an essential nutrient for plant growth. However, and if present in amounts appreciably greater than needed, it becomes toxic. The usual range of boron in irrigation water is from 0 to 2 mg/L. Furthermore, there are no restrictions for values for less than 0.7 mg/L (Ayers and Westcot 1985). Boron is present at concentrations between 0.006 and 0.101 mg/L in the studied waters. The concentrations of boron in some of the water samples (see Table 1) are much higher compared with the median value (10 µg/L) reported by Langmuir (1997) for surface waters. However, these concentrations are well below the recommended values of the FAO (see Table 1).

Like boron, some other elements, (e.g. Hg, Pb, Zn, As, Cd, Co, Cu, Ni, etc.,) could be toxic to plants if present in excess amount of concentrations in irrigation water (Ayers and Westcot 1985). It was reported earlier by Kacmaz (2020) that the surface waters, in general, have low heavy metal concentrations that did not exceed criteria for drinking water of the United States Environmental

Protection Agency (USEPA, 2018). Based on this, it can be said that the values of existing concentrations in the waters are not a level to pose threat to plants.

**3.2. Suitability of surface waters for irrigation**

Certain quality indices, which help in determining the suitability of water for irrigation such as, sodium absorption ratio (SAR), sodium percentage (Na %), residual sodium carbonate (RSC), Kelly’s ratio (KR) and magnesium hazard (MH) were calculated. The calculated values of quality indices for each samples are depicted in Table 2.

**Sodium adsorption ratio**

The sodium status of the water is expressed in terms of sodium adsorption-ratio (SAR) (Wilcox, 1955). SAR is an indicator used to determine whether the suitability of a water for agricultural irrigation. It is calculated using the Richards (1954) equation below where, ion concentrations are expressed in milliequivalents per liter (me/L).

$$SAR = Na / [(Ca + Mg) / 2]^{0.5}$$

The usual range of SAR in irrigation water is given as 0-15 me/L (Ayers and Westcot 1985). Typically, a SAR value below 2.0 is considered safe for plants especially if the sodium concentration is also below 50 mg/L (Sharma 2021).

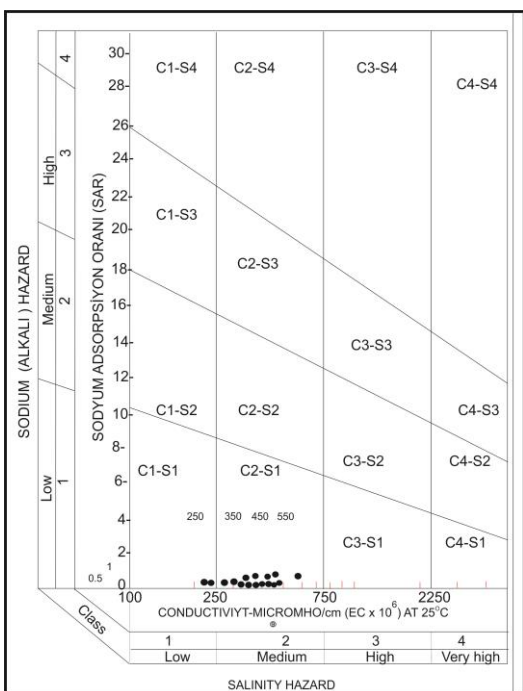
**Table 2.** The calculated quality indices value of the water samples.

Sample	Type of water	SAR me/L	% Na	RSC	KR	MH
1	Stream	0.31	12.08	-0.18	0.13	19.0
2	River	0.44	13.56	-1.03	0.15	31.2
3	Stream	0.27	10.40	-0.13	0.11	19.9
4	Stream	0.25	10.51	-1.13	0.11	24.7
5	Stream	0.27	12.83	-0.99	0.13	33.0
6	Stream	0.23	11.16	-0.41	0.11	21.0
7	Stream	0.38	14.82	0.03	0.16	26.3
8	Stream	0.22	9.89	-0.18	0.10	19.7
9	River	0.42	13.64	-0.76	0.15	32.7
10	Stream	0.18	7.58	-0.25	0.07	20.8
11	Stream	0.32	11.24	-0.13	0.10	16.9
12	Stream	0.26	8.45	-1.10	0.09	27.1
13	Stream	0.27	9.21	-0.50	0.09	24.9
14	River	0.54	13.52	-1.50	0.15	28.3
15	River	0.54	15.37	-1.16	0.17	34.7
16	Stream	0.20	6.53	-1.28	0.06	26.6

\* Usual range 0-15 in irrigation water

\*Ayers and Westcot (1985), me/l: milliequivalents per liter.

The calculated values of SAR in the surface water samples of the study area ranges from 0.18 me/l to 0.54 me/L. The values of SAR are also all below the FAO permissible limit, as shown in Table 2. In addition, the waters were classified using the US Salinity Laboratory (USSL, 1954) diagram based on the EC and the SAR. As represented in Figure 2, the most of waters in the study area fall within the low salinity-low sodium (alkali) hazard class (C1S1) and medium salinity-low sodium (alkali) hazard class (C2S1) hence can be used for irrigation without adverse effects.



**Figure 2.** Distribution of the studied waters in the US Salinity Laboratory (USSL, 1954) diagram.

**% Na (Sodium Percentage)**

The sodium percentage (Na %) is calculated by using the following formula:

$$\% Na = [(Na^+ + K^+) * 100] / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)$$

As shown in Table 1, the sodium percentage values (Na %) of the water samples vary from 6.53 to 15.37. Wilcox's diagram which the basis of Na % and EC values was used to classify the waters (Figure 3). The diagram demonstrates that the waters are excellent to good quality.

**Residual sodium carbonate (RSC)**

RSC is an estimate of the potential increase in sodium hazard and is calculated by the following equation;

$$RSC = (CO_3^- + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

According to Eaton (1950), water with has a RSC value in excess of 2.50 is not appropriate for irrigation. On the other hand, water that has a RSC

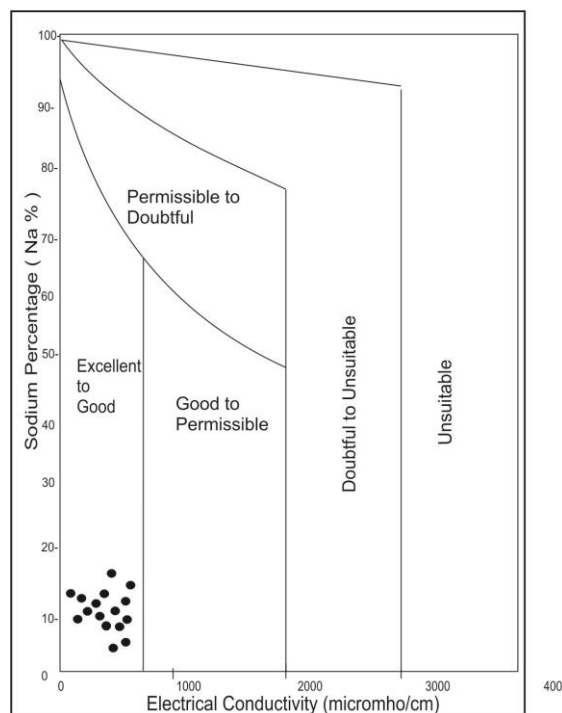
value less than 1.25 is considered safe for irrigation. In all analyzed water samples, RSC values are below 1.25 (Table 2). This shows that the waters of the study area were low potential for sodium hazard and thus, appropriate for irrigation.

**Kelly's ratio (KR)**

Excess sodium in water produces the undesirable effects of changing soil properties and reducing soil permeability (Kelly 1951). The Kelly's ratio (KR) is another indicator used to ascertain whether the suitability of water for irrigation. The level of Na<sup>+</sup> measured against Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> is known as KR and this ratio is defined by the equation in which the concentrations are in me/l.

$$KR = [(Na^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

Typically, water with Kelly's ratio less than one (KR<1) are regarded as suitable for irrigation (Kelly, 1940). The calculated KR values (max. 0.17) indicate that, the studied waters are permissible for irrigation (Table 2).



**Figure 3.** Classification of the water samples on the Wilcox diagram (Wilcox, 1955).



### **Magnesium hazard (MH)**

Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> commonly present in natural waters are also essential nutrients for the crop. However, an excessive amount of Mg in irrigation water would adversely affect the crop yield by converting soil into alkaline (Srivastava *et al.* 2020). Therefore, it is necessary to assess magnesium hazards (MH) of waters before irrigation. It is calculated using the formula below;

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]} * 100$$

Water that MH value exceeding 50 (MH >50) is not recommended for irrigation use (Szabolcs and Darab 1964). As seen in Table 2, the studied waters have MH value less than 50. This indicates that the waters are suitable for irrigation use.

### **4. Conclusion**

This study is providing an overview of surface waters physicochemical characteristics in Dereli area located in south part of Giresun. In addition, the suitability of water for irrigation were evaluated using some of the water quality criteria and standards. The surface water samples examined show slightly alkaline pH values varied from 7.6 to 8.35. The majority of samples have low values of EC (<500 µs/cm) indicating of fresh water. Calcium and magnesium are the major cations and bicarbonate is the major anion in the water. The levels of calcium, magnesium, sodium, potassium, bicarbonate, sulfate, chloride, and boron in the waters of the area are fall within the limits set by the FAO. The suitability of the surface waters for irrigation were evaluated based on the quality indices viz SAR, Na %, RSC, KR, and MH. According to US salinity diagram, the majority of the water samples belong to the medium salinity-low alkali hazard class (C2S1) and can be used for irrigation. As per classification of Wilcox, the waters are excellent to good quality for irrigation. The RSC values show that all the waters studied is suitable for irrigation. The KR values exhibit that there is no substantial excess of sodium in the waters and hence could be

used for irrigation. The values of the MH indicate that they are suitable for irrigation use. Currently available data indicate that in the physicochemical aspect, the quality of the surface waters in the study area are, in general good, and fit for irrigation.

### **Acknowledgement**

The author is very thankful to Dr. Sibel Kacmaz, Giresun University, for her contributions to the field study.

### **5. References**

- Ayers, R.S. and Westcot D.W., 1985. Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1, U.N. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Charalambous A. N., 2013. Transferable groundwater rights. Integrating Hydrogeology, Law and Economics, Taylor & Francis Group. 208.
- Eaton, F.M., 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*, **39**, 123–133.
- Gupta I.C. and Gupta S.K., 2002. Use of Saline Water in Agriculture, 3rd revised edition, Scientific Publishers, 1-302.
- Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters, 3rd edition, US Geological Survey Water-Supply Paper 2254, University of Virginia, Charlottesville, 263.
- Kabata-Pendias, A. 2010. Trace elements in soils and plants Boca Raton: CRC Press, (4th ed. p. 505).
- Kacmaz, H., 2020. Assessment of heavy metal contamination in natural waters of Dereli, Giresun: an area containing mineral deposits in northeastern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, **192**, **91**, 1-12.
- Kazancı, G. N., Ekingen A, P., Türkmen, G., Başören, Ö., Döğel, M. and Gültutan, Y., 2010. Assessment of ecological quality of Aksu Stream Giresun Turkey in Eastern Black Sea Region by using Water Framework Directive WFD methods based on benthic macroinvertebrates. *Review of Hydrobiology*, **3**, 165-184.

Kelly, W.P., 1940. Permissible composition and concentration of irrigation waters. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 66, 607-613.

Kelly, W.P., 1951. Alkali Soils-Their Formation Properties and Reclamation. Reinhold Publishing Co., New York.

Langmuir, D., 1997. Aqueous environmental geochemistry. Upper Saddle River NJ Prentice Hall, 600.

Richards, L.A., 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkaline soils. United States Department of Agriculture (USDA), Handbook 60, Washington DC, USA. 160.

Sharma C. B., 2021. Applied Environmental Sciences & Engineerings, BFC Publications, 1-794.

Srivastava, P., Gupta, M., Tsakiris, G., and Nevil Q., 2020. Agricultural Water Management 1st Edition, Academic Press, 490.

Szabolcs, I., Darab C., 1964. The influence of irrigation water of high sodium carbonate content of soils. In: Proceedings of 8th. International Congress of ISSS, Trans, vol II, 803–812.

US Salinity Laboratory Staff, 1954. Diagnosis and Improvements of Saline and Alkali Soils. US Department of Agriculture Handbook, Washington DC, No. 60, 160.

USEPA 2018. Drinking water standards and health advisories tables. Office of Water U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC March.  
<https://www.epa.gov/dwstandardsregulations/2018-drinking-water-standardsand-advisory-tables>

Weiner R. E., 2008. Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide, Second edition, CRC press. Taylor & Francis Group. 442.

Wilcox L. V., 1955. Classification and use of irrigation water. US Department of Agriculture, Circular no 969. Washington DC.

Wilcox, L. V., 1958. Water quality from the standpoint of irrigation. *Journal American Water Works Association*. **50** (5): 650-654. Wiley.

### **Internet references (Int. ref.)**

1-<https://www.ngwa.org/what-is-groundwater/About-groundwater/information-on-earths-water>

2- M.T.A 2010. General directorate of mineral research and exploration, Mineral and energy resources in Giresun (<http://www.mta.gov.tr>). Accessed September 2019.

3-<https://www.water-research.net/index.php/watertreatment/tools/the-ph-of-water>. Accessed June 2021

4-  
<https://www.yokogawa.com/library/resources/application-notes/ph-in-fish-farming/>.

5-  
<https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms59.html>.

6- Hydrology Project-Technical Assistance (1999) Training module # WQ - 28: Major ions in water. Training notes of the World Bank and Government of Netherlands funded. [http://nhp.mowr.gov.in/docs/HP2/MANUALS/Water%20Quality/5014/-download-manuals-WaterQuality-WQManuals\\_28MajorIonsinWater.pdf](http://nhp.mowr.gov.in/docs/HP2/MANUALS/Water%20Quality/5014/-download-manuals-WaterQuality-WQManuals_28MajorIonsinWater.pdf). Accessed Feb 2021.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055802 (1195-1209)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055802 (1195-1209)

DOI: 10.35414/akufemubid.946298

Araştırma Makalesi / Research Article

## Active Tectonics of Gülbahçe Fault Zone (GBFZ) by Using Geomorphic Indices, İzmir Province, Western Anatolia, Turkey<sup>1</sup>

Berna ŞENGÖÇMEN GEÇKİN<sup>1,2\*</sup>, Hasan SÖZBİLİR<sup>2,3</sup>, Çağlar ÖZKAYMAK<sup>4,5</sup>, Mustafa SOFTA<sup>2</sup><sup>1</sup> Dokuz Eylül University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, Turkey.<sup>2</sup> Dokuz Eylül University, Department of Geological Engineering, İzmir, Turkey.<sup>3</sup> Earthquake Research and Implementation Center of Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey<sup>4</sup> Afyon Kocatepe University, Department of Geological Engineering, Afyonkarahisar, Turkey<sup>5</sup> Earthquake Research and Implementation Center of Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey.

Sorumlu yazar\* e-posta: [berna.geckin@ogr.deu.edu.tr](mailto:berna.geckin@ogr.deu.edu.tr) ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7804-2265>  
e-posta: [hasan.sozbilir@deu.edu.tr](mailto:hasan.sozbilir@deu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3777-4830>  
e-posta: [activetectonics@gmail.com](mailto:activetectonics@gmail.com) ORCID ID : <https://orcid.org/0000-0002-0377-1324>  
e-posta: [mustafa.softa@deu.edu.tr](mailto:mustafa.softa@deu.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5064-9260>

Geliş Tarihi: 01.06.2021

Kabul Tarihi: 07.10.2021

### Abstract

The Gülbahçe Fault Zone is a dextral strike-slip fault that extends for ~24 km on land and ~46 km under the sea, which consists of the significant southernmost active segments of İzmir Balıkesir Transfer Zone. In this study, the active tectonic behaviour of the Gulbahçe Fault Zone was evaluated by using of morphometric analysis of geomorphic indices. 30 sub-basins identified using ArcGIS 10.5 (ESRI). All sub-basins were calculated by using mountain-front sinuosity (*Smf*), valley-floor width to valley height ratio (*Vf*), basin asymmetry factor (*Af*), basin shape indice (*Bs*), drainage density (*Dd*), and hypsometric integral (*Hi*) values. The obtained mean results of values are to define each sub-basin's relative tectonic activity (*lat*). The *Smf*, *Vf*, *Af*, *Bs*, *Dd*, and *Hi* values range from 1.05 to 1.33; from 0.21 to 4.09; from 25 to 77; from 1.03 and 3.06; from 0.28 to 0.67, respectively. All the results were gathered under three classes, which sign high tectonics activity (Class 1), moderately active tectonic (Class 2), and low tectonics activity (Class 3). The results show that relative active tectonics indice value (*lat*) was obtained between 1.33 and 2.33, indicating very high to moderately tectonic activity.

### Keywords

Gülbahçe fault zone;  
Geomorphic indices;  
Morphometric analysis;  
Relative active  
tectonics indices;  
Geographic  
Information Systems;  
Western Anatolia

## Jeomorfik İndis kullanarak Gülbahçe Fay Zonu' nun (GBFZ) Aktif Tektonik Değerlendirmesi, İzmir, Batı Anadolu, Türkiye

### Öz

Karadaki uzunluğu ~24 km denizdeki uzunluğu ~46 km olan ve sağ yanal ötelenmeli doğrultu atımlı fay karakterindeki Gülbahçe Fay Zonu, İzmir-Balıkesir Transfer Zonu' nun güney kısmında yer alan en önemli faylarından biridir. Gülbahçe Fay Zonu'nun aktif tektonik davranışını değerlendirmek için drenaj havzaları ve dağ önlerindeki jeomorfolojik indislerin morfometrik analizleri gerçekleştirilmiştir. ArcGIS 10.5 (ESRI) kullanılarak belirlenen 30 alt havzanın, dağ önü sinüslük indisi (*Smf*), vadi tabanı genişliği vadi yüksekliği oranı (*Vf*), havza asimetri faktörü (*Af*), havza şekil indisi (*Bs*), drenaj yoğunluğu (*Dd*) ve hipsometrik integral (*Hi*) değerleri belirlenmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınarak her bir alt havzanın göreceli tektonik aktivitesi (*lat*) tanımlanmıştır. *Smf* değeri 1,05 ile 1,33, *Vf* değeri 0,21 ile 4,09, *Af* değerlerinin 25 ile 77; *Bs* değerlerinin 1,03 ile 3,06, *Dd* değerlerinin 0,84 ile 3,49 ve *Hi* değerlerinin 0,28 ile 0,67 aralığında olduğu belirlenmiştir. Tüm veriler, yüksek tektonik aktivite (Sınıf 1), orta derecede aktif tektonik (Sınıf 2) ve düşük tektonik aktivite (Sınıf 3) olmak üzere üç sınıfta ayrılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Gülbahçe Fay Zonu' nun göreceli aktif tektonik indis değerinin (*lat*) sırasıyla çok yüksek ile orta derecede tektonik aktiviteyi gösteren 1,33 ile 2,33 aralığında olduğunu gösterir.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

### Anahtar kelimeler

Gülbahçe fay zonu;  
Jeomorfik indisler;  
Morfometrik analiz;  
Göreceli aktif tektonik  
indisler; Coğrafi Bilgi  
Sistemleri; Batı  
Anadolu

\* This study is part of a Ph.D. thesis undertaken by the first author at the Institute of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, Turkey.

## 1. Introduction

Using geomorphic indices plays a crucial role to determine the relationship between erosion processes and tectonic activity of the region since the early 2000s (e.g., Silva *et al.* 2003, Bull 2007, Özkaymak and Sözbilir 2012, Özsayın 2016, Sağlam and Düzgün 2017, Saber *et al.* 2018). The effect of tectonic activity on drainage systems and landforms can be explained using geomorphological modelling and morphometric approaches. In regions where tectonism is active, the best-known geomorphic indicator in strike-slip faults is the horizontal offsets in rivers (e.g., Cowgill 2007, Cowgill *et al.* 2009, Fu and Awata 2007, Fu *et al.* 2005, Walker and Allen 2012). However, not only river offsets but also detailed studies about other geomorphic indices such as stream length gradient indice (SL), mountain-front sinuosity (Smf), valley floor width to height ratios (Vf), drainage density (Dd), and hypsometric integral (Hi) shed light on determining the tectonic activity of the regions with a vertical component of motion along the strike-slip faults (e.g., Owen *et al.* 1999, Keller and DeVecchio 2013, Khalifa *et al.* 2018). Therefore, to evaluate tectonic activity of GBFZ is used high-resolution satellite images (e.g., Burbank and Anderson 2001; Silva *et al.* 2003, Saber *et al.* 2018, Baize *et al.* 2015, Crupa *et al.* 2017, Walker and Allen 2012, Khalifa *et al.* 2018, Baharvand *et al.* 2020) and GIS-based software such as ArcGIS® 10.5 (ESRI) (Faghih *et al.* 2016). GBFZ is located in the western part of the İBTZ (Kaya 1979, Sözbilir *et al.* 2003a, Emre *et al.*, 2005). This seismically active dextral strike-slip fault zone (Bozkurt and Sözbilir 2006) forms a boundary between Karaburun Peninsula and Urla block, faraway 45 km west of İzmir city from the east (Emre *et al.* 2005), extending for ~24 km on land and ~46 km under the sea (Emre *et al.* 2016, Ocakoğlu *et al.* 2005). With respect to GPS studies, the Karaburun Peninsula turn anti-clockwise due to dextral strike-slip nature of the N-S trending GBFZ (McClusky *et al.* 2000, Nyst and Thatcher 2004, Reilinger *et al.* 2006, Eyubagil *et al.* 2021). Although, GBFZ have been identified and documented as an active fault in active fault database of Turkey by Emre *et al.*

(2016); there is not detailed geomorphic studies about its tectonic activity. The scope of this research is to determine the GBFZ's relative tectonic activity by using geomorphic indices of sub-basins and mountain fronts in the study area. In addition, determining the vertical uplift rate in the northern margin of the Gülbahçe Basin by comparing Vf and Smf values and the geomorphic evolution active tectonics along the GBFZ by using the relative active tectonic indices are the aims of this study.

## 2. Geological and Seismotectonic settings

The study area is located in İBTZ, which delimit the Western Anatolia horst-graben system from the west (Sözbilir *et al.* 2003a, 2007, 2011, Özkaymak and Sözbilir 2008, Emre *et al.* 2016). The İBTZ acts as a transfer fault zone under an extensional tectonic regime with an annual GPS velocity of 20 mm/year (Aktuğ *et al.* 2009, 2016), and resulted in strike-slip-dominated zone of weakness (Kaya 1979, Ring *et al.* 1999, Sözbilir *et al.* 2003a, Erkül *et al.* 2005, Kaya *et al.* 2007, Sözbilir *et al.* 2007, Özkaymak and Sözbilir 2008, Uzel and Sözbilir 2008) which caused differential extension between western Anatolia and Aegean Sea region since at least Miocene (Ring *et al.* 1999, Sözbilir *et al.* 2009, 2011). This zone includes NE-SW trending dextral and NW-SE trending sinistral strike-slip faults, and E-W trending normal faults, which are the source of earthquakes that caused the surface rupture in the Holocene (Emre and Barka 2000, Sözbilir *et al.* 2005, 2007, Emre *et al.* 2016).

One of well-known fault zone at İBFZ is GBFZ, which acts as a dextral strike-slip fault (Emre and Barka 2000). Similar structures close to the study area, such as N-S trending strike-slip faults and approximately E-W trending smaller scale oblique-slip normal faults were also mapped by İnci *et al.* (2003) and Sözbilir *et al.* (2009), respectively.

Gülbahçe Fault Zone and nearby area are one of the most seismically active region in western Anatolia according to the instrumental and historical earthquake catalogues. According to the prehistoric earthquake data, a total of 20

earthquakes with an intensity greater than 6 occurred around the GBFZ. The most important of the prehistoric earthquakes in the region was the earthquake that occurred in 1389 AD with intensity X (Papazachos and Papazachou 1997; Taxeidis) (Figure 1). They reported that these earthquakes affected ancient buildings and recently built towns in Foça, Bergama and center of İzmir. There are also many instrumental earthquakes that were affected along the GBFZ since 1901. Magnitudes of these earthquakes are ranging from 4 to 5.9. The most important earthquake is the 17 October 2005 and 20 October 2005 struck with a magnitude of 5.9 in Seferihisar with strike slip fault mechanism.

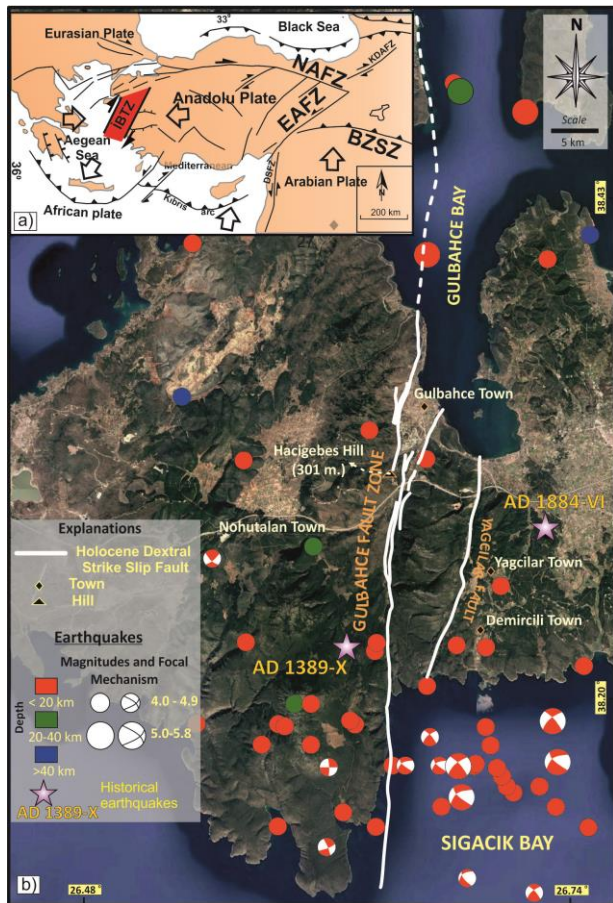
This earthquake affected especially, surrounding Demircili Bay to Yağcılar village having dextral slip sense. These earthquakes caused the collapse of houses and some buildings.

There are limited morphological studies to explain the Holocene activity of the GBFZ, while seismic studies in the seafloor proved that this zone cuts Holocene sediments (Ocakoglu *et al.* 2005). According to the active faults database of Turkey, GBFZ is divided into three splays, which are named eastern, center, and western, and ranging from 21, 24, and 24 km long, respectively (Emre *et al.* 2016). While dextral offsets up to 1000 meters are observed on the main fault in the south, lateral displacements in the streams are much lower in the northern splay due to the oblique nature of the fault. The field studies indicated that GBFZ cut the rock units ranging from Triassic to Quaternary. These areas the Carnian - Rhaetian Güvercinlik Formation including limestone, dolomitic limestone, marl, sandstone, and Lias - Malm Nohutalan Formation, characterized by bioclastic limestone, Miocene Kocadağ volcanic rocks represented by rhyolitic lavas and pyroclastic, and Güvendik Formation which is composed of volcanic and non-volcanic lacustrine deposits.

These units are overlain by Quaternary deposits, representing by colluvial, fluvial sediments, alluvial fan deposits and fan-delta subaerial deposits (Figure 2).

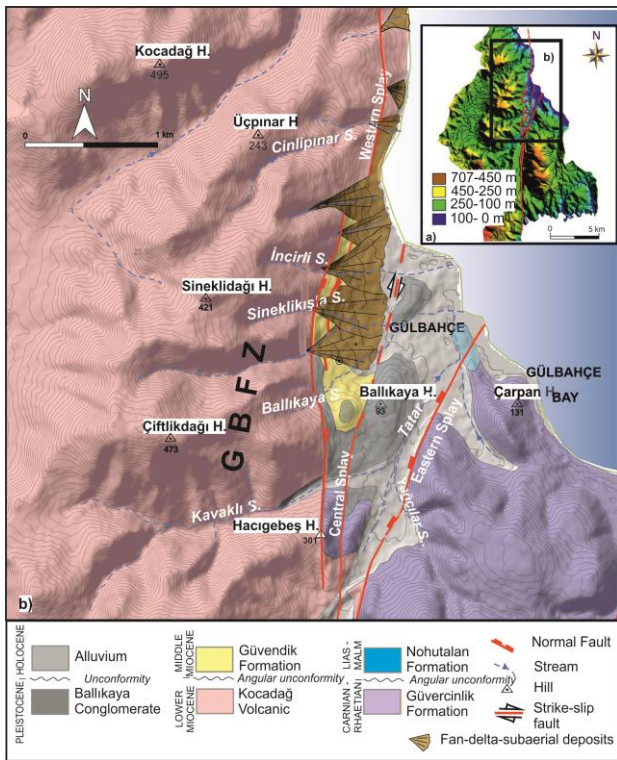
### 3. Methodology

Geomorphic indices such as drainage basin asymmetry (Af), hypsometric integral (Hi), the ratio of the valley-floor width to valley height ratio (Vf), basin shape (Bs), and mountain-front-sinuosity (Smf) are often used to evaluate active tectonism of the area (see Keller and Pinter 2002, Faghih *et al.* 2015 for detailed description of the indices). The Arc Hydro extension and ArcGIS® 10.1 (ESRI) software are used to calculate morphometric parameters in this study.



**Figure 1.** a) Tectonic framework map of the Anatolia White arrows represent the velocities of survey mode sites determined by Aktuğ *et al.* (2016) and Reilingier *et al.* (2006) b) Seismotectonic map of the GBFZ and its immediate surroundings region. White lines indicate an active fault according to Emre *et al.* (2016) (IBTZ: İzmir-Balıkesir Transfer Zone; NAFZ: North Anatolian Fault Zone; EAFZ: East Anatolian Fault Zone; BZSZ: Bitlis-Zagros Suture Zone).





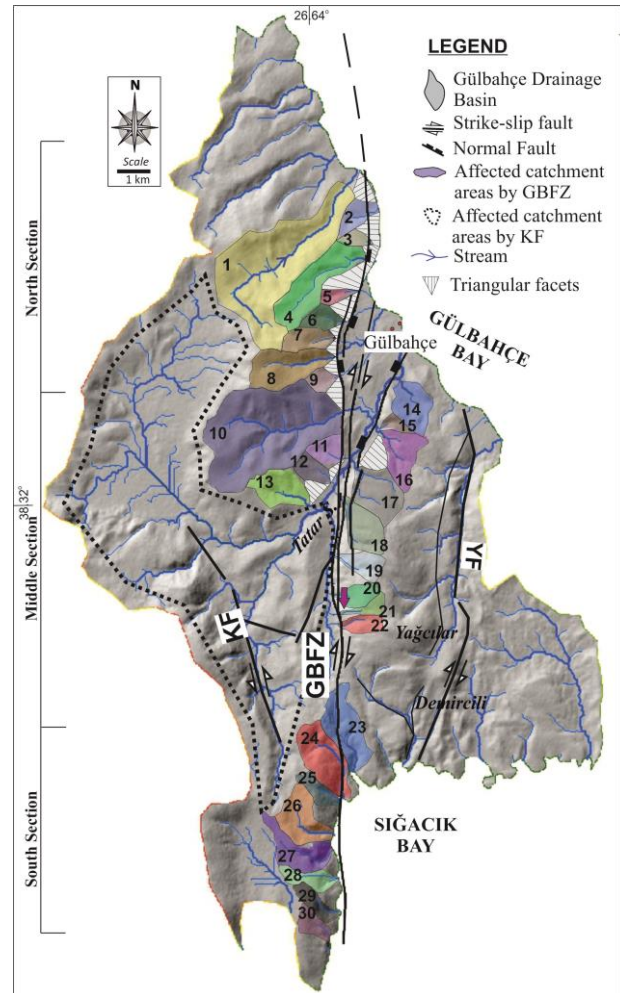
**Figure 2.** a) Digital elevation model images of GBFZ (Modified after Emre et al. 2016) b) Geology map of study area showing the lithological, structural, and morphological features of the Gülbahçe Fault Zone (GBFZ) which is divided into three splays (eastern, central, and western) towards to the Gülbahçe Bay.

Digital elevation data (DEMs) of the study area was obtained from Aster GDEM in 2009 (30 meters resolution). By using of these raster images were drawn rivers, and then were created sub-basins areas. The drainage network is classified according to Strahler (1964). As a result of the determination of 30 drainage basins (lower than 25.000 watershed accumulations were eliminated) affected by GBFZ related to strike-slip fault with normal fault component was investigated using geomorphic indices (Figure 3). The dotted line drainage basin area on the Tatar stream in Figure 3 is under the tectonic activity of the Kenelidağ Fault, which is a sinistral strike-slip fault (Göktaş 2014). Therefore, it is not included in the geomorphologic indice calculations.

### 3.1. Mountain-front-sinuosity ( $S_{mf}$ )

Mountain-front-sinuosity is used to describe the morphological evolution of the mountain front

controlled by active tectonism. It is the ratio between the lengths of the mountain front along with the break of slope ( $L_{mf}$ ) and the length of a straight-line along with the same mountain front ( $L_s$ ) (Bull 1977a, Bull and McFadden 1977, Keller and Pinter 2002, Rockwell et al. 1984, Silva et al. 2003, Wells et al. 1988). It can be determined as,



**Figure 3.** Studied catchments along the GBFZ (KF:Kenelidağ Fault; YF:Yağcılar Fault) (the dotted area illustrates the catchment areas under the tectonic activity of the Kenelidağ Fault).

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s \quad (1)$$

where  $S_{mf}$  is mountain-front-sinuosity,  $L_{mf}$  is the length of mountain front, and  $L_s$  is the length of a straight line along the same mountain (Keller and Pinter 1996). According to Bull (2007), values of  $S_{mf}$  are divided into three classes: class 1 represents  $S_{mf}$  values less than  $< 1.4$  (very high active), class 2 represents  $S_{mf}$  values between 1.4 and 3.0 (semi-active or moderately active), and

class 3 represents Smf values higher than  $> 3.0$  (inactive).

### 3.2. Valley floor width to valley height ratio (Vf)

The ratio of valley floor width to valley height (Vf) is an essential indicator for determining the tectonic evaluation of rivers (Keller and Pinter 2002). Obtaining the Vf value at high or low values depends on the shape of the valley. It is defined as,

$$Vf = 2Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)] \quad (2)$$

where Vfw is the width of the valley floor, Esc is the average elevation of the valley floor, and Eld and Erd are the respective elevations of the left and right valley divide looking downstream. Vf was classified into three classes. Classes:3 (Vf values  $\geq 1.0$ ), Classes:2 ( $0.5 \leq Vf \leq 1.0$ ), and Classes:1 ( $Vf \leq 0.1$ ) represent low, moderate, and high tectonic activity, respectively (El Hamdouni et al. 2007).

### 3.3. Drainage Density (Dd)

The drainage density (Dd), which gives general information about the climatic characteristics and geology of the study area (Horton 1932, Rana et al. 2016, Tarboton et al. 1991, Utlu and Özdemir 2018), is obtained by the ratio of the length of the stream (L) to the area of the basin (A) (Gregory and De Walling 1973). To calculate drainage density used formula is,

$$Dd(km/km^2) = L/A \quad (3)$$

where L is stream length and A is the total area of the basin. Higher density indicates less tectonic activity. (Keller and Pinter 2002, Khalifa et al. 2018). In addition, lower Dd values can be obtained in rock masses with high strength (due to the seepage effect) (Patton 1988, Uzun 2019). Dd values are classified into three classes where Classes:1 ( $Dd \leq 2$ ), Classes: 2 ( $2 < Dd \leq 3$ ), Classes:3 ( $Dd > 3$ ) indicates high, moderate and low tectonic activity, respectively (Nugroho et al., 2020).

### 3.4. Basin shape indice (Bs)

The geometry of drainage basins can be determined from basin shape indices (Bs) (Cannon 1976, Bull and McFadden 1977, Ramírez-Herrera 1998, El Hamdouni et al. 2007, Omidali et al. 2015, Saber et al. 2018). Bs indice can be defined by the following formula;

$$Bs = Bl/Bw \quad (4)$$

where Bl is the length of the drainage basin, and Bw is the length of the widest part of the basin. High Bs values indicate the drainage basin's longitudinal geometry, indicating high tectonic activity (Ramírez-Herrera 1998, Softa et al. 2018, Saber et al. 2018). This value is divided into three classes to define the degree of activity of tectonics: Class: 1, high ( $Bs \geq 4$ ); Class: 2, moderately ( $3 \leq Bs < 4$ ); Class:3, low ( $Bs \leq 3$ ) (El Hamdouni et al. 2007).

### 3.5. Hypsometric Integral (Hi)

The hypsometric curve used in determining the geomorphological development stages of a region (Strahler 1952b) shows the altitude distribution of that region (Pike and Wilson 1971). This curve is obtained by projecting the relative height onto the relative field. The hypsometric integral (Hi) is determined by calculating the area under the hypsometric curve, and the formula used is presented below:

$$Hi = (h - h_{min}) / (h_{max} - h_{min}) \quad (5)$$

where, h is the mean elevation; hmin and hmax are the minimum and maximum elevation, respectively. In general, if the  $Hi \geq 0.5$  (Class 1) values, it means the catchment area is relatively less eroded and tectonically active, whereas the  $Hi \leq 0.4$  (Class 3) values indicate catchment area is old and tectonically quiescent (El Hamdouni et al. 2007, Dehbozorgi et al., 2010, Mahmood and Gloaguen 2012, Selim et al., 2013). Intermediate values between  $0.4 < Hi < 0.5$  are characteristic of Class 2, which indicates moderately tectonic activities.



### 3.6. Basin Asymmetry Factor (Af)

The basin asymmetry factor (Af) is a geomorphological indices used to determine tectonic tilting at the scale of a drainage basin (Hare and Gardner 1985, Keller and Pinter 2002). Af is defined as:

$$Af = 100 \left( \frac{Ar}{At} \right) \quad (6)$$

where Ar is the right side of the master drainage area (looking downstream) and At is the total area of the basin. Af values were examined in 3 classes as  $43 \leq Af < 57$  (Class 3),  $35 \leq Af < 43$  or  $57 \leq Af < 63$  (Class 2), and  $Af \geq 63$  or  $Af < 35$  (Class 1). Af is close to 55 if there is little tilting where the tectonic activity is high (El Hamdouni *et.al* 2007).

### 3.7. Relative Tectonic Activity (Iat)

To evaluate the distribution of relative tectonic activity along GBFZ was used an average of six calculated geomorphic indices (Iat) (El Hamdouni *et.al* 2007). Iat is calculated as:

$$Iat = S/N \quad (7)$$






Where S is the defined class values of geomorphic indices and N is a number of used geomorphic indices. Iat was classified into four classes: 1 ( $1 < Iat \leq 1.5$ ); 2 ( $1.5 < Iat \leq 2.0$ ); 3 ( $2.0 < Iat \leq 2.5$ ) and 4 ( $Iat > 2.5$ ) (El Hamdouni *et.al* 2007), which indicate very high, high, moderately and low, degree of active tectonics, respectively.

## 4. Results

Before interpreting the geomorphological indice results, the abrasion resistance of the rocks in the study area was determined. For this purpose, the rock strengths of the lithological units were determined according to the Geological Strength Index (GSI) from Marinos and Hoek (2000). Using a GSI chart, the rocks in the study area described according to their lithology, structure, and surface conditions of the discontinuities (Table 1). The

indice of Smf was calculated along the mountain front shaped by the normal slip component of the northern section (Figure 4). The aerial lengths (Lmf) and the overall lengths (Ls) of the defined mountain fronts and classified Smf indices are presented in Table 2.

**Table 1.** GSI (Geological Strength Index) classification up to Hoek and Marinos (2000) for rock masses on the study area

Unit	Form.	(Jv)	R	W	E	Field view	GSI	RQ
Limestone	GF	1,5	Rough	SW	Hard <5 mm		72	Good
Limestone	NF	2	Soft	MW	Hard <5 mm		55	Fair
Kocadağ volcanics	-	3	Slickensided	HW	Smooth h<5 mm		35	Poor
Volcanic and non-vol. Lacustrine deposits	GDF	3	Soft	MW	Smooth h<5 mm		47	Fair
Ballıkaya Conglomerate	-	3	Rough	SW	Smooth h<5 mm		42	Fair

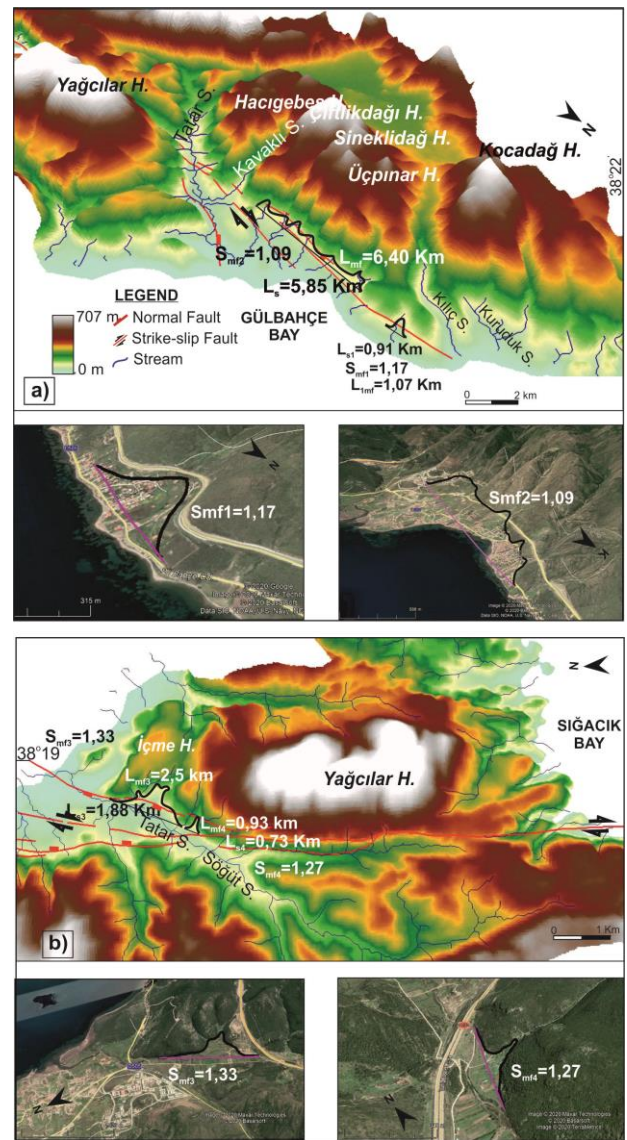
(Jv: Volumetric number of joints; R: Roughness; W: Weathering; F: Filling; RQ: Rock Quality; SW: Slightly weathered; MW: Moderately weathered; HW: Highly weathered; GF: Güvercinlik Formation; NF: Nohutalan Formation; GDF: Gündendik Formation)

According to the obtained GSI results, the strength of the rocks defined at the study area is generally fair or higher. It shows that the tectonic uplift is more dominant in the drainage areas developed on these rocks with high strength against weathering. Vf values were calculated in 17 drainage areas located on GBFZ's uplift blocks (Figure 5). It was determined that the calculated V values varied between 0.91 and 2.85 which indicate "V" shaped valleys and "U" shaped valleys, respectively. The Af values for the 30 catchments along GBFZ were

determined for the western, central, and southern of the study area (Figure 5). The obtained values by divided into three classes presented in Table 2. Af values for 2, 4, 8, 10, 13, 18, 19, 21, 22, and 24 sub-basins are significantly greater than 63 or smaller than 35. The minimum Af values belong to 1, 9, 14, 15, and 20 sub-basins, located generally at the northern section of the study area. Drainage density (Dd) was determined for 30 catchments in the study area (Table 2). Dd values range from 0.84 (Class 1) to 3.49 (Class 3). Catchments 3, 5, and 21 have less tectonic uplift than the other catchment areas where they have Dd value of more than 3.0 km/km<sup>2</sup> (Class 3).

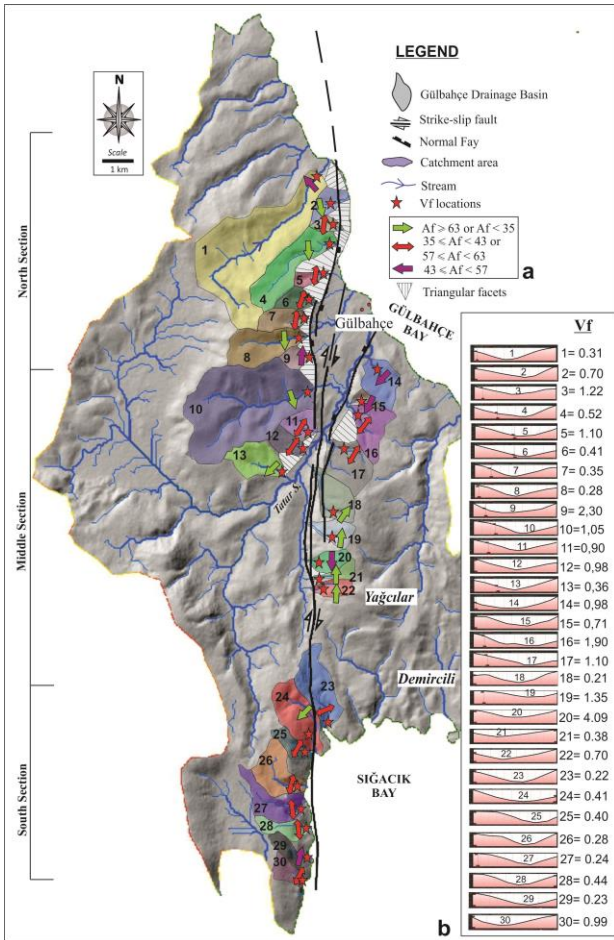
The Bs indice was calculated for 30 sub-basin areas (Table 2). Evaluating basin shape indice (Bs) along the GBFZ shows that Bs values range from 1.03 (Class 3) to 3.25 (Class 1). Hi-indice were calculated for each sub-basins and the results of the Hi-indice were categorized by dividing the study area as northern, central, and southern. According to the calculated Hi values for each sub-basin at the study area, the values of Hi range from 0.28 to 0.67 which were classified Class 3 (Hi < 0.4) and Class 1 (Hi ≥ 0.5), respectively (Table 2 and Figure 6 ). The figure shows the hypsometric curves recorded concave curves for catchments 1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 22, and 25; concave-convex curves in catchments 2,3,16, 17, 18, 23, and 29; convex curves in catchments 9, 24, 26, 27, 28, and 30.

All the determined morphologic indices are presented in Table 2 which all the values are classified into three classes show high (Class 1)-moderate (Class 2), and low (Class 3) tectonic activity.



**Figure 4.** Areas which are calculated of mountain-front sinuosity (Smf) a) Smf values on the western splay b) Smf values on the eastern splay (Lmf: the lengths of the mountain front along with the break of a slope; Ls: the length of a straight-line along with the same mountain front).

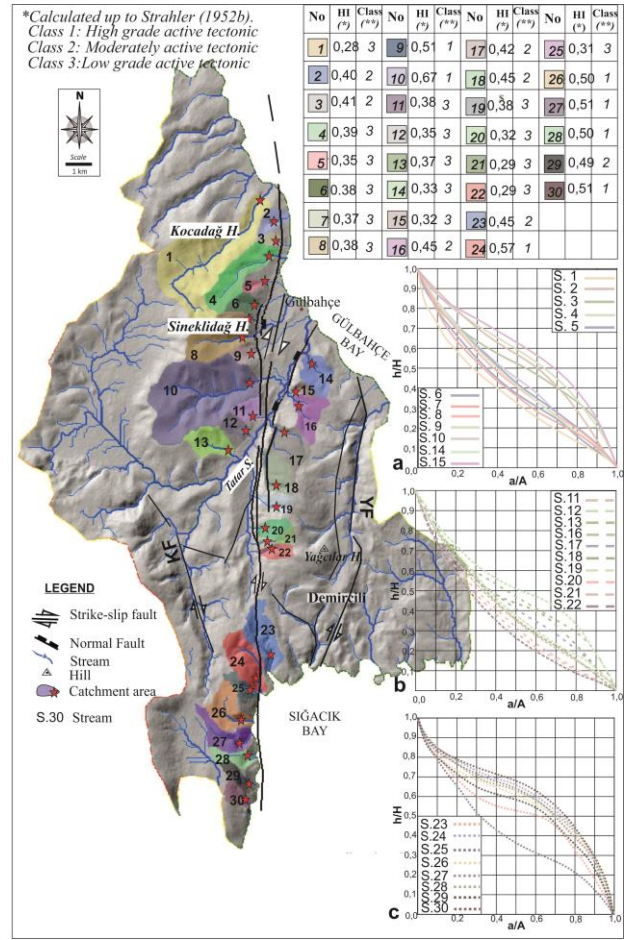




**Figure 5.** a) Basin asymmetry factor map of the study area (Green, red, and purple arrows show sub-basin areas which are under high, moderate, and low tectonics activity or strong lithological control, respectively) b) Vf values calculated in 30 drainage basins in the study area and affected by GBFZ (Vf: Valley floor width to valley height ratio)(KF: Kenelidağ Fault; YF: Yağcılar Fault).

### 5. Discussion and Conclusion

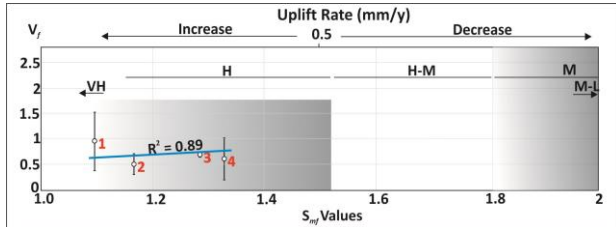
In the literature, the ratio between *Smf* and *Vf* is used to determine the tectonic activity of faults (e.g., Rockwell *et al.* 1984, Silva *et al.* 2003, Yıldırım 2014, Softa *et al.* 2018, Saber *et al.* 2018, Özsayın, 2016). *Smf* values were calculated for the sub-basin areas where are located nearby normal fault splays of GBFZ. The average of the *Vf* values of these areas relevant with *Smf* values was calculated. All *Smf* values ( $Smf < 1.4$ ) indicate that all splays of GBFZ are young and active tectonic uplift.



**Figure 6.** Hypsometric integral (HI) Classes and hypsometry curves of 30 catchments along the GBFZ a, b, c) the curves represent northern, central, and southern sections of GBFZ, respectively (h/H: relative altitude; a/A: relative area) (KF: Kenelidağ Fault; YF: Yağcılar Fault).

*Vf* values where are calculated *Smf* values show high vertical uplift rates along the north of the Gülbahçe Basin, except catchments 3, 5, 9, and 10. Especially, *Vf* values obtained from drainage basins affected western splay of GBFZ were calculated less than 0.5 (Class 1) that is related “V” shaped valleys indicated high tectonic activity. Higher *Vf* values ( $\geq 1.0$ ), dominant along the eastern splay of GBFZ show erosion processes and less tectonic activity (Class 3). The obtained *Vf* values and *Smf* values were plotted on the chart suggested by Rockwell *et al.* (1984) (Figure 7). According to plotting the average of the *Vf* and *Smf* values, the vertical uplift rate for the northern section of Gülbahçe Basin is obtained on Class 1, which is associated with uplift rates larger than  $>0.5 \text{ mmy}^{-1}$  (Rockwell *et al.* 1984). This vertical uplift rate (between 0.60 and 0.80

$\text{mmy}^{-1}$ ) is also a uniform slip rate for İBTZ, which ranges from 0.2 to 8.0  $\text{mmy}^{-1}$  (e.g., Özkaymak 2014, Aktuğ et al. 2009) which were obtained by using of GPS measurements. Smf vs. Vf values indicate high correlation with  $R^2=0.89$ .



**Figure 7.** Plot of mountain-front-sinuosity (Smf) versus valley floor width-to-valley height ratio (Vf). Vertical bars indicate the standard deviation for Vf values. Uplift rate ( $\text{mmy}^{-1}$ ) values from Rockwell et al. 1984 (VH: Very high, H: High, H-M: High to moderate, M: Moderate, ML: Moderate to Low, L: Low, Red numbers indicate the mountain-front)

Dd values give general information about geology, climate conditions, and tectonics activity (Horton, 1932; Rana et al. 2016, Tarboton et al. 1991, Utlu and Özdemir 2018). In general, high Dd values indicate weathering and maturity degree of drainage basins. In addition, low Dd values are pointed out as high rock quality strength due to the seepage effect (Patton 1988, Uzun 2019) (e.g., catchments classified in 1<sup>st</sup> class in Table 2). Especially, Dd values of catchments located central section of GBFZ and consist of limestone with good rock quality that belongs to Güvercinlik Formation have the lowest Dd value. This Dd value characterizes nearly straight channels with a recent movement activity.

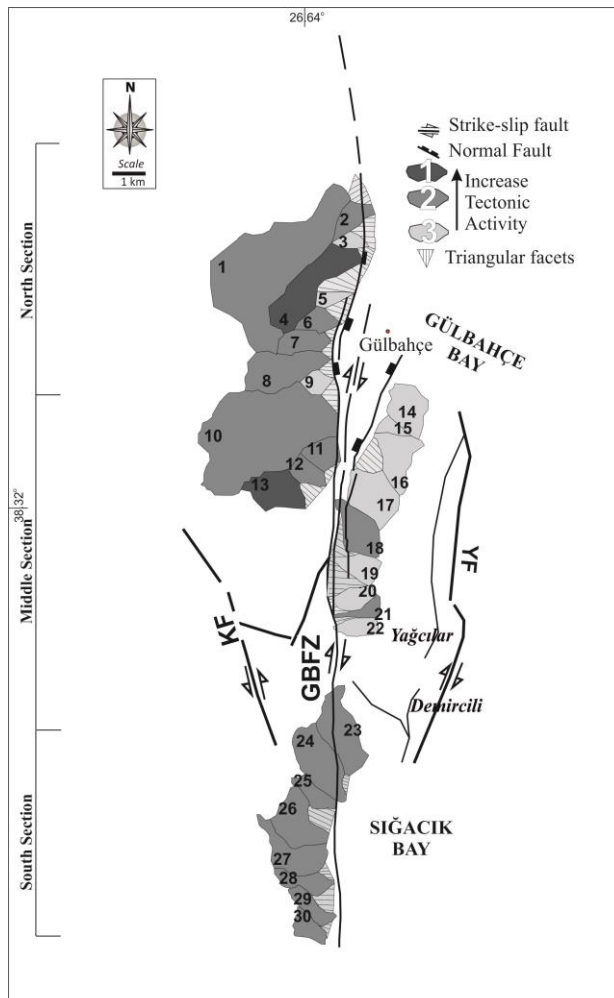
Investigating the sub-basins hypsometric curve and Hi values indicate that  $Hi < 0.4$  (Class 3) were commonly dominant along the western and central sections of GBFZ. Hence, the tectonic activity could be assumed inactive (Pike and Wilson 1971). On the other hand, Hi values could be affected directly by the rock strength (El Hamdouni et al. 2008, Khalifa et al. 2018). The catchments along the southern section of GBFZ (no. 24, 26, 27, 28 and 30) are young (Class 1) compare to the other sections. By determining the ratio between Bl

(length of the drainage basin) and Bw (length of the widest part of the basin) (Table 2) the Bs indice was calculated and classified into three classes from highest (class 1) to lowest (class 3) tectonic activity. The obtained Bs values indicate that basins are concern generally moderately active and inactive tectonic. According to the calculations, Af values are very interesting. The northern part of the GBFZ (western block) slopes to the south, the middle part (eastern block) to the north. The south block is seen in equilibrium. The reason for the slope of the area between Yağcılar fault and GBFZ towards north can be explained by the fact that the GBFZ divides into three splays in the north and creates a depression basin bordered by normal faults. While the northern part of the Gülbahçe fault collapses, the north of the Karaburun peninsula rises (the western block dips to the south). This uplift and subsidence occur parallel to the fault. Because of this situation and annual uplift rate of basin, it may indicate that the Karaburun peninsula may break away from Anatolia in the future and then turn into an island like Chios, located in the west. Splaying of the fault in the north and related subsidence around Gülbahçe bay can be explained by the counter anti-clockwise rotational movement of the Karaburun peninsula block which was also stated by geodetic and paleomagnetic studies (Aktuğ and Kılıçoğlu 2006, Uzel et al. 2013, Eyubagil et al. 2021). Besides this, obtained results show that the western splay of GBFZ is more affected on the drainage basins with a high relative tectonic activity. On the other hand, the eastern splay of GBFZ affected the drainage basins less with a

**Table 2.** Values of total sub-basins area (km<sup>2</sup>), drainage basin shape (Bs), drainage density (Dd), valley floor width–valley height Ratio (Vf), asymmetry factor (AF), hypsometric integral (Hi), mountain front sinuosity (Smf), and relative tectonic activity (Iat) of the different catchments of the study area. All results related to the tectonic activity classification obtained were compared with the lithology where the drainage area developed (KF:Kocadağ Formation; BC: Ballıkaya Conglomerate; GF:Güvercinlik Formation; P: Poor; F:Fair; G: Good)(for all classes 1:High tectonics activity; 2:Moderately activity; 3: Low tectonics activity; σn- 1: Standard deviation; Vf<sub>m</sub>: Vfmean )

No	Area (km <sup>2</sup> )	BI (km)	Bw (km)	Bs	Class (Bs)	L (km)	Dd (km/km <sup>2</sup> )	Class (Dd)	Vf	Vf <sub>m</sub>	σn- 1	Class (Vf)	Ar	Af (%)	Class (Af)	HI	Class (Hi)	Smf	Class (Smf)	Iat	Tectonic Activity	Lithology	GSI	Rock Quality							
1	10.26	4.67	2.74	1.70	3	11.50	1.12	1	0.31	0.51	0.28	1	5.33	52	3	0.28	3	1.17	1	2.00	High	KF	35	P							
2	0.86	2.68	1.30	2.06	2	2.45	2.85	2	0.70			2	0.26	30	1	0.40	2			1.66	High	KF	35	P							
3	0.39	2.83	1.05	2.69	2	1.50	3.85	3	1.22			3	0.14	36	2	0.41	2			2.17	Moderate	KF	35	P							
4	3.36	2.68	1.17	2.29	2	4.50	1.34	1	0.52			2	1.13	34	1	0.39	3			1.17	Very high	KF	35	P							
5	0.40	5.08	2.52	2.01	2	1.25	3.13	3	1.10	0.9	0.68	3	0.24	60	2	0.35	3	1.09	1	2.33	Moderate	KF	35	P							
6	0.76	3.52	1.08	3.25	1	1.36	1.79	1	0.41			1	0.28	37	2	0.38	3			1.50	High	KF	35	P							
7	1.07	1.26	1.11	1.13	3	2.18	2.04	2	0.35			1	0.39	36	2	0.38	3			2.00	High	KF+BC	35/42	P/F							
8	1.76	1.73	0.90	1.92	3	3.14	1.20	1	0.28			1	1.36	77	1	0.51	1			1.33	High	KF+BC	35/42	P/F							
9	0.53	1.81	0.66	2.74	2	0.92	1.74	1	2.30	0.67	0.44	3	0.28	53	3	0.67	1	1.33	1	2.20	Moderate	KF+BC	35/42	P/F							
10	10.91	2.09	1.57	1.33	3	9.20	0.84	1	1.05			3	3.58	33	1	0.33	3			2.00	High	KF+BC	35/42	P/F							
11	0.91	2.76	0.90	3.06	1	1.31	1.44	1	0.90			2	0.38	42	2	0.38	3			1.80	High	KF	35	P							
12	0.78	1.97	0.70	2.81	2	0.90	1.15	1	0.98			2	0.28	36	2	0.35	3			2.00	High	KF	35	P							
13	1.83	1.84	0.65	2.83	2	2.31	1.26	1	0.36	0.71	0	1	0.52	28	1	0.37	3	1.27	1	1.50	Very high	KF	35	P							
14	1.63	1.43	0.83	1.72	3	1.86	1.14	1	0.98			2	0.74	45	3	0.33	3			2.33	Moderate	NF	55	F							
15	0.37	1.55	0.97	1.59	3	0.97	2.62	2	0.71			2	0.2	54	3	0.32	3			2.33	Moderate	GF	72	G							
16	1.75	1.05	0.72	1.45	3	2.70	1.43	1	1.90			3	1.08	62	2	0.45	2			2.20	Moderate	GF	72	G							
17	2.23	1.16	0.43	2.69	2	3.10	1.54	1	1.10	3	1.43	64	2	0.42	2	2.00	Moderate	GF	72	G											
18	1.70	1.94	0.75	2.58	2	2.60	1.39	1	0.21												1	1.26	74	1	0.45	2	1.40	High	GF	72	G
19	0.98	1.34	1.01	1.32	3	1.23	1.53	1	1.35												3	0.69	70	1	0.38	3	2.20	Moderate	GF	72	G
20	0.84	2.55	1.55	1.64	3	1.25	1.26	1	4.09												3	0.41	49	3	0.32	3	2.60	Moderate	GF	72	G
21	0.49	2.18	1.37	1.59	3	1.71	1.49	1	0.38	1	0.31	63	1	0.29	3	1.80	High	GF	72	G											
22	0.75	1.50	0.67	2.23	2	1.18	3.49	3	0.70												2	0.22	29	1	0.29	3	2.20	Moderate	GF	72	G
23	2.42	0.89	0.86	1.03	3	2.10	1.57	1	0.22												1	0.94	39	2	0.45	2	1.80	High	GF	72	G
24	2.49	2.08	0.79	2.63	2	2.80	0.87	1	0.41												1	0.63	25	1	0.57	1	1.20	High	GF	72	G
25	0.80	1.96	0.77	2.54	2	1.39	1.12	1	0.40	1	0.51	64	2	0.31	3	1.80	High	GF	72	G											
26	2.07	1.93	0.73	2.64	2	2.30	1.74	1	0.28												1	1.27	61	2	0.50	1	1.40	High	GF	72	G
27	1.99	1.78	0.64	2.78	2	3.10	1.11	1	0.24												1	1.21	61	2	0.51	1	1.40	High	GF	72	G
28	0.95	1.81	1.28	1.41	3	1.90	1.56	1	0.44												1	0.6	63	2	0.50	1	1.60	High	GF	72	G
29	0.81	1.71	1.65	1.03	2	1.40	2.00	2	0.23	1	0.41	51	3	0.49	2	2.00	High	GF	72	G											
30	0.74	2.04	1.57	1.29	2	0.78	1.73	1	0.99												2	0.46	62	2	0.51	1	1.60	High	GF	72	G

moderate relative tectonic activity. These results are also compatible with AF data, since the eastern



**Figure 8.** Relative tectonic activity classification ( $I_{at}$ ) map (Class 1: Very high tectonic activity; Class 2: High tectonic activity; Class 3: Moderate tectonic activity)

edge of the rising Karaburun peninsula is controlled by the western splay of the GBFZ.

Consequently, by calculating the mean of all geomorphic indices, it was determined that  $I_{at}$  value was between 1.33 and 2.33. This indicates that tectonic activity is high and moderate in the region (Figure 8).

This study illustrates that geomorphologic indices, including  $S_{mf}$ ,  $V_f$ ,  $D_d$ ,  $B_s$ ,  $H_i$ , and  $A_f$ , relevant tectonics activity along GBFZ which is a dextral strike-slip fault with vertical components at the northern splays of GBFZ. All the obtained values of geomorphic indices are firstly classified and

secondly correlated with relevant tectonics activity. According to  $S_{mf}$  versus  $V_f$  values, the western block of the northern part of the Gülbahçe Basin is young and active tectonic uplift. The comparison of vertical uplift rates obtained according to the geomorphological indice studies of different faults is presented in Table 3.

**Table 3.** Vertical uplift rates determined up to morphological analysis in different types of strike-slip faults in Turkey

Name of the fault	Fault Type	Vertical Uplift rate of basin mm/year	Reference
Ovacık Fault (Eastern Turkey)	Sinistral strike-slip fault	$\geq 0.5$	Yazıcı et al., 2018
East Anatolian Fault	Sinistral strike-slip fault	$> 0.5$	Khalifa et al., 2018
GBFZ	Dextral strike-slip fault	$> 0.5$	This study

Calculated slip rate of  $\sim > 0.5$  mm/year along the northern section of GBFZ is in good agreement with other defined uplift rates in Turkey (e.g., Yazıcı et al. 2018, Khalifa et al. 2018, this study). Calculations of geomorphic indices shed on lights GBFZ's tectonic evaluation and provide us valuable data to use for further studies.

### Acknowledgments

This study is part of a Ph.D. thesis undertaken by the first author at the Institute of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, Turkey, and is supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) with project Number of 117Y190. The authors would like to thank Pınar Girca from The University of Southern Queensland for English editing.

### 6. References

- Aktuğ, B. and Kılıçoğlu, A., 2006. Recent crustal deformation of İzmir, Western Anatolia and surrounding regions as deduced from repeated GPS measurements and strain field. *Journal of Geodynamics*, **41**, 471-484.
- Aktuğ, B., Nocquet, J. M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., ... and Tekgöl, A., 2009. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid*



- Earth*, **114**(B10).  
<https://doi.org/10.1029/2008JB006000>
- Aktuğ, B., Ozener, H., Dogru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halicioğlu, K., ... and Havazlı, E., 2016. Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, **94**, 1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001>
- Baize, S., Audin, L., Winter, T., Alvarado, A., Moreno, L.P., Taipei, M., Reyes, P., Kauffmann, P., and Yepes, H., 2015. Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology*, **237**, 14-28  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.030>
- Bull, W.B., 1977a. Tectonic geomorphology of the Mojave Desert, California. U.S. Geological Survey Contract Report 14-0-001-G-394. *Office of Earthquakes, Volcanoes, and Engineering*, Menlo Park, California, 188.
- Bull, W.B. and McFadden, L.D., 1977. Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California. In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium*. The State University of New York, Binghamton, NY, 115–138.
- Bull, W.B., 2007. Tectonic geomorphology of mountains: a new approach to Paleoseismology. *Oxford: Wiley*, 328.
- Burbank, D.W. and Anderson, R.S., 2001. Tectonic geomorphology. *Oxford: Blackwell Science*, 247.
- Baharvand, S., Pardhan, B. and Soori, S., 2020. Evaluation of active tectonics using geomorphic indices in a mountainous basin of Iran. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **111**(2), 109-117.  
<https://doi.org/10.1017/S1755691020000031>
- Bozkurt, E. and Sözbilir, H., 2006. Evolution of the large-scale active Manisa Fault, southwest Turkey: implications on fault development and regional tectonics. *Geodin. Acta* **19**, 427–453  
<https://doi.org/10.3166/ga.19.427-453>
- Cannon, P.J., 1976. Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of Mill Creek drainage basin. *Oklahoma Geology Notes* **36** (1), 3–16.
- Cowgill, E., 2007. Impact of riser reconstructions on the estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China. *Earth and Planetary Science Letters* **254**, 239–255.  
[doi:10.1016/j.epsl.2006.09.015](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.015)
- Cowgill, E., Gold, R.D., Chen, X.H., Wang, X.F., Arrowsmith, J.R., Southon, J., 2009. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet. *Geology* **37**, 647–650.
- Crupa, W.E., Khan, S.D., Huang J., Khan, A.S. and Kasi, A., 2017. Active tectonic deformation of the western Indian plate boundary: A case study from the Chaman Fault System. *Journal of Asian Earth Sciences*, **147**, 452-468.  
<https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.08.006>
- Dehbozorgi, M., Pourkermani, M., Arian, M., Matkan, A.A., Motamedi, H. and Hosseiniasl, A., 2010. Quantitative analysis of the relative tectonic activity in the Sarvestan area, central Zagros, Iran. *Geomorphology* **121**, 329–341.
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., Keller, E.A., 2007. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology* **96**, 150–173.
- Emre, Ö. and Barka, A. 2000. Gediz grabeni-Ege Denizi arasının (İzmir yöresi) aktif fayları. Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, (BADSEM2000), *Bildiriler Kitabı*, İzmir, 131-132. (in Turkish).
- Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C. and Göktaş, F., 2005. İzmir ve yakın çevresinin diri fayları ve deprem potansiyelleri, *Jeoloji Etütleri Dairesi*, Rapor No:10754. 86 . (in Turkish)
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Olgun Ş, Elmacı, H., Şaroğlu, F., Çan, T., 2016. Active fault database of Turkey. *Bull Earthq Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- Erkül, F., Helvacı, C. and Sözbilir, H., 2005. Evidence for two episodes of volcanism in the Bigadiç borate basin and tectonic implications for western Turkey. *Geological Journal*, **40**, 1-16.
- Eyubagil, E. E., Solak, H. İ., Kavak, U. S., Tiryakioğlu, İ., Sözbilir, H., Aktuğ, B. and Özkaymak, Ç., 2021. Present-day strike-slip deformation within the southern part of the İzmir-Balıkesir Transfer Zone based on GNSS data and implications for seismic hazard assessment in western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **30**(2).
- Faghih, A. and Nourbakhsh, A., 2015. Appraisal of relative tectonic activity along the Kazerun Fault Zone, Zagros Mountains, Iran: insight from spatial



- analysis of geomorphic indices. *Geological Journal*, 50(6), 783-798.
- Faghih, A., Nezamzadeh, I. and Kusky, T. M., 2016. Geomorphometric evidence of an active pop-up structure along the sabzpushan fault zone, Zagros mountains, SW Iran. *Journal of Earth Science*, **27(6)**, 945-954.
- Fu, B., Awata, Y., Du, J., He, W., 2005. Late Quaternary systematic stream offsets caused by repeated large seismic events along the Kunlun fault, northern Tibet. *Geomorphology*, **71**, 278–292.
- Fu, B. and Awata, Y., 2007. Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features. *Journal of Asian Earth Sciences*, **29**, 253–265.
- Göktaş, F., 2014. Karaburun Yarımadası kuzey kıyı kesiminin Neojen stratigrafisi. *79 Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, **148**, 43-61 (in Turkish).
- Gregory, K. J. and Walling, D. E., 1973. *Drainage basin form and process*. Edward Arnold, London.
- Hare, P.W. and Gardner, T.W., 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa, M., Hack, J.T. (Eds.), *Tectonic Geomorphology. Proceedings of the 15th Annual Binghamton Geomorphology Symposium*. Allen and Unwin, Boston, 123–134.
- Horton, R.E., 1932. Drainage basin characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union*, **13**: 350-361
- İnci, U., Sözbilir, H., Erkül, F. and Sümer, Ö., 2003. The cause of the earthquakes between the Urla and Balıkesir is a fossil fault. *Cumhuriyet Newspaper Science Technic Journal*, **848**, 6-7 (in Turkish)
- Kaya, O., 1979. Ortadoğu Ege çöküntüsünün (Neojen) stratigrafisi ve tektoniği, *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, **22**, 233-274 (in Turkish)
- Kaya, O., Ünay, E., Göktaş, F. and Saraç, G., 2007. Early Miocene stratigraphy of Central West Anatolia, Turkey: implications for the tectonic evolution of the Eastern Aegean area. *Geological Journal* **42**, 85–109.
- Keller, E. A. and Pinter, N., 1996. Active tectonic, Earthquakes, Uplift and Landscape". *Prentice Hall* P. 362.
- Keller, E.A. and Pinter, N., 2002. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape, 2. *Prentice Hall*, Upper Saddle River, N.J, 362.
- Keller, E. A. and DeVecchio, D. E., 2013. Tectonic geomorphology of active folding and development of transverse drainages. In *Treatise on Geomorphology*, 129-147. Elsevier Inc.
- Khalifa, A., Çakır, Z., Owen, L.A and Kaya, Ş., 2018. Morphotectonic analysis of the East Anatolian Fault, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **27**. <http://doi:110-126>, doi:10.3906/yer-1707-16.
- Mahmood, S.A. and Gloaguen, R., 2012. Appraisal of Active Tectonics in Hindu Kush: Insights From DEM Derived Geomorphic Indices and Drainage analysis. *Geoscience Frontiers*, **3 (4)**, 407 – 428.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Ergintav, S., Georgiev, I., ... and Kastens, K., 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **105(B3)**, 5695-5719.
- Marinos, P. and Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In *ISRM international symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Nugroho, S.K., Gibson, N.P., de Mooij, E.J., Herman, M.K., Watson, C.A., Kawahara, H. and Merritt, S.R., 2020. Detection of Fe i Emission in the Dayside Spectrum of WASP-33b. *The Astrophysical Journal Letters*, **898(2)**, L31.
- Nyst, M., and Thatcher, W., 2004. New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **109(B11)**.
- Ocakoglu, N., Demirbağ, E. and Kuşçu, İ., 2005. Neotectonic structures in İzmir Gulf and surrounding regions (western Turkey): Evidences of strike-slip faulting with compression in the Aegean extensional regime. *Marine Geology*, **219**, 155–171.
- Omidali, M., Arian, M., and Sorbi, A. , 2015. Neotectonics of Boroujerd Area, SW Iran by Index of Active Tectonics. *Open Journal of Geology*, **5(05)**, 309.
- Owen, A. W., Armstrong, H. A. and Floyd, J. D., 1999. Rare earth element geochemistry of upper Ordovician cherts from the Southern Uplands of Scotland. *Journal of the Geological Society*, **156(1)**, 191-204.
- Özkaymak, Ç. and Sözbilir, H., 2008. Stratigraphic and structural evidence for fault reactivation: the active Manisa fault zone, western Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **17**, 615–635.

- Özkaymak, Ç. and Sözbilir H., 2012. Tectonic geomorphology of the Spiladağ high ranges, Western Anatolia. *Geomorphology*, **173**, 128-140.
- Özkaymak, Ç., 2014. Tectonic analysis of the Honaz Fault (western Anatolia) using geomorphic indices and the regional implications. *Geodinamica Acta*, **27(2-3)**, 110-129.
- Özsayın, E., 2016. Relative tectonic activity assessment of the Çameli Basin, Western Anatolia, using geomorphic indices. *Geodinamica Acta*, **28(4)**, 241-253.
- Papazachos, B.C. and Papazachou, C.B., 1997. The earthquakes of Greece. Ziti Publishing, 304.
- Patton, P.C., 1988. Drainage basin morphometry and floods. In: Baker VR, Kochel RC, Patton PC (ed.) *Flood geomorphology*, 51–65.
- Pike, R.J. and Wilson, S.E., 1971. Elevation Relief Ratio, Hypsometric Integral and Geomorphic Area-altitude Analysis. *Geological Society of America Bulletin*, **62**, 1079 – 1084.
- Ramírez-Herrera, M.T., 1998. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes Landforms*, **23**, 317–332.
- Rana, N., Singh, S., Sundriyal, Y. P., Rawat, G. S., and Juyal, N., 2016. Interpreting the geomorphometric indices for neotectonic implications: An example of Alaknanda valley, Garhwal Himalaya, India. *Journal of Earth System Science*, **125(4)**, 841-854.
- Reilinger, R. E., McClusky, S. C., Oral, M. B., King, W. and Toksöz, M. N., 1997. Global positioning system measurements of present crustal movements in the Arabia- Africa-Eurasia plate collision zone. *J. Geophys. Res.*, **102**, 9983-9999.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... and Nadariya, M., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **111(B5)**.
- Ring, U., Susanne, L. and Matthias, B., 1999. Structural analysis of a complex nappe sequence and late orogenic basins from the Aegean Island of Samos, Greece. *Journal of Structural Geology*, **21**, 1575–1601.
- Rockwell, T.K., Keller, E.A. and Johnson, D.L., 1984. Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California. In: Morisawa, M. (Ed.), *Tectonic Geomorphology*. Proceedings of the 15th Annual Geomorphology Symposium. Allen and Unwin Publishers, Boston, MA, 183–207.
- Saber, R., Çağlayan A. and Işık V., 2018. Relative tectonic activity assessment and kinematic analysis of the North Bozgush fault zone, NW Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, **164**, 219-236.
- Sağlam, S.,A. and Düzgün, M., 2017. Başkale fay zonuunun tektonik jeomorfolojisi, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi* , **155**, 33-47 (in Turkish).
- Selim, H.,H., Tüysüz, O., Karakaş, A. and Taş, K.Ü., 2013. Morphotectonic Evidence from The Southern Branch of The North Anatolian Fault (NAF) and Basins of The South Marmara Sub-Region, NW Turkey. *Quaternary International*, **292**, 176 – 192.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. and Bardají, T., 2003. Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, **50**, 203–225.
- Softa, M., Emre, T., Sözbilir, H., Spencer, J. Q., and Turan, M., 2018. Geomorphic evidence for active tectonic deformation in the coastal part of Eastern Black Sea, Eastern Pontides, Turkey. *Geodinamica Acta*, **30(1)**, 249-264.
- Sözbilir, H., Erkül, F. and Sümer, Ö., 2003a. Gümüldür (İzmir) ve Bigadiç (Balıkesir) arasında uzanan Miyosen sonrası yaşlı KD-Doğrultulu accommodation zonuna ait saha verileri, Batı Anadolu [Field evidence for post-Miocene NE-trending accommodation zone lying between Gümüldür (İzmir) and Bigadiç (Balıkesir), west Anatolia]. *Geological Congress of Turkey*, Ankara, Abstracts, 85–86.
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U. and Helvacı, C., 2005. İzmir'deki Deprem Dizilerinin Nedeni: faylardaki çiçek yapısı. *Cumhuriyet Bilim Teknik Dergisi Deprem Araştırmaları*, **976**, 18-19. (in Turkish)
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Özkaymak, Ç., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U. and Helvacı, C., 2007. Batı Anadolu'da İzmir-Balıkesir transfer zonu içinde kalan aktif doğrultu-atımlı faylarla sınırlı havzaların jeolojik özellikleri [Geological features of basins bordered by active strike-slip faults that located in the İzmir-Balıkesir transfer zone, western Anatolia]. 11th Meeting of Active Tectonics Research Group, Abstracts, **42** (in Turkish).
- Sözbilir, H., Sümer, Ö., Uzel, B., Ersoy, Y., Erkül, F., İnci, U., Helvacı, C. and Özkaymak, Ç., 2009. 17-20 Ekim

- 2005 Sığacık Körfezi (İzmir) depremlerinin sismik jeomorfolojisi ve bölgedeki gerilme alanları ile ilişkisi, *Batı Anadolu. Türkiye Jeoloji Bülteni*, **52 (2)**, 217-238. (in Turkish).
- Sözbilir, H., Sarı, B., Uzel, B., Sümer, Ö. and Akkiraz, S., 2011. Tectonic implications of transtensional supradetachment basin development in an extension-parallel transfer zone: the Kocaçay Basin, Western Anatolia, Turkey. *Basin Research*, **23**, 423–448, doi: 10.1111/j.1365-2117.2010.00496.x.
- Strahler, A.N., 1952b. Hypsometric (area-altitude) Analysis of Erosional Topography. *Geological Society of America Bulletin*, **63**, 1117 – 1141.
- Strahler, A. N., 1964. Part II. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *Handbook of Applied Hydrology: McGraw-Hill, New York*, 4-39.
- Taxeidis, K., 2003. Study of historical seismicity of the Eastern Aegean Islands. PhD, University of Athens, Greece, 301 (in Greek).
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data: *Hydrological Processes*, **5**, 81-100.
- Utlu, M., and Özdemir, H., 2018. The Role of Basin Morphometric Features in Flood Output: A Case Study of the Biga River Basin. *J. Geog.* **36**, 49– 62. <https://doi.org/10.26650/JGEOG408101>
- Uzel, B. and Sözbilir, H., 2008. A first record of a strike-slip basin in Western Anatolia and its tectonic implication: The Cumaovası Basin. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **17**, 559–591.
- Uzel, B., Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Kaymakci, N., Langereis, C.G., 2013. Structural evidence for strike-slip deformation in the İzmir–Balıkesir Transfer Zone and consequences for late Cenozoic evolution of western Anatolia (Turkey). *Journal Geodynamics*, **65**, 94–116.
- Uzun, M., 2019. Evaluation of fluvial processes and formation of drainage network with morphometric indices in Dilderesi Basin (Kocaeli). *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, **40**, 454-477.
- Walker, F. and Allen M.B., 2012. Offset rivers, drainage spacing and the record of strike-slip faulting: The Kuh Banan Fault, Iran. *Tectonophysics*. **530-531**, 251-263.
- Wells, S. G., Bullard, T. F., Menges, C. M., Drake, P. G., Karas, P. A. and Kelson, K. I., 1988. Regional variations in tectonic geomorphology along a segmented convergent plate boundary, Pacific coast of Costa Rica. *Geomorphology*, **1**, 239–265.
- Yazıcı, M., Zabcı, C., Sancar, T. and Natalin, B. A., 2018. The role of intraplate strike-slip faults in shaping the surrounding morphology: The Ovacık Fault (eastern Turkey) as a case study. *Geomorphology*, **321**, 129-145.
- Yıldırım, C., 2014. Relative tectonic activity assessment of the Tuz Gölü fault zone; Central Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, **630**, 183–192.

#### Internet References

1-[http:// www.yerbilimleri.mta.gov.tr](http://www.yerbilimleri.mta.gov.tr)\_(07.05.2021)

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 055803 (1210-1222)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 055803 (1210-1222)

DOI: 10.35414/akufemubid.931365

Araştırma Makalesi / Research Article

### 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan Depremi (Mw5.1) Kaynak Parametreleri ve Fay Çözümlerinin Araştırılması, Güneydoğu Anadolu

Nihan HOŞKAN<sup>1</sup><sup>1</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşai, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İstanbul.e-posta: nihan@iuc.edu.tr. ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-5507-9818>

Geliş Tarihi: 02.05.2021

Kabul Tarihi: 29.09.2021

#### Öz

3 Aralık 2020 tarihinde Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağı yakınında uzun zamandır sismolojik olarak suskun olan bölgede, Siirt-Kurtalan Depremi meydana gelmiştir. Bu çalışmada, Siirt-Kurtalan depreminin (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri P-dalgası polaritelerinden hesaplanıp, diğer deprem veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve depremin spektral kaynak özellikleri ortaya konmuştur. Bunların yerel tektonik yorumlamaya katkısı sunulmuştur. Buna göre depremin dış merkezi 38.048oK enlemi, 41.746oD boylamı olarak bulunmuştur. S dalga yer değiştirme spektrumu üzerinde köşe frekansı 0.571 ( $\pm 0.098$ ) Hz olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, kaynak yarıçapı=1.973 ( $\pm 0.088$ ) km, momenti (Mo)=5.015\*10<sup>16</sup> ( $\pm 0.062$ ) Nm, moment büyüklüğü(Mw)=5.098 ( $\pm 0.093$ ), gerilim boşalımı=27.487 ( $\pm 0.304$ ) bar olarak bulunmuştur. HASH yazılımı kullanılarak birinci ve ikinci düğüm düzlemleri için (doğrultu, eğim ve kayma) sırasıyla (326, 84, 178) ve (56, 88, 6) olarak bulunmuştur. Buna göre ikinci düğüm düzlemi yerel tektoniğe uygun sol yönlü doğrultu atımlı fay karakteristiğini göstermektedir. Sismotektonik etkinlik bakımından önemli olan Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı sürekli gözlemlenmelidir. Bunun için ek deprem istasyonları kurulmalı ve bölgede detaylı sismotektonik çalışmaların yapılması sağlanmalıdır.

#### Anahtar kelimeler

3 Aralık Siirt-Kurtalan Depremi; Deprem Kaynak Parametreleri; FPFIT Yazılımı; Gerilim Boşalması; HASH Yazılımı; Yayınım Paterni

## Investigation of the Source Parameters and Fault Mechanism Solutions of the December 3rd, 2020 Mw5.1 Siirt-Kurtalan Earthquake, Southeast Anatolia

#### Abstract

On December 3rd, 2020, the Siirt-Kurtalan Earthquake occurred near the Bitlis-Zagros Suture Zone that has been seismologically quiet for a long time. In this study, the focal mechanism solutions of the Siirt-Kurtalan earthquake (Mw5.1) were determined from P-wave polarities, analyzed in comparison with the solutions provided by other earthquake data centers, and the spectral source characteristics of the earthquake were revealed. Accordingly, the epicenter of the earthquake was found 38.048°N, 41.746°E. On the S-wave displacement spectrum, corner frequency was calculated 0.571 ( $\pm 0.098$ ) Hz. Consequently, source radius=1.973 ( $\pm 0.088$ ) km, the moment (Mo)=5.015\*10<sup>16</sup> ( $\pm 0.062$ ) Nm, the moment magnitude (Mw)=5.098 ( $\pm 0.093$ ), and the stress drop=27.487 ( $\pm 0.304$ ) bar were found. Using the HASH code, for the first and second nodal planes (strike, dip, rake) were found as (326, 84, 178) and (56, 88, 6), respectively. Therefore, the second nodal plane shows a left-lateral strike-slip fault characteristic in accordance with local tectonics. The Bitlis-Zagros Suture Zone, which is important in terms of seismotectonic activity, should be constantly observed. For this purpose, additional earthquake stations should be established and detailed seismotectonic studies should be carried out in the region.

#### Keywords

December 3rd, 2020 Siirt-Kurtalan Earthquake; Earthquake Source Parameters; FPFIT Code; Stress Drop; HASH Code; Radiation Pattern

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

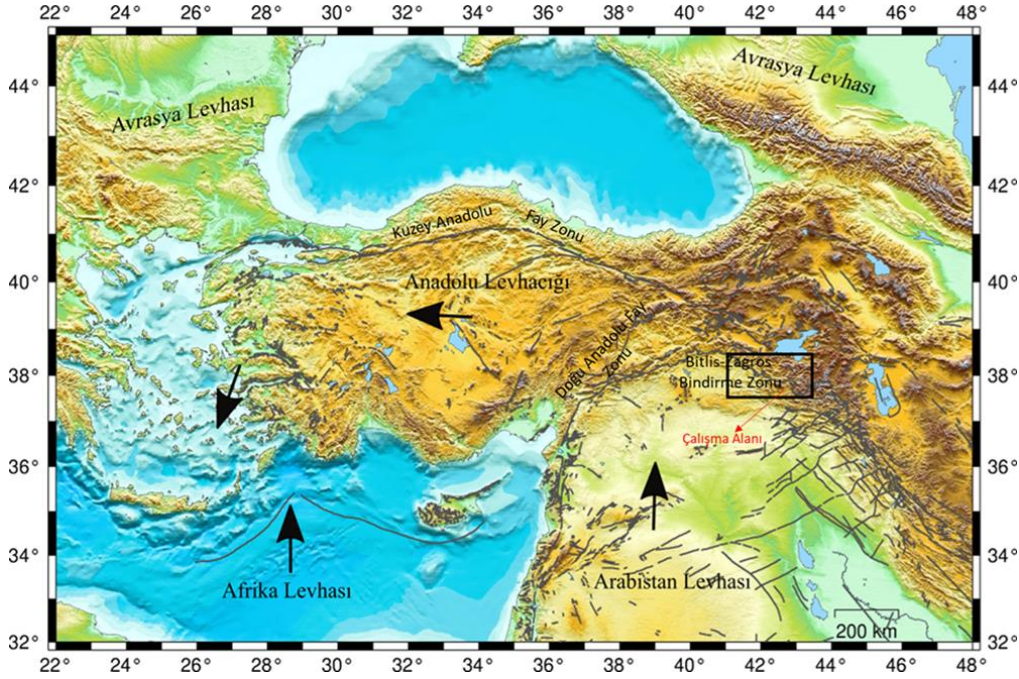
### 1. Giriş

Deprem odak mekanizması çözümlerinin analizi, bir bölgedeki mevcut deformasyonu anlamak için

sismolojik açıdan temel bir araçtır ve depremin meydana geldiği fayın karakterini tayin etmede

önemli rol oynar (Gomberg and Ellis 1994, Hsu and Sibuet 1995, Carena and Suppe 2002, Rundquist and Sobolev 2002, Bilek *et al.* 2003, Steacy *et al.* 2005, Janutyte and Lindholm 2017). Ayrıca, deprem kaynak parametrelerinin incelenmesi, sismotektonik süreçlerin anlaşılması ve potansiyel sismik tehlikenin değerlendirilmesine de katkıda bulunur (Hardebeck and Shearer 2002). Kaynaktaki deprem gerilim enerjisinin boşalım (stress drop) hesaplamaları ve yayılım paterninin bulunması da depremin meydana geldiği bölgenin tektoniğinin incelenmesinde önemli bilgiler sunar. Bu kapsamda, Bitlis-Zagros Bindirme Kuşağının doğu kanadı üzerinde Siirt'in Kurtalan İlçesi'nde 3 Aralık 2020 tarihinde yerel saatle 08.45'te meydana gelen Mw5.1 büyüklüğünde deprem incelenmiştir.

Bilindiği gibi Bitlis-Zagros, dünyanın önemli kenet kuşaklarından birisidir ve Siirt-Kurtalan Depremi, bu bölgedeki son 107 yıllık sessizliği bozmuştur (Eyidoğan 2020). Bölgede, yılda yaklaşık olarak 18 mm hızla K-KB yönünde ilerleyen Arabistan Levhası, Bitlis-Zagros Bindirme Zonu boyunca Avrasya Levhası ile çarpışmıştır (McKenzie 1972, Şengör 1980, Eyidoğan 1983, Barka and Reilinger 1997, Reilinger *et al.* 2006). Bu çarpışma nedeniyle, sırasıyla kayma hızları yaklaşık olarak yılda 25 mm ve 9 mm olan Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Zonları arasında kalan Anadolu Levhası saatin tersi yönünde batıya doğru kaçar (Şengör and Yılmaz 1981, Şengör *et al.* 1985, Yılmaz 2000, Barka and Reilinger 1997, McClusky *et al.* 2000, Allen *et al.* 2004) (Şekil 1).



**Şekil 1.** Türkiye'nin ana fay hatları, levha sınırları ve levhaların hareket yönleri (Fay çizgileri Emre vd. (2013)'ten uyarlanarak ve harita GMT (Wessel and Smith 1998) kullanılarak oluşturulmuştur).

Söz konusu tektonik ortamda meydana gelen Siirt-Kurtalan depreminin sismik kaynağıyla ilgili farklı görüşler bulunmaktadır. Emre *et al.* (2013), depremin Bitlis-Zagros Kenet Zonuna paralel, Siirt ili güneydoğusundaki KB-GD sağ yanal doğrultu atımlı faydan kaynaklandığını ileri sürerken, Seyitoğlu (2020), dış merkezi Garzan Ters/Bindirme Fayları yakınında olan depremin, USGS'e ait fay düzlem çözümleri ve artçı etkinlik dağılımını dikkate alarak,

iki farklı cephe arasında meydana gelmiş sol yanal makaslama üzerinde gerçekleşebileceğini düşündüğünü söylemiştir.

Bu çalışmada, Siirt-Kurtalan depreminin (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri P-dalga (ilk varış) polaritelerinden hesaplanıp, diğer veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırmalı olarak irdelenmiş ve depremin kaynak özellikleri (spektral



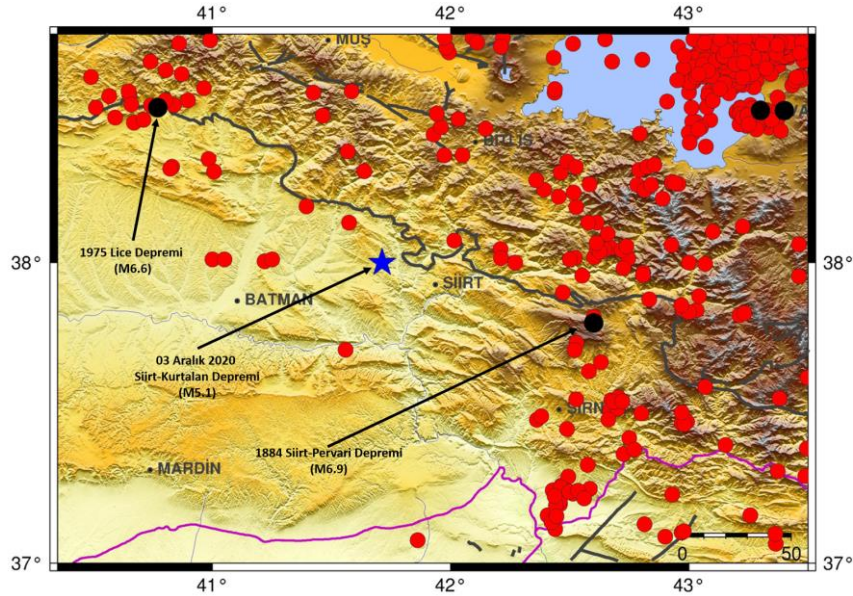
ve yayılım paterni) ortaya konmuştur. Bunların yerel tektonik yorumlamaya katkısı sunulmuştur.

### 1.1. Bölgenin Sismotektonik Özellikleri

Bitlis-Zagros Bindirme Zonu (BZBZ) Arabistan Arabistan Levhası ile Avrasya Levhası'nın Oligosen-Erken Miyosen'de kıta-kıta çarpışması sonucu meydana gelmiştir (McKenzie 1972, Hall 1976, Şengör 1980, Eyidoğan 1983, Yılmaz 1993, Rowley 1996, Barka and Reilinger 1997, Reilinger *et al.* 2006, Seyitoğlu *et al.* 2018, Seyitoğlu 2020). İran'da Zagros Bindirme Zonu olarak başlayan kuşak, Türkiye'de Hakkari'den başlayıp güneybatı yönüne doğru iç bükey bir yay çizip, Kahramanmaraş batısına kadar uzanarak Bitlis Bindirme Zonu ya da Güneydoğu Anadolu Bindirmesi adını alır (Şengör 1980, Baştuğ 1976, Şaroğlu vd. 1987). Yaklaşık 800 km uzunluğunda ve 60 km genişliğinde olan bu zon aynı zamanda (Arpat 1977, Eyidoğan 1983, Seyitoğlu vd. 2019) Doğu Anadolu ile Güneydoğu Anadolu bölgelerinin coğrafik sınırına karşılık gelir (Şaroğlu vd. 1987) (Şekil 1). Levhaların geçmiş hareketlerinin incelenmesi sonucunda, Arap ve Avrasya levhaları arasındaki yakınsamanın, sağ yanal doğrultu atımlı faylarla gerçekleşen Zagros segmentine kıyasla Bitlis segmenti boyunca daha ortogonal olduğunu göstermektedir (McQuarrie *et al.* 2003, Allen *et al.* 2004). Bitlis Bindirme Zonu boyunca meydana gelen

depremlerin kaynağı, çoğunlukla levhaların K-G yönünde günümüzde de birbirlerine yaklaşma sürecinin devam etmesinin bir sonucudur (İmamoğlu ve Çetin 2007). Günümüzde Zagros segmenti kısalma ile karakterize edilirken, Bitlis segmenti doğrultu atımlı faylanma ile karakterize edilmektedir ve Bitlis Bindirme zonu boyunca mevcut kabuk hareketleri, batıda ağırlıklı olarak doğrultu atımdan, doğuda ortogonal kıalmaya doğru değişmektedir (Reilinger *et al.* 2006, Okay *et al.* 2010).

Tarihsel dönemde 1884 Siirt-Pervari (M6.9) (Soysal vd. 1981), aletsel dönemde 1975 Lice Depremi (M6.7) (Jackson and McKenzie 1984), bu çalışmada incelenen Siirt-Kurtalan depremi civarında meydana gelmiş önemli depremlerdir (Şekil 2). 1975 Lice depreminin Ergani-Silvan Kör Bindirmesinden (Blind Thrust) kaynaklandığı düşünülmüştür (Seyitoğlu *et al.* 2017). Şekil 2'de Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı Deprem Dairesi (AFAD) tarafından hazırlanan deprem kataloğu kullanılarak 1900-2021 tarihleri arasında  $3.5 \leq M \leq 6.7$  büyüklükleri arasında meydana gelmiş depremler, ve ayrıca, tarihsel dönemde çalışma alanında oluşmuş depremler gösterilmiştir. Son meydana gelen 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan Depremi (Mw5.1), Bitlis Bindirme Kenet Kuşağı içinde değerlendirilmektedir (Şekil 2).

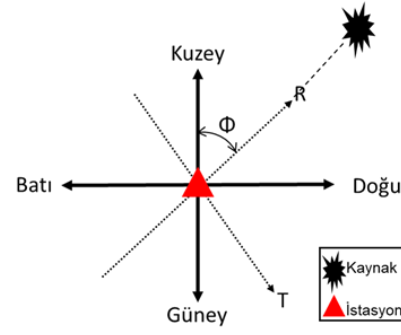


Şekil 2. Bölgede 1900-2021 yılları arasında meydana gelmiş, büyüklüğü  $3.5 \leq M \leq 6.7$  olan aletsel depremler (Kırmızı daireler ile (AFAD), tarihsel depremler (Soysal vd. 1981, Jackson and McKenzie 1984) siyah daireler ile ve Siirt-Kurtalan depremi mavi yıldız ile gösterilmiştir).

## 2. Materyal ve Metot

Siirt-Kurtalan depremi (Mw5.1) odak mekanizma çözümleri için fullseed (fseed) formatında kayıt edilmiş olan olay bazlı veriler, Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı Deprem Dairesi (AFAD), Türkiye Deprem Veri Merkezi (TDVM) web sayfasından indirilerek kullanılmıştır (Int Kyn. 1). Çalışma için, alet düzeltmesi ve istasyon hakkındaki bilgilerin olduğu metadata dosyasını içerdiği için fullseed formatındaki veri tercih edilmiştir.

AFAD-TDVM'den indirilen 100 Hzlik üç bileşenli kayıtlara alet düzeltmesi, gerçek yer hareketi değerlerini bulmak amacıyla yapılmıştır. Alet düzeltmesi, aletin çıktısı (örn: dijital sayaç değeri) yerine fiziksel birimler (yüzeydeki hareketin hızı (örn:metre/saniye) veya yer değiştirme (örn:metre)) olarak sismogramların analizinin gerçek yer hareket değerleri ile yapılmasına izin verir (Haney vd., 2012). Alet düzeltmesi yapıldıktan sonra, üç bileşenli sismogramların KG (kuzey güney), DB (doğu batı) yatay bileşenleri back azimut yönünde döndürülerek R (radial=ışınsal) ve T (transverse=teğetsel) bileşenleri olarak elde edilmiştir. Sismometreler düşey (Z) ve yatay (KG ve DB) olmak üzere üç bileşenli kayıt alırlar. P-Sv-Rayleigh dalgalarının, Sh-Love dalgalarından ayrıldığı R-T bileşenlerine döndürülmesi, deprem P-S ve yüzey dalgalarının fazlarının ayırt edilebilmesini mümkün kılar. Bileşen dönüşümü yapılırken istasyondan depreme olan back azimut (BAZ) açısı kullanılmaktadır (Scherbaum ve Jonnson 1992) (Şekil 3).



Şekil 3. Back azimut açısının gösterimi (Sholtz *et al.* 2016).

Burada,

$$A = \begin{bmatrix} \cos\Phi & \sin\Phi \\ -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

ve

$$\begin{bmatrix} R \\ T \end{bmatrix} = A * \begin{bmatrix} KG \\ DB \end{bmatrix} \quad (2)$$

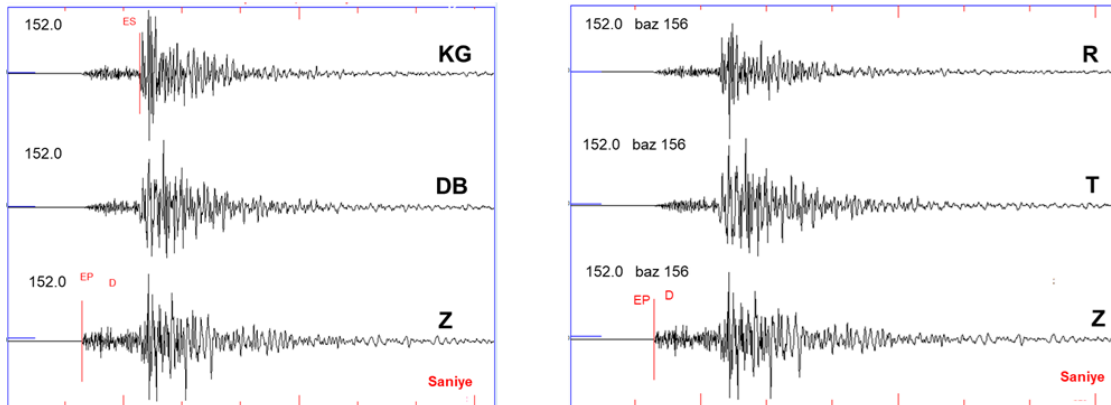
olur. Buradan,

$$R = \cos\Phi \cdot KG(t) + \sin\Phi \cdot DB(t) \quad (3)$$

$$T = -\sin\Phi \cdot KG(t) + \cos\Phi \cdot DB(t)$$

olarak Kuzey-Güney (KG) ve Doğu-Batı (DB) bileşenleri R ve T'ye döndürülmüş olur (Sholtz *et al.* 2016).

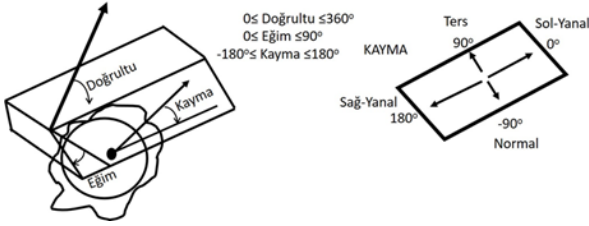
Örnek olarak deprem dış merkezine 152 km uzaklıktaki KARO istasyonu verisi Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. AFAD-TDVM'den indirilen 152 km uzaklıktaki KARO istasyonu (a) ham veri KG, DB, Z bileşenleri (b) Hesaplanan geri azimut açısı (back azimuth) baz=156° ile rotasyon uygulanmış R-T-Z bileşenleri. EP, ES, D sırasıyla Z bileşen üzerinden ayırt edilen P dalgası, yatay bileşen üzerinde belirlenen S dalgası varış zamanlarını ve düşey bileşen üzerindeki P dalgası polarizasyonunu (D=dilatasyon) gösterir.



Siirt-Kurtalan depremi kaynak özellikleri, Aki and Richards (1980) şeması (Şekil 5) göz önüne alınarak irdelenmiş ve FPFIT ile HASH yazılımları kullanılarak fay düzlemi çözümü ile odak mekanizması belirlenmiştir. Bunun yanı sıra depremin Gerilim Boşalımı (stress drop) ile yayılım paterni değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Deprem parametreleri Aki and Richards 1980 şematik gösterimi (Toda *et al.* 2011).

## 2.1 FPFIT

FPFIT yazılımı (Reasenber and Oppenheimer 1985), bir deprem için gözlemlenen P dalgası polarite (yukarı + (compression), aşağı - (dilatation)) kümesine en iyi uyum çift kuvvet bileşenli fay düzlemi çözümünü hesaplar. Bu hesaplama, ters çözüm ile normalleştirilmiş, ağırlıklı toplam ilk hareket polarite farklılıklarını en aza indirgeyen kaynak modelini bulan iki aşamalı grid arama işlemi ile gerçekleştirilir. Minimizasyona iki ağırlık faktörü dahil edilmiştir: biri verilerin tahmini varyansını yansıtır ve teorik P dalgası yayılım genliğinin mutlak değerine dayanır (Aki and Richards 1980). İkinci ağırlıklandırma, yayılım loblarına (düğüm düzlemleri) yakın gözlemlere daha fazla (ya da daha az) ağırlık verir ve hata miktarında önemli göreceli minimum değerlere karşılık gelen alternatif çözümler arar.

## 2.2 HASH

HASH yazılımı, kabul edilebilir tüm çözümleri bulmak için grid aramasıyla ilk hareketi kullanarak odak mekanizmalarını belirler (Hardebeck and Shearer 2002, 2003). Odak mekanizması belirsizliği, polarite hataları, olay yeri hataları ve sismik hız yapılarının etkilerinin dikkate alınmasında, FPFIT ile karşılaştırıldığında, önemli avantajlar sunar. Yazılım, kaynak konumunu değiştirerek ve bu değerlendirme için hız modelini seçerek yinelemeli çözümler yapar. Çözüm için, uyumsuzluk, RMS (Root Mean Square) farkı, istasyon dağılım oranı ve olasılık çözümü

olmak üzere dört parametre kullanılarak değerlendirilir.

## 2.3 Gerilim Boşalımı (Stress Drop)

Gerilim boşalımı, fay kaymasından hemen önce ve kaymanın durmasından hemen sonraki makaslama gerilmesi arasındaki farka denir ve faylanma sürecinin dinamiklerinde belirlenebilen en önemli parametredir (Lay and Wallace 1995). Depremlerde gerilim enerjisinin ne kadarının açığa çıktığını bilmek önemlidir. Uzun süre suskun ve fakat tektonik bakımdan aktif olduğu bilinen bölgelerde meydana gelen bir deprem için yüksek gerilim boşalımı beklenebilir.

Gerilim boşalımı ile kaynak yarıçapı arasındaki ilişki, spektral yöntem kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Brune 1970, Ottomoller and Haskov 2017):

$$Sr = 0.37 * V / fo \quad (4)$$

burada, Sr=kaynak yarıçapı, fo=köşe frekansı, V=P veya S dalgası durumuna göre kaynaktaki P veya S hızıdır. Dolayısıyla, gerilim boşalımı ( $\sigma$ ) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\sigma = 0.44 * Mo / (Sr)^3 \quad (5)$$

burada Mo; moment (Newton-metre (Nm))'tir.

## 2.4 Yayılım Paterni (Radiation Pattern)

Faylanma mekanizması ile ilgili olan yayılım paterni, fay kırılma sürecinin neden olduğu yer hareketinin coğrafi asimetrisidir. Kaynak yırtılma yönü (rupture direction), iyi bilinen bir sismolojik özelliktir (Lay and Wallace 1995) ve kuvvetli yer hareketi ve genlik ilişkisini kontrol eden faktördür (Campbell 2003a, Campbell 2003b). Kaynak yırtılma yönünün sonucu olarak, kırılma yayılımı ileri yönündeki yer hareketi genlikleri artarken, geri yöndekiler azalır (Lay and Wallace 1995). Dolayısıyla, yayılım paterni kaynaktan yayılan enerjinin (P, S ve yüzey dalgaları) yönü ve genlikleri ile ilgili bilgi verir.

## 3. Bulgular

Siirt-Kurtalan Depremi odak mekanizması çözümü için, AFAD-TDVM 100 Hzlik sismogramlar, SEISAN (Ottomoller and Havskov 2017) formatına çevrilerek, P ve S dalgalarının varışları işaretlenmiştir. Kullanılan istasyonların yeri,

yüksekliği ve bölgesel 1-B hız modeli (Int Kyn. 2) (Çizelge 1), HYPO71 (Lee and Lahr 1972) formatında hazırlanmıştır. İşaretlenen dalga faz bilgileri ve hazırlanan formatlı istasyon verisi yardımıyla HYPOINVERSE (Klein 2014) yöntemi SEISAN paketi yardımıyla, depremin yeri 38.048°K enlemi, 41.746°D boylamı olarak tespit edilmiştir (Şekil 6).

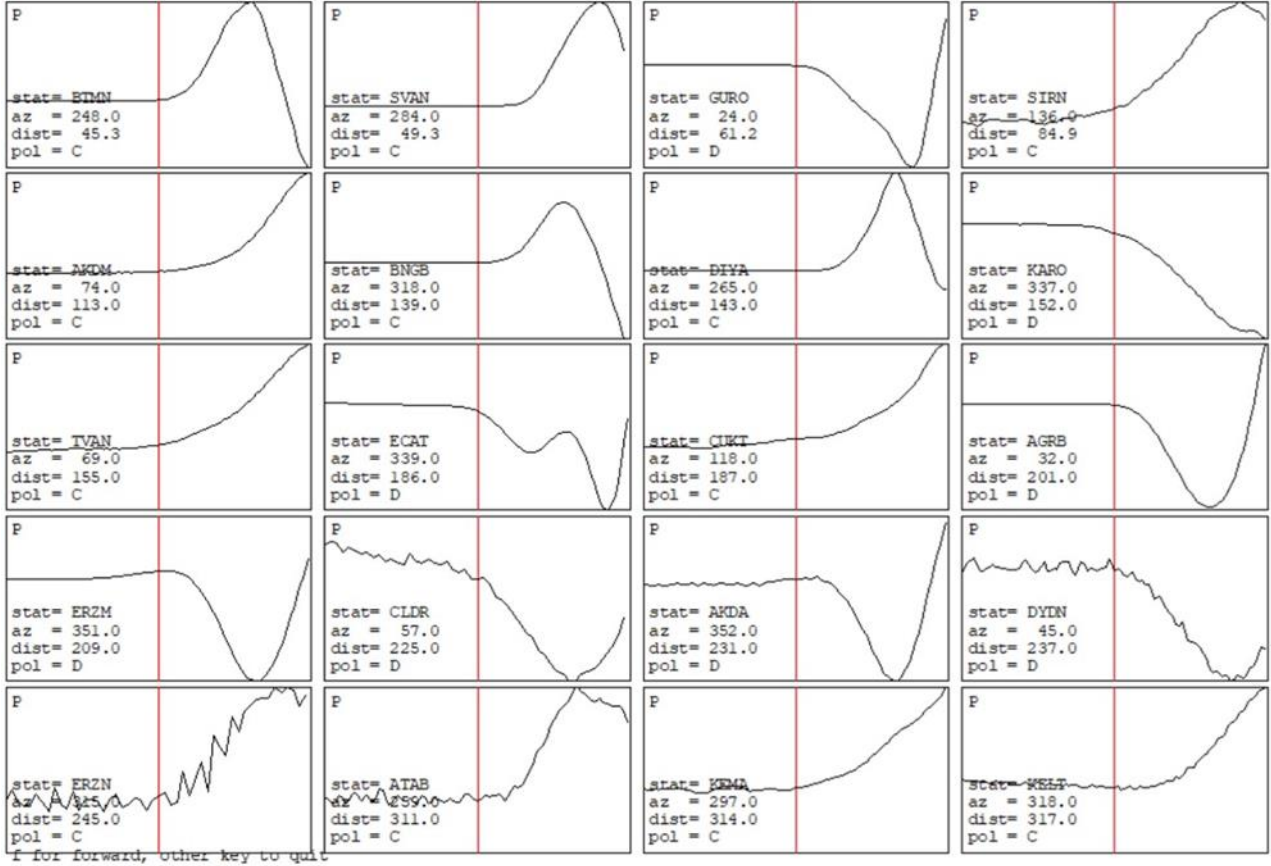
Çizelge 1. Kullanılan Hız Modeli ( $V_p/V_s=1.78$ ) (Int Kyn. 2).

$V_p$ (m/sn)	$V_s$ (m/sn)	Derinlik(km)
3.55	1.99	0
3.57	2.01	0.5
3.7	2.08	1
5.35	3.01	2
5.67	3.19	3
5.9	3.31	5
6.02	3.38	7
6.07	3.41	10
6.1	3.43	14
6.18	3.47	18
6.67	3.75	30
8	4.49	50



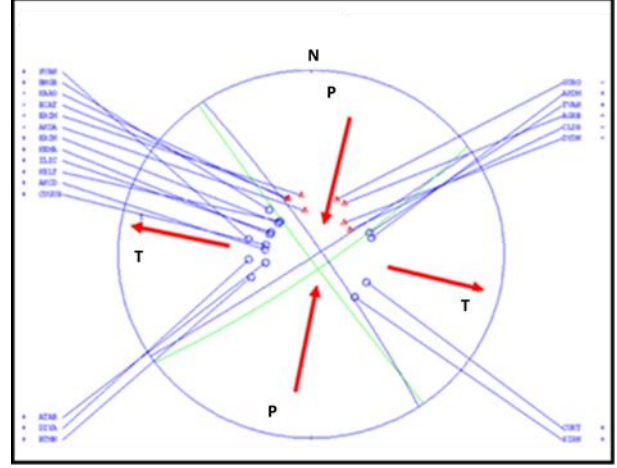
Şekil 6. Kullanılan AFAD istasyonlarının yerleri ve HYPOINVERSE ile bulunan Siirt-Kurtalan depremi üst merkezi (38.048°K enlemi, 41.746°D boylamı) (Altlık harita; Google Earth Pro, 2021).

Odak mekanizması çözümleri için, P dalgası polariteleri (ön set yönleri) kullanılarak FPFIT (Reasenberg and Oppenheimer 1985) ve HASH (Hardebeck and Shearer 2002, 2003) yazılımları SEISAN (Int Kyn. 3) altında çalıştırılmıştır. Şekil 7’de düşey bileşen üzerinde işaretlenen P dalgası polariteleri gösterilmiştir.



Şekil 7. Düşey bileşen üzerinde işaretlenen P dalgası polariteleri; stat=istasyon adı, dist=istasyon uzaklığı (km), az=depremin azimutu (derece) ve pol=polarite yönleri (C=itme (+) (pressure), D= çekme (-) (dilatation)).

HASH ve FPFIT yazılımının çalıştırılması için istasyon listesi, hız modelleri, P dalga polarite verileri; giriş parametreleri olarak derlenmiştir. P dalgası polariteleri kullanılarak Siirt-Kurtalan depremi I. Düzüm düzleminin doğrultu, eğim ve kayma değerleri sırasıyla HASH ile (326, 84, 178) ve FPFIT ile (144, 89, -170) olarak hesaplanmıştır (Şekil 8) ve Çizelge 2’de karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir. FPFIT ile elde edilen kayma değerindeki farkın nedeninin azimuthal gap değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. FPFIT yazılımının büyük azimuthal gap değerine hassas olduğu bilinmektedir. HASH yazılımı FPFIT’in geliştirilmiş versiyondur. Bu nedenle HASH ile elde edilen sonuçların, diğer deprem veri merkezleri ile elde edilmiş sonuçlar ile daha uyumlu olduğu görülür (Çizelge 2.)



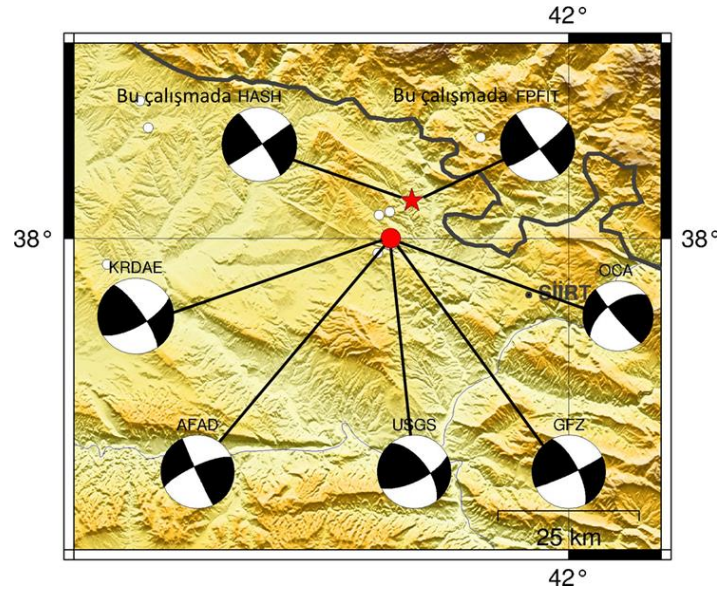
**Şekil 8.** FPFIT (yeşil) ve HASH (mavi) fay çözümleri. P=itme ve T=çekme yönleri ((+) ve (-) ler her bir istasyon için polarite yönlerini gösterir). P ve T eksenlerinin yönleri kırmızı oklarla gösterilmiştir.

**Çizelge 2.** 3 Aralık 2020 Siirt-Kurtalan depreminin bu çalışmada ve farklı sismoloji merkezleri tarafından elde edilen parametreleri: KRDAE; Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü, AFAD; Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, USGS; United States Geological Survey, GFZ; German Research Centre for Geosciences, OCA; The Côte d’Azur Observatory; Der=Derinlik (km), D=Doğrultu, E=Eğim, K=Kayma ve Yntm=Parametrelerin elde edilmesi için kullanılan yöntem. Parametre indisleri 1 ve 2 sırasıyla birinci. ve ikinci. düğüm düzlemlerini temsil eder. Koyu siyah ile gösterilen değerler, farklı veri merkezleri ile bu çalışmada bulunan uyumlu fay çözümlerini göstermektedir.

Çöz.	Mw	Der (km)	D <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	K <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	K <sub>2</sub>	Yöntem
<b>Bu çalışma</b>	5.1	10	<b>326</b>	<b>84</b>	<b>178</b>	56	88	6	HASH
<b>Bu çalışma</b>	5.1	10	144	89	-170	54	80	-1	FPFIT
KRDAE	5.1	18	<b>325</b>	<b>76</b>	<b>158</b>	60	69	14	MT
AFAD	5	14.2	155	88	166	<b>245</b>	<b>76</b>	<b>2</b>	MT
USGS	5	18	<b>322</b>	<b>61</b>	<b>156</b>	64	69	30	MT
GFZ	5	12	<b>333</b>	<b>69</b>	<b>174</b>	65	84	20	MT
OCA	4.8	7	140	85	148	233	58	6	MT

Şekil 9’da HASH ve FPFIT bulguları diğer veri merkezlerinin çözümleri ile karşılaştırmalı olarak (Çizelge 2) gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 9’de Siirt-

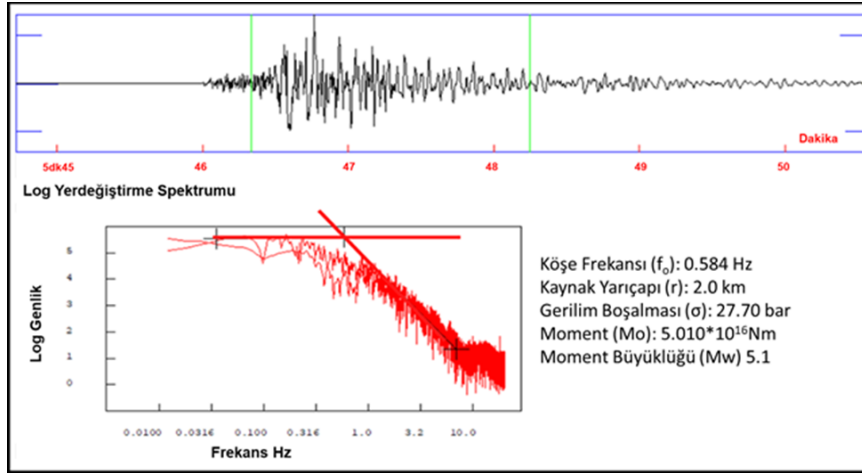
Kurtalan depremi sonrası meydana gelen artçı şoklar ( $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ ) verilmiştir. Deprem sonrası meydana gelen en büyük artçı şok  $M_L=2.6$  büyüklüğündedir.



**Şekil 9.** Siirt-Kurtalan depremi ( için bu çalışmada bulunan ve diğer sismoloji merkezleri tarafından hesaplanan odak mekanizma çözümleri (kırmızı:AFAD tarafından, yıldız:bu çalışmada bulunan üst merkez yeri, beyazlar; artçı şoklar ( $2.0 \leq M_L \leq 2.6$ )).

Siirt-Kurtalan depremi için yüksek kaliteli S/G (sinyal/gürültü) oranı iyi olan istasyonların T bileşeni kullanılarak S dalgası yer değiştirme spektrumu ile köşe frekansı, kaynak yarıçapı, gerilim boşalması, momenti ve moment büyüklüğü elde edilmiştir (Brune 1970, Ottomoller and Haskov 2017). Seçilen istasyonlar için bulunan sonuçların ortalaması alınıp, standart sapmaları hesaplanmıştır. Buna göre

standart sapmaları ile, köşe frekansı  $0.571 (\pm 0.098)$  Hz, kaynak yarıçapı  $1.973 (\pm 0.088)$  km, gerilim boşalması ( $\sigma$ )  $27.487 (\pm 0.304)$  bar, Momenti ( $M_0$ )  $5.015 \cdot 10^{16} (\pm 0.062)$  Nm ve moment büyüklüğü ( $M_w$ )  $5.098 (\pm 0.093)$  olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). Deprem üst merkezine 237 km uzaklıktaki DYDN istasyonu, T bileşeni ve yer değiştirme spektrumu örneği Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 10.** DYDN istasyonu, HHT (Transverse) bileşeninin S-dalgası penceresindeki (yeşil çizgiler arası) (üstte) yarı logaritmik yer değiştirme spektrumu örneği (altta).

Kaynak yarıçapı yaklaşık 2 km olarak alınırsa, Wells and Coppersmith (1994) tarafından verilen

$$\log(YA) = -3.42 + 0.90 * M \quad (6)$$

ampirik bağıntısı kullanılarak  $M_w=5.02$  olduğu yaklaşık olarak bulunabilir. (6) bağıntısında YA, dairesel yırtılma alanı (Şekil 5) ve M, depremin moment büyüklüğüdür.

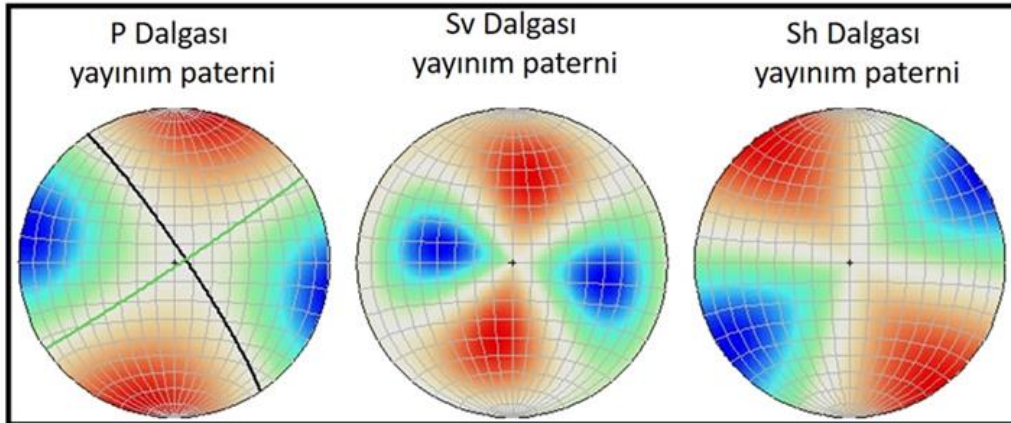


**Çizelge 3.** Seçilen istasyonlardaki T bileşenleri üzerinde hesaplanan kaynak spektrum parametreleri.

İstasyon Adı	Moment ( $10^{16} \cdot \text{Nm}$ )	Gerilim Boşalması (bar)	Köşe Frekansı (Hz)	Kaynak Yarıçapı (km)	Moment Büyüklük ( $M_w$ )
BTMN	5.039	27.9	0.615	1.9	5.155
SVAN	4.898	27.4	0.56	1.9	5.102
SIRN	5.048	27.6	0.686	2.1	5.156
DIYA	4.998	27.9	0.589	1.9	5.19
TVAN	5.029	27.4	0.551	1.9	5.253
ECAT	5.048	27	0.557	1.9	4.945
CMKT	4.998	27.1	0.588	2.1	5.112
CLDR	5.119	27.7	0.715	2.1	5.142
AKDA	4.998	27.6	0.271	2	4.944
DYDN	5.012	27	0.584	2	5.1
ATAB	5.016	27.6	0.536	1.9	5.09
KEMA	5.109	27.4	0.596	2	5.12
KELT	4.886	27.8	0.598	2.1	5.118
AKCD	5.012	27.7	0.513	1.9	4.99
CUGUR	5.012	27.2	0.604	1.9	4.979
Aritmetik Ortalama	5.015	27.487	0.571	1.973	5.098
Standart Sapma	0.062	0.304	0.098	0.088	0.093

Ayrıca, HASH çözümü yardımıyla RFOC (Lees 2012) kullanılarak Siirt-Kurtalan depremi P, Sv ve Sh

dalgaları yayılım paterni grafiksel olarak elde edilmiştir (Şekil 11).



**Şekil 11.** Birinci düğüm HASH çözümü olan (326, 84, 178) siyah kalın çizgi, ikinci düğüm düzlemi yeşil çizgi, P dalgası yayılım paterni (sol), ortadaki ve sağda verilen projeksiyon açıları sırasıyla Sv ve Sh dalgası yayılım paternleridir. P, Sv ve Sh yayımları için kırmızı kısımlar çekme, mavi ise itme yönlerini gösterir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı içinde meydana gelen Siirt-Kurtalan depremi, bölgenin uzun zamandır suskun olması nedeniyle dikkat çekicidir. Bu çalışmada 3 Aralık 2020 tarihinde yerel saatle 08.45'te Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı yakınında meydana gelen Siirt-Kurtalan depreminin kaynak özellikleri (spektral ve yayılım paterni) incelenmiş ve odak mekanizma çözümleri P-dalgası polaritelerinden hesaplanıp diğer deprem veri merkezleri tarafından yapılan çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Buna göre, depremin dış merkezi HYPOINVERSE (Klein 2014) yöntemi kullanılarak Kozlu-Narlık Fayı (Perinçek 1983) yakınında (38.048°K enlemi ve 41.746°D boylamında) bulunmuştur. P- dalgası ilk hareket yönleri kullanılarak depremin fay düzlemi çözüm parametreleri olan doğrultu, eğim ve kayma değerleri sırasıyla HASH yazılımı ile 326, 84, 178 derece olarak hesaplanmıştır. Buna göre, kaynak parametreleri diğer sismoloji merkezlerinin yayınladığı değerlerle uyumlu olarak elde edilmiştir.

Yüksek kaliteli S/G (sinyal/gürültü) oranı iyi olan istasyonların T (transverse) bileşeni kullanılarak hesaplanan S dalgası yer değiştirme spektrumu ortalamaları ve standart sapmaları ile depremin köşe frekansı 0.571 ( $\pm 0.098$ ) Hz, gerilim boşalması ( $\sigma$ ) 27.487 ( $\pm 0.304$ ) bar, kaynak yarıçapı 1.973 ( $\pm 0.088$ ) km, momenti ( $M_0$ )  $5.015 \cdot 10^{16}$  ( $\pm 0.062$ ) Nm (Newton-metre) ve moment büyüklüğü (Mw) 5.1 olarak tespit edilmiştir. Gerilim boşalması 27.487 ( $\pm 0.304$ ) bar olarak hesaplanmıştır ve bu değer Mw5.1 büyüklüğündeki bir deprem için beklenen limitlerdedir (Ali ve Shieh 2013). Ayrıca yine HASH yazılımı ile elde edilen sonuçlar kullanılarak, P-Sv ve Sh dalgaları yayılım paternleri RFOC (Lees 2012) yazılımı yardımıyla gösterilmiştir. Yayılım paterni, S dalga spektrum parametrelerinin hesaplanmalarını güvenilir olarak vermiştir.

Bindirme sistemlerinde, bindirme düzlemlerine ait yan yüzeylerin verev atımlı bindirmeler veya bindirme bileşenli doğrultu atımlı faylar olarak

davranabilecekleri bilinmektedir (Morley 2009). Bu çalışmada elde edilen kaynak mekanizma çözümü, Seyitoğlu (2020)'de önerilen Siirt-Kurtalan depreminin sol yanal atımlı bir fayda meydana gelmiş olabileceği görüşünü desteklemektedir. Buna göre, HASH yazılımı ile bulunan ikinci düğüm düzlem çözümü, sol yanal atımlı fay için doğrultu, eğim ve kayma değerleri (derece olarak) 56, 88 ve 6'dır. Ayrıca, Mw5.1 büyüklüğündeki bir deprem sonrasındaki artçı depremler incelendiğinde  $M_L 2.6$ 'dan daha büyük artçı etkinliğin gözlenmemesi ilginç sayılabilir. Bu deprem için beklenen en büyük artçı çok (yaklaşık M4 ve civarı) henüz oluşmamıştır.

Uzun zamandan beri suskun olan Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı üzerinde bulunan bölgede, Siirt ili güneyinde fazla deprem istasyonu olmaması önemli bir sorun olarak görülmektedir. Bu nedenle söz konusu bölgede istasyonlar kurulması ve olası depremlerin etkinliğinin gözlenmesi yararlı olabilir. Ayrıca, bölgenin detaylı kabuk hız yapısı çalışmalarının da yapılması, hassas deprem parametrelerinin hesaplanması ve aktif fayların detaylı izlenebilmesi açısından önemlidir.

#### Teşekkür

Bu makalenin gelişmesinde görüşleri ile katkıda bulunan hakemlere ve Dr. Recep ÇAKIR'a teşekkür ederim.

#### 5. Kaynaklar

- Aki, K. and P. G. Richards, 1980. Quantitative Seismology, 1st ed., W. H. Freeman and Company, San Francisco, 932.
- Ali, W. and Shieh, S., 2013. Earthquake Repeat Time, Stress Drop, Type of Slip and Earthquake Magnitude, *Journal of Geology & Geosciences*, Volume 2, Issue 2, 1-8.
- Allen M., Jackson J. and Walker R., 2004. Late Cenozoic Reorganization of the Arabia-Eurasia Collision and the Comparison of Short-Term and Long-Term Deformation Rates. *Tectonics*, 23: doi:10.1029/2003TC001530.
- Arpat, E., 1977. 1975 Lice Depremi, *Yeryuvarı ve İnsan*, 15-27.

- Barka, A. and Reilinger, R., 1997. Active Tectonics of the Eastern Mediterranean Region: Deduced from GPS, Neotectonic and Seismicity Data, *Annali di Geofisica*, XL **3**, 587-610.
- Baştuğ, C., 1976. Bitlis Napının Stratigrafisi ve Güneydoğu Anadolu Sütur Zonunun Evrimi, *Yeryuvarı ve İnsan*, **1/3**, 55—61.
- Bilek, S. L., Schwartz, S.Y. and DeShon, H.R., 2003. Control of Seafloor Roughness on Earthquake Rupture Behavior, *Geology*, **31**, 455—458.
- Brune, J.N. 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **75**, 4997—5009.
- Campbell, K.W., 2003a. Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method: Example Application to Eastern North America, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 1012—1033.
- Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y., 2003b. Updated Near-Source Ground Motion, Attenuation Relations for the Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceleration Response Spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 314—331.
- Carena, S. and Suppe, J., 2002. Three-dimensional imaging of active structures using earthquake aftershocks: the Northridge thrust, California, *Journal of Structural Geology*, **24**, 887—904.
- Emre, Ö., Duman, T., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Active fault map of Turkey with and explanatory text. *Special Publication Series*, **30**, General Directorate of Mineral Research and Exploration.
- Eyidoğan, H., 2020. *bilimvegelecek.com.tr*, 3 Aralık-2020 Kurtalan-Siirt Depremi Mw 5.0 Türkiye'nin Doğusunda Tektonik Sıkışmanın Canlı Olduğunu Gösteriyor.
- Eyidoğan, H., 1983. Bitlis-Zağros bindirme ve kıvrımlı kuşağının sismotektonik özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, 112.
- Gomberg, J.S. and Ellis, M.A., 1994. Topography and tectonics of the central New Madrid Seismic zone: results of numerical experiments using a three-dimensional boundary-element program, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 20, 299—310.
- Hall, R., 1976. Ophiolite emplacement and the evolution of the Taurus suture zone, southeastern Turkey: *Geological Society of America Bulletin*, v. **87**, 1078—1088.
- Haney, M.M., Power, J., West, M., Michaels, P., 2012. Causal Instrument Corrections for Short-Period and Broadband Seismometers, *Seismological Research Letters*, Volume **83**, Number 5, 834-845.
- Hardebeck J.L. and Shearer P.M., 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms. *Bulletin of Seismological Society of America*, 92:2264—2276. <https://doi.org/10.1785/0120010200>.
- Hardebeck J.L. and Shearer P.M., 2003. Using S/P Amplitude Ratios to constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93**, 2434—2444.
- Hsu, S. K. and Sibuet, J.C., 1995. Is Taiwan the result of arc-continent or arc-arc collision? *Earth Planetary Science Letters*, **136**, 315—324.
- İmamoğlu, M.Ş. ve Çetin, E., 2007. Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Yakın Yöresinin Depremselliği, *D.Ü.Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*, **9**, 93-103.
- Jackson, J. and McKenzie, D., 1984. Active tectonics of the Alpine- Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, **77**, 185—264.
- Janutyte, I. and Lindholm, C., 2017. Earthquake source mechanisms in onshore and offshore Nordland, northern Norway. *Norwegian Journal of Geology* **97**, 227—239.
- Klein, F., 2014. User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes, *United States Department of the Interior Geological Survey*, Open File Report 02-171 revised June 2014, Version 1.40.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995. Modern Global Seismology, Volume 58, Academic Press, San Diego. 1st Edition, 536.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C., 1972. HYPO71: a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, USGS Numbered Series, Open-File Report, 72-224, 10.3133/ofr72224.
- Lees, J.M., 2012. Open and Free: Software and Scientific Reproducibility, opinion, *Seismological Research Letters*, Vol. **83**, 751-752.
- McClusky, S., Balassanian, S., Barka, A., Demir, C., Georgiev, I., Hamburger, M., Hurst, K., Kahle, H., Kastens, K., Kekelidze, G., King, R., Kotzev, V., Lenk, O., Mahmoud, S., Mishin, A., Nadariya, M., Ouzounis, A.,



- Paradis, D., Peter, Y., Prilepi, M., Reilinger, R., Sanli, I., Seeger, H., Tealeb, A., Toksoz, M.N., Veis, G., 2000. GPS Constraints on Crustal Movements and Deformations in the Eastern Mediterranean, 1988-1997: Implications for Plate Dynamics, *Journal of Geophysical Research*, Vol. **105**, No.B3, 5695-5719.
- McKenzie, D.P., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region, *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **30**, 109-185.
- McQuarrie, N., Stock, J.M., Verdel, C. & Wernicke, B.P., 2003. Cenozoic evolution of Neotethys and implications for the causes of plate motions, *Geophysical Research Letters*, **30**, doi:10.1029/2003GL017992.
- Morley, C., 2009. Geometry of an oblique thrust fault zone in a deepwater fold belt from 3D seismic data, *Journal of Structural Geology*, **31**, 1540-1555.
- Okay, A.I., Zattin, M. and Cavazza, W., 2010. Apatite fission-track data for the Miocene Arabia-Eurasia collision, *Geology*, v. **38**, 35-38, <https://doi.org/10.1130/G30234.1>.
- Ottmoller V. and Havskov J., 2017. SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacSx.
- Perinçek, D. ve Kozlu, H., 1983. Stratigraphy and structural relations of the units in the Afşin-Elbistan-Doğanşar region (Eastern Taurus) In Tekeli, O. and Göncüoğlu, M.C. (eds), *Geology of the Taurus Belt*. Ankara-Turkey, 181-197.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D., 1985. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 85-739, 109 Pp.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., Arrajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G., 2006. GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions, *Journal of Geophysical Research*, **111**, B05411, doi: 10.1029/2005JB004051, 1-26.
- Rowley, D.B., 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data: *Earth and Planetary Science Letters*, v. **145**, 1-13.
- Rundquist, D. V., and Sobolev, P.O., 2002. Seismicity of mid oceanic ridges and its geodynamic implications: a review. *Earth-Science Reviewer*. **58**, 143-161.
- Scholz, J.-R., Barruol, G., Fontaine, F. R., Sigloch, K., Crawford, W. C., Deen, M., 2016. Orienting Ocean-Bottom Seismometers from P-wave and Rayleigh wave Polarizations, *Geophysical Journal International*, **208**, 1277-1289.
- Seyitoğlu G., Esat K. and Kaypak B., 2017. The neotectonics of southeast Turkey, northern Syria and Iraq: the internal structure of the South East Anatolian Wedge and its relationship with the recent earthquakes. *Turkish Journal of Earth Sciences*, **26**, 105-126.
- Seyitoğlu G, Esat K, Kaypak B, Tooric M, Aktuğ B., 2018. The Neotectonics of Eastern Turkey, Northwest Iran, Armenia, Nahçıvan and Southern Azerbaijan: the rhomboidal cell model in the internal deformation of Turkish – Iranian Plateau. In: *71st Geological Congress of Turkey Proceedings*, 661-664.
- Seyitoğlu, G., 2020. 2020.12.03 (Mw=5.0) Kurtalan (Siirt) depreminin kaynağı üzerine bir tartışma, *Technical Report*, Ankara Üniversitesi.
- Seyitoğlu G., Esat K., Kaypak B., Toori M., Aktuğ B. 2019. Internal deformation of the Turkish-Iranian Plateau in the hinterland of Bitlis-Zagros Suture Zone. In: *Tectonic and Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt* (Ed. Farzipour Saein, A.) Elsevier, 161-244. ISBN: 978-0-12-815048-1.
- Soysal, H., Sipahioğlu, S., Koçak, D., Altınok, Y., 1981. Türkiye ve çevresinin tarihsel deprem kataloğu , MÖ 2100-MS 1900. TÜBİTAK, Proje No. TBAG 314, 87s., Ankara.
- Stacy, S., Gombert, J. and Cocco, M., 2005. Introduction to special section: stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard, *Journal of Geophysical Research*, **110**, B05S01.
- Scherbaum, F., Johnson, J., 1992. Programmable Interactive Toolbox For Seismology Analysis. IASPEI Software Library, *Bulletin of Seismological Society of America*, **5**, 269.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Boray, A., 1987. Türkiye'nin diri fayları ve depremsellikleri, *MTA Derleme* No:8174, 394, 136, 269-282.
- Şengör, A.M.C., Görür, N. and Şaroğlu, F., 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study, in *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*, edited by K. T. Biddle and N. Christie-Blick, *Society of*

- Economic Paleontologists and Mineralogists (Tulsa)*, Sp. Publ. **37**, 227–264.
- Şengör, A.M.C., 1980. Türkiye'nin Neotektoniğinin Esasları, *Türkiye Jeoloji Konferanslar Serisi Yayınları* No: **2**.
- Şengör, A.M.C. and Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach, *Tectonophysics*, c. **75**, s. 81-241.
- Toda, S., Stein, R.S., Sevilgen, V. and Lin, J., 2011. Coulomb 3.3 Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching—*user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1060*, 63 p., available at <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1060/>.
- Yılmaz, Y., 1993. New evidence and model on the evolution of the southeast Anatolian orogen. *Geological Society of American Bulletin*, **105**: 251-271.
- Yılmaz, Y., Genç, S., Gürer, Ö.F., Bozcu, M., Yılmaz, K., Karacık, Z., Altunkaynak, S. and Elmas, A., 2000. When did Western Anatolian Grabens Begin to Develop? In: Bozkurt, E., Winchester, J.A., Piper, J.D.A. (Eds.), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*, *Geological Society of London, Spec. Publ.*, 353–384.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of Seismological Society of America*, **84(4)**, 974-1002.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F., 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. American Geophysical Union*, vol. **79** 47, 579.
- İnternet kaynakları**
- 1-<https://tdvms.afad.gov.tr> (15.12.2020)
  - 2-<https://depem.afad.gov.tr/sondepremler> (15.12.2020)
  3. <http://seisan.info/> (15.12.2020)

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 057201 (1223-1230)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 057201 (1223-1230)

DOI: 10.35414/akufemubid.888652

Araştırma Makalesi / Research Article

# İHA Yardımcı İniş Sisteminin Meta-Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri ile Kontrolü

Serkan ÇAŞKA<sup>1</sup>, Ali UYSAL<sup>2</sup>

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Turgutlu, Manisa

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Turgutlu, Manisa

\*Sorumlu yazar e-posta: serkan.caska@cbu.edu.tr,  
ali.uysal@cbu.edu.trORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-8931>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4850-3865>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 21.10.2021

## Öz

Dikey iniş/kalkış yapabilen tip insansız hava aracı(İHA) bir zemine inerken, İHA'nın GPS hassasiyetinin düşük olması ve şasisindeki titreşim nedeniyle hedeflenen iniş noktası ile gerçek iniş noktası arasında yatay düzlemde bir miktar hata oluşur. Bu çalışmada, İHA'nın yatay düzlemde iniş yapması sırasında meydana gelen konumlandırma hatasına göre hareket eden bir sistemin kontrolü yapılmıştır. İHA'nın hedef iniş noktasına göre konumunu algılamak için iki dijital kamera içeren bir stereo kamera sistemi kullanılmıştır. İHA'nın gerçek zamanlı konumu, Visual Studio'ya entegre edilmiş olan OpenCV kütüphanesi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen İHA konumu, yatay düzlemde hareket edebilen bir platformun doğru akım motorları için hedef konum olarak kullanılmıştır. Sistem üzerinde yapılan denemeler kapalı mekanda ve gerçek çalışma koşullarında sağlanmıştır. İniş sistemine entegre edilmiş iki motoru kontrol eden orantı, integral ve türev(PID) tipi denetleyici katsayılarını bulmak için Genetik Algoritma(GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu(PSO) yöntemleri kullanılmıştır. Geliştirilen denetleyicilerin performans sonuçları tablo halinde sunulmuştur.

### Anahtar kelimeler

İnsansız Hava Aracı;  
Parçacık sürüsü  
optimizasyonu;  
Genetik algoritma; PID  
kontrolör

## Control of UAV Auxiliary Landing System with Meta-Heuristic Optimization Methods

### Abstract

While an unmanned aerial vehicle(UAV) with vertical take off and landing capability is landing onto a ground, a horizontal positioning error occurs between actual landing point and target landing point. This error occurs because of vibration on UAV chasis during flight and low GPS accuracy. In this study, control of an automatic assistive landing system that moves according to the horizontal positioning error that UAV made during its landing was carried out. A stereo camera system with two digital cameras were placed onto a moving platform that UAV lands. Cameras were used to detect actual position of the landing UAV. Real time position of landing UAV was computed by using OpenCV library added into Visual Studio. The calculated position of the landing UAV was defined as target position for two DC motors of moving platform that has horizontal motion capability. The tests of this system were performed in real and indoor conditions. Genetic algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm were used to calculate the coefficients of controllers that were defined as Proportional-Integral-Derivative(PID) controllers. Developed controllers control two DC motors of the moving plate of the system. Success of the controllers were compared in table form.

### Keywords

Unmanned Aerial  
Vehicle; Particle swarm  
optimization; Genetic  
algorithm; PID  
controller

### 1. Giriş

Literatürde, dikey iniş kalkış yapabilen bir İHA'yı havada yakalama, yere indirme ve şarj etme konusunu ele alan birkaç çalışma bulunmaktadır

(Choi *et al.* 2016). Bu tür çalışmalar son 10 yılda yaygınlaşmıştır ve temel olarak İHA tabanlı ve İHA iniş platformu tabanlı yazılımsal ve donanımsal çözümler olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Feng *et al.*

2018). İHA iniş platformu tabanlı çözümler özellikle rüzgar gibi inişi zorlaştıran dış etkenlere karşı etkili bir çözüm olarak önerilmektedir ve iniş sonrası İHA bataryasının şarj edilmesi gibi süreçleri kolaylaştırmaktadır (Junaid *et al.* 2017). İHA'ların Maier vd. (2015) iniş yüzeyine sabitlenmiş bir seri robot manipülatör içeren bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Böyle bir iniş sistemini model bazlı denetleyici yaklaşımları kullanarak kontrol edebilmek için öncelikle dinamik yapısının tanımlanması gerekir. Sistem tanımlama yaklaşımları, dinamik sistemlerin yapısını tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Wills *et al.* 2009).

PID denetim algoritması, mekatronik sistemleri kontrol etmek için oldukça tercih edilen geleneksel kontrol algoritmalarından biridir. Literatürde, PID ve PID tabanlı hibrit kontrolörlerle gerçekleştirilen birçok uygulama vardır (Rao *et al.* 2014). Kontrol uygulamalarında çoğunlukla gelişmiş kontrolörler kullanılsa da PID kontrolörler basit yapısından ve kolay uygulanabildiğinden dolayı özellikle endüstriyel alanda birçok uygulamada tercih edilmektedir (Çınar vd. 2019). Bununla birlikte PID parametrelerinin deneme yanılma yöntemiyle ayarlanması zaman kaybına sebep olmaktadır. Ayrıca parametreleri deneme yanılma yöntemiyle belirlenen kontrolörler optimal bir çalışma karakteristiği sunmamaktadır.

PID denetleyicilerin katsayılarının tahmin edilmesi, optimal kontrol konsepti altında tanımlanabilir (Nezhad Hosein *et al.* 2015). Son yıllarda yapay zeka temelli optimal kontrol yaklaşımları birçok çalışmada kullanılmaktadır (Modares and Sistani 2011). Denetleyicilerin yapısını tahmin etmek için özellikle meta-sezgisel algoritmalar tercih edilmektedir (Abo-Hammour *et al.* 2011).

Genetik algoritmalar, temel meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından biridir ve literatürde birçok kontrol sisteminin yapısını belirlemek için kullanılmıştır (Jayachitra and Vinodha 2014). Genetik algoritmalar yönteminin kontrol uygulamalarında tercih edilmesinin başlıca sebebi yapısının basit ve kontrol alanında uzun

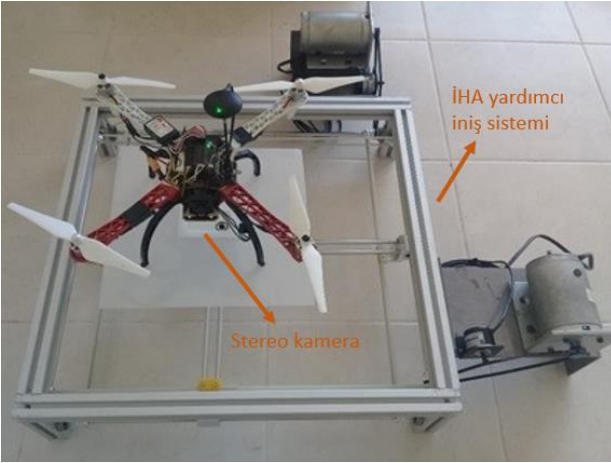
yıllardır başarıyla kullanılıyor olmasıdır. Kontrol uygulamalarında başarıyla kullanılan bir diğer algoritma da PSO'dur. PSO algoritması birçok dinamik sistemin modellenmesinde ve bu sistemlere kontrolör tasarlanmasında kullanılmıştır (Mukhtar *et al.* 2019).

Bu çalışmada, dikey iniş kalkış yapabilen İHA'lar için bir yardımcı iniş platformunun tasarımı ve optimum kontrolü sunulmuştur. Hedef İHA'nın konumunu izlemek için bir stereo kamera sistemi kullanılmıştır. İHA'nın gerçek zamanlı konumu, Visual Studio ortamında OpenCV kütüphanesi kullanılarak elde edilmiştir. İHA'nın konum bilgisi, iki ekseninde yatay hareket yapabilen bir platform için hedef konum olarak tanımlanmıştır. Platformun iki ekseninin hareketini temsil eden dinamik modeller Matlab yazılımının Sistem Tanımlama Araç Kutusu kullanılarak elde edilmiştir. Genetik algoritma (GA) ve Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) algoritması, platformun iki fırçalı DC motoru için geliştirilen PID denetleyicilerin katsayılarını bulmak için kullanılmıştır. Platformun hareketi, Waijung Blockset üzerinden Matlab - Simulink yazılımına bağlanan STM32F4 mikrodenetleyici aracılığıyla gerçek çalışma koşullarında ve kapalı mekanda sağlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

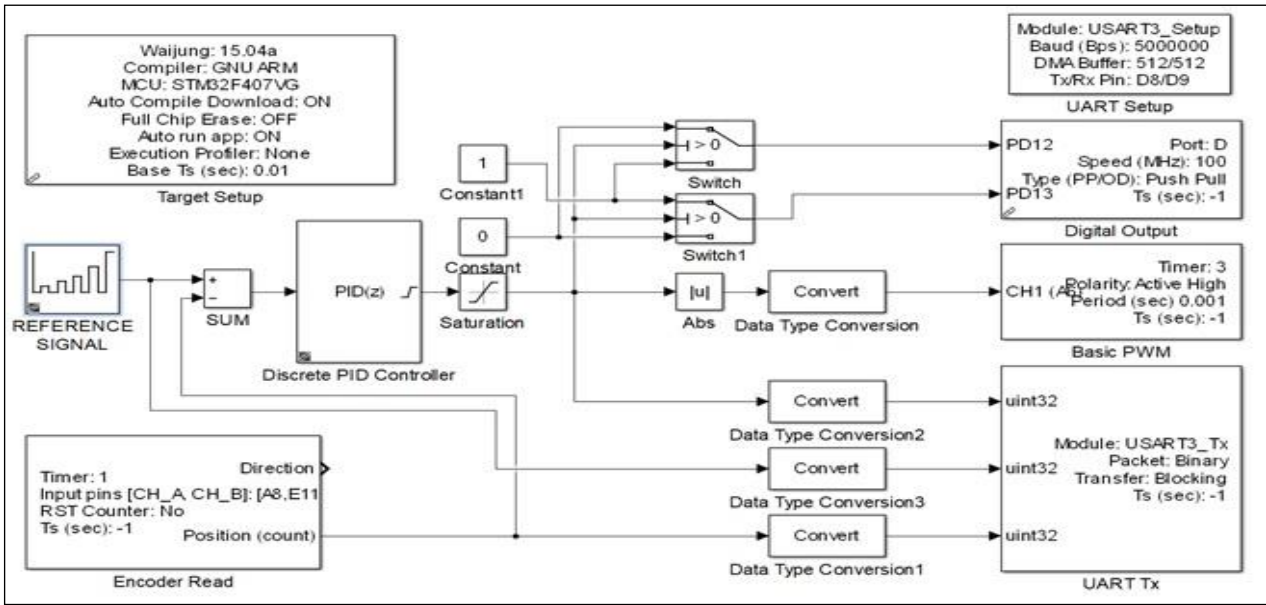
### 2.1 İniş sisteminin çalışma prensibi

Bu çalışma kapsamında tasarlanan ve kontrol edilen platform, dikey iniş kalkış yapabilen tip bir İHA'nın hareketlerine göre yatay düzlemde hareket edebilmektedir. Lineer mekanizmaların X ve Y ekseninde hareketini sağlamak için 24 V çalışma voltajına ve 250 W güce sahip iki adet fırçalı DC motor kullanılmıştır. İHA, kumanda kullanılarak manuel olarak platforma yönlendirilmiştir. Tasarlanan sistemin genel görünümü Şekil 1'deki gibidir.



Şekil 1. İHA iniş sistem sisteminin genel görünümü

Bu çalışmada, stereo görüş sistemi olarak iki adet dijital kamera kullanılmış ve hedef İHA'nın yatay hareketini tespit etmek için taşıyıcı plaka üzerine yerleştirilmiştir. Stereo kamera gerçek zamanlı görsel verileri bir bilgisayara aktarmaktadır. İHA'nın konumu Simulink ortamında çalışan Waijung blok seti aracılığıyla mikrodenetleyiciye gönderilmektedir. Platformun taşıyıcı plakasının gerçek zamanlı konum verilerini tespit etmek için enkoder kullanılmıştır. Simulink'te kurulan kontrol yapısı Şekil 2'de verilmektedir.

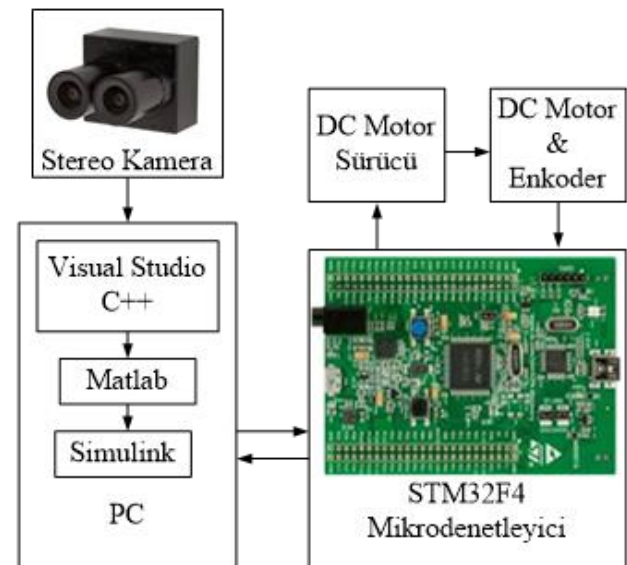


Şekil 2. Simulink kontrol blokları

DC motorları hedef konum verilerine göre kontrol etmek için STM32f4 tipi mikro denetleyici kullanılmıştır. Geliştirilen sistemin veri akışı çerçevesi Şekil 3'te verilmiştir.

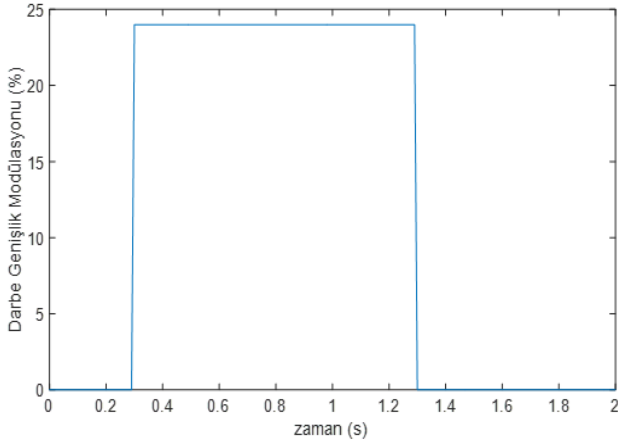
## 2.2 Sistem modelleme ve kontrolör tasarımı

Bir sistem için kontrolörler geliştirmeden önce, sistemin dinamik davranışı matematiksel bir model olarak tanımlanmalıdır. Matlab'ın sistem tanımlama araç kutusu, literatürdeki birçok uygulamada sistemlerin modelini tanımlamak için başarıyla kullanılmıştır.



Şekil 3. Sistem bileşenleri arasındaki veri akışı

Bu çalışmada, İHA iniş platformunun iki eksenine ait ayrı zamanlı z-domeni modellerini elde etmek için Matlab Sistem Tanımlama Araç Kutusu kullanılmıştır. Şekil 4'te verilen zaman bölgesinde tanımlı giriş sinyali, İHA iniş sisteminin iki eksenini kontrol eden fırçalı DC motor sürücülerine uygulanmıştır.



Şekil 4. Motor sürücülerine uygulanan zaman bölgesine ait giriş işareti

Waijung blok seti, DC motor sürücülerine giriş verilerini göndermek ve sistemin X ve Y eksenindeki doğrusal mekanizmaların çıkış verilerini almak için kullanılmıştır. Platformun X eksenini için 0.998 R-kare değeri ve Y eksenini için 0.997 R-kare değeri ile iki dinamik model elde edilmiştir. X ve Y ekseninin dinamik modelleri Denklem 1 ve Denklem 2'de verilmiştir.

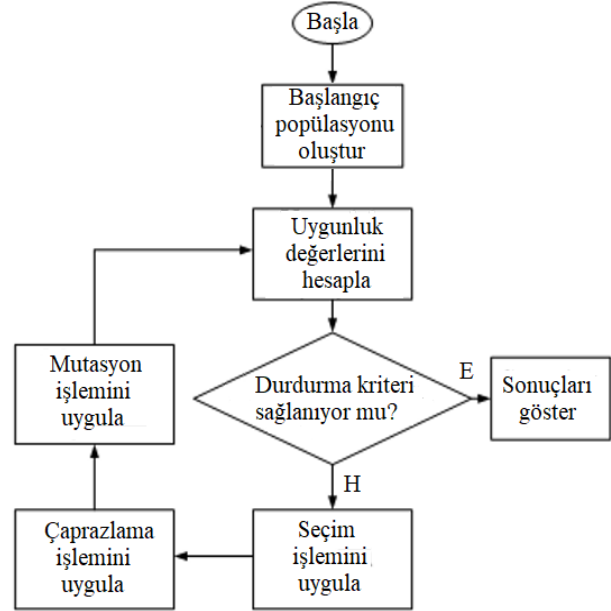
$$0.3454z^2 = z^2 - 1.9677z + 0.9677 \quad (1)$$

$$0.3459z^2 = z^2 - 1.9680z + 0.9680 \quad (2)$$

### 2.3 GA yönteminin yapısı, çalışma prensibi ve akış diyagramı

Bu çalışmada, platformun iki eksenine takılmış DC motorları kontrol eden optimal PID katsayılarını elde etmek için GA yöntemi kullanılmıştır. GA prosedürü, kromozom popülasyonunun oluşturulmasıyla başlamaktadır. Kromozomlar, aday çözümleri temsil etmektedir ve başlangıçta rastgele seçilmektedir. Kromozomlar, genler olarak adlandırılan bitlerden oluşturulur. GA prosedüründe, kromozomların mutasyonunu gerçekleştirmek için mutasyon operatörü kullanılırken, doğal çoğalmayı sağlamak için çaprazlama operatör kullanılmaktadır.

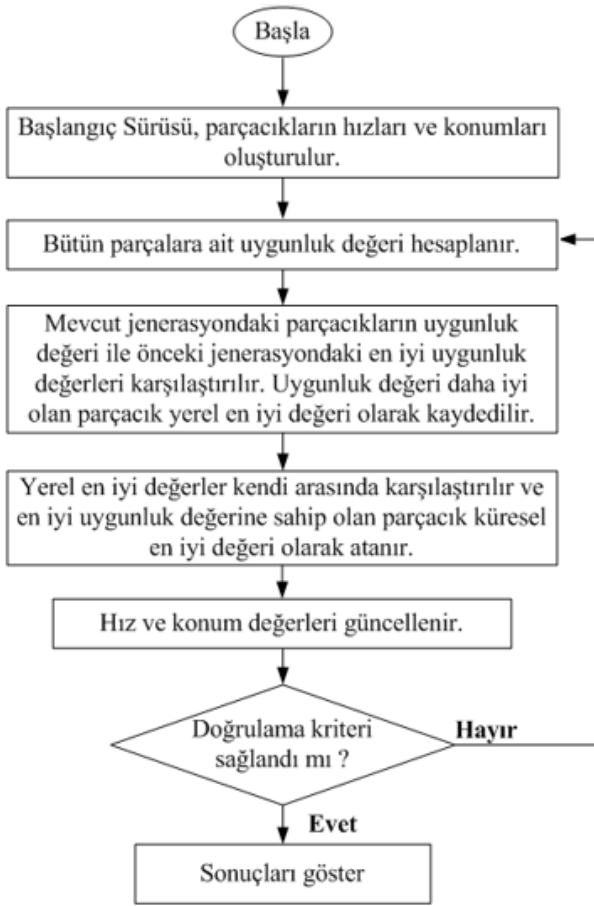
Oluşturulan kromozomlardan uygunluk değeri daha iyi olanlarının optimizasyon sürecine katkısını artırmak için kromozomlara seçim işlemi uygulanır. Bu çalışmada, GA prosedüründe tek noktalı çaprazlama, elitist seçim ve %10 mutasyon oranı kullanılmıştır. GA optimizasyon sürecinin akış diyagramı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. GA yöntemine ait akış diyagramı

### 2.4 PSO yönteminin yapısı, çalışma prensibi ve akış diyagramı

Bu çalışmada, GA yönteminin yanında meta-sezgisel algoritmalarından olan PSO algoritması da geliştirilen sistem üzerindeki motorların kontrolörlerinin tasarlanmasında kullanılmıştır. PSO algoritması, kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışları dikkate alınarak 1995 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritmanın çalışma mantığı balık ve kuş sürülerinin yiyecek veya yuva bulmak için bir alanı incelemesine dayalıdır. PSO algoritmasında kullanılan sürü içerisindeki her bir elemana parçacık denir. PSO'ya ait işlemlerden oluşan akış diyagramı Şekil 6 'da verilmiştir. Bu çalışma kapsamında PSO algoritmasında kullanılan parametreler Çizelge 1'de görüldüğü gibidir.



Şekil 6. PSO yöntemine ait akış diyagramı

Çizelge 1. PSO yöntemine ait parametreler

Parametre ismi	Parametre değeri
Sürü büyüklüğü	30
Hızlanma katsayıları	1
Eylemsizlik momenti	0.9

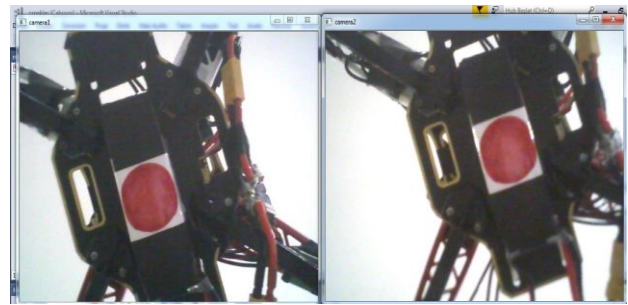
Bir optimizasyon prosedüründeki her yinelemede bulunan çözümün uygunluğunu hesaplamak için kullanılan fonksiyona uygunluk fonksiyonu denir. Bu çalışmadaki optimizasyon sürecinin uygunluk fonksiyonunu elde etmek için referans sinyal ile sistemin tepkisi arasında oluşan hata dikkate alınmıştır ve literatürde IAE olarak geçen mutlak hatanın integrali ve MO(maksimum aşma) değerleri kullanılmıştır (Kealy and O'Dwyer 2003). Hem GA hem de PSO iletiminde, PID kontrolör parametreleri olan  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  [0 5] aralığında aranmıştır.

Uygunluk fonksiyonunun formülasyonu Denklem 3'te verildiği gibidir.

$$UF = IAE + 0.1 * MO \quad (3)$$

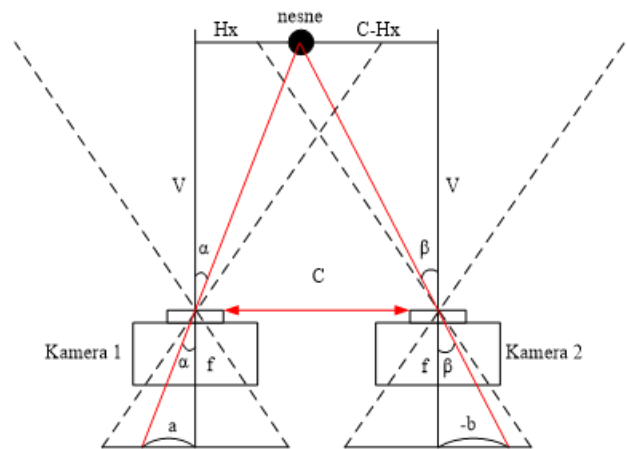
## 2.5 Görüntü işleme ve OpenCV

Bu çalışmada hedef İHA'nın tespiti için iki dijital kameradan oluşan bir stereo kamera sistemi kullanılmıştır. Her iki kamera da 640x480 piksel çözünürlüğe ve 10 mm odak uzunluğuna sahiptir. İHA'nın stereo kameralarla algılanmasını sağlamak için İHA'nın altına Şekil 7'de gösterilen kırmızı bir işaret yerleştirilmiştir.



Şekil 7. İHA'nın altına yerleştirilmiş işaret

Stereo kameralar, taşıyıcı plakanın ortasında yerleştirilmiştir. İHA ile hareket ettirici plakanın merkezi arasındaki yatay mesafe geometrik bir hesaplama ile elde edilmiştir. Hedef İHA'nın konumunu veren formül üçgen benzerliği kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 8'de stereo kamera sisteminin yapısı verilmiştir.



Şekil 8. Stereo kamera sistemi şeması



İHA ile hareket ettirici plaka merkezi arasındaki dikey ve yatay mesafelerin hesaplanmasında kullanılan parametrelerden C iki kamera lensi arasındaki mesafeyi, f kameraların odak uzunluğunu, a sol kamera tarafından çekilen dijital görüntünün sol kameranın merkezine olan uzaklığını, b sağ kamera tarafından çekilen dijital görüntünün sağ kameranın merkezine olan uzaklığını, V İHA'nın kameralara dik mesafesini, Hx Kamera 1'in merkezi ile hedef İHA arasındaki yatay mesafeyi ifade etmektedir. Şekil 8 üzerinden elde edilen büyüklükler ve geometri bilgisi kullanılarak Denklem 4 ve Denklem 5 elde edilmiştir.

$$\frac{a}{Hx} = \frac{f}{V} \text{ ve } V = f * \left(\frac{Hx}{a}\right) \quad (4)$$

$$\frac{-b}{(C-Hx)} = \frac{f}{V} \text{ ve } V = f * ((C - Hx)/-b) \quad (5)$$

Denklem 4 ve Denklem 5'teki V değerlerini eşitleyerek, Kamera 1'in merkezi ile hedef İHA arasındaki yatay mesafe Denklem 6'daki gibi hesaplanır:

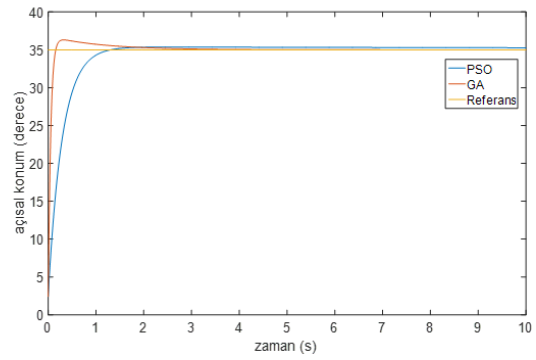
$$Hx = C * \frac{a}{a-b} \quad (6)$$

Hy, Kamera 1'in merkezi ile hedef İHA arasındaki y eksenindeki yatay mesafedir. Hy de Hx hesaplamasında kullanılan geometrik yaklaşımla hesaplanmıştır. Kamera 1 veya kamera 2'nin merkezi ile hedef İHA arasındaki dikey mesafeyi ifade eden V değeri Hx elde edildikten sonra hesaplanmıştır.

Stereo kamera sisteminden gelen görüntüdeki İHA üzerine yerleştirilen kırmızı renkli işaretin konumunu tespit etmek için Visual Studio ortamında, C++ ile yazılmış ve OpenCV kütüphanesi tarafından desteklenen bir yazılım kullanılmıştır. Yazılım, HSV (Ton, Doygunluk, Değer) filtresini kullanarak İHA üzerindeki işaretin konumunu tespit etmektedir. Kırmızı renkli işareti algılamak için HSV değer aralıkları H için 40-179, S için 229-255, V için 92-164 olarak seçilmiştir.

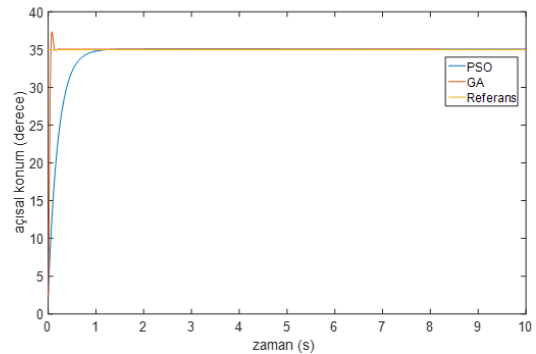
### 3. Bulgular

Simulink ortamında GA ve PSO tabanlı kontrolörler Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen dinamik modeller dikkate alınarak tasarlanmıştır. X ekseninde kontrolör parametreleri GA tabanlı PID kontrolör için Kp = 1.893, Ki = 1.656, Kd = 0.087 olarak hesaplanmıştır. PSO tabanlı PID denetleyicisi için Kp = 0.981, Ki = 0.040, Kd = 0.281 olarak hesaplanmıştır. Şekil 9'da, GA yöntemi ve PSO yöntemi ile elde edilen kontrolörlerin X eksenindeki performansı gösterilmiştir.



Şekil 9. Geliştirilen kontrolörlerin X eksenini kontrol eden motorun konum kontrolü üzerindeki başarısı

Y ekseninde ise GA tabanlı PID kontrolör için kontrolör parametreleri Kp = 1.073, Ki = 0.076, Kd = 0.014 ve PSO tabanlı PID kontrolör için Kp = 0.935, Ki = 0.011, Kd = 0.190 olarak hesaplanmıştır. Şekil 10'da, GA yöntemi ve PSO yöntemi ile elde edilen kontrolörlerin Y eksenindeki performansı gösterilmiştir.



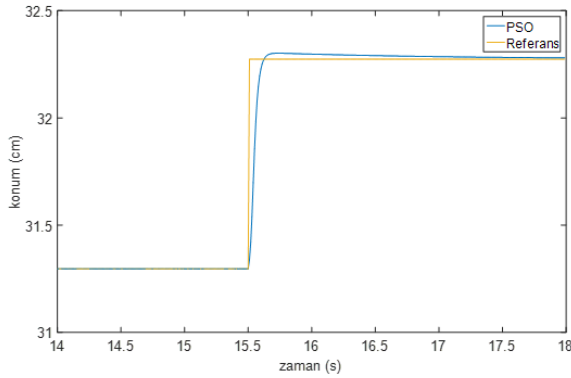
Şekil 10. Geliştirilen kontrolörlerin Y eksenini kontrol eden motorun konum kontrolü üzerindeki başarıları

Çizelge 2’de, geliştirilen kontrolörlerin başarısının ayrıntıları verilmiştir. Çizelge 2’de yer alan  $T_r$  (yükselme zamanı),  $T_p$  (tepe zamanı),  $M_p$  (tepe zamanındaki maksimum aşma),  $T_s$  (sürekli durum zamanı),  $Ess$  (sürekli durum hatası) gibi parametreler denetleyicilerin başarısına karar vermek için kullanılmıştır.

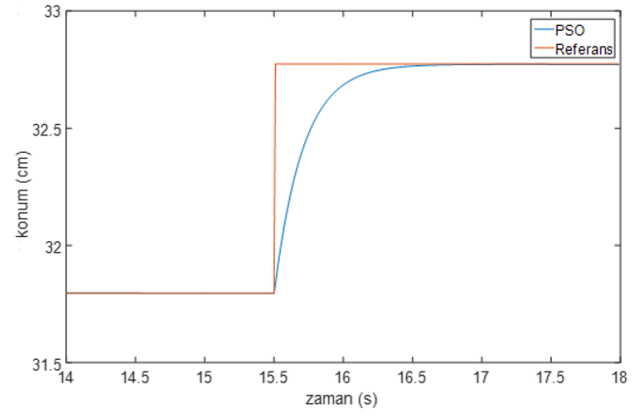
**Çizelge 2.** Geliştirilen kontrolörlere ait performans değerleri

Eksen ismi	Performans kriteri	PID-GA	PID-PSO
X	$T_r$ (s)	0.17	1.24
	$T_p$ (s)	0.31	1.82
	$M_p$ (%)	4.14	2.42
	$T_s$ (s)	4.11	4.52
	$Ess$ (%)	0.01	0.97
Y	$T_r$ (s)	0.03	1.19
	$T_p$ (s)	0.07	1.65
	$M_p$ (%)	7.03	0.03
	$T_s$ (s)	0.56	1.97
	$Ess$ (%)	0.02	0.05

Çizelge 1’de, geliştirilen kontrolörlerin sistemin X ve Y eksenlerindeki hareketi üzerindeki başarısı incelendiğinde GA tabanlı kontrolörün  $T_r$ ,  $T_p$  süre kriterlerinde ve  $Ess$  sürekli durum hatası kriterinde PSO tabanlı denetleyiciye göre daha başarılı olduğu görülmektedir.



**Şekil 11.** PSO tabanlı kontrolörün kullanılması durumunda sistemin X eksenindeki hareketi



**Şekil 12.** PSO tabanlı kontrolörün kullanılması durumunda sistemin Y eksenindeki hareketi

Bununla birlikte PSO tabanlı kontrolör  $T_s$  ve  $M_p$  kriterlerinde GA tabanlı kontrolöre göre daha başarılıdır.  $T_s$  ve  $M_p$  kriterlerinde daha başarılı olması sebebiyle ve ayrıca  $T_r$ ,  $T_p$  ve  $Ess$  kriterlerinde kabul edilebilir seviyede başarı sergilemesi sebebiyle PSO tabanlı kontrolör sistemin X ve Y eksenlerindeki hareketinin gerçek çalışma şartlarındaki uygulamalarında kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Kontrolör yapıları tespit edildikten sonra İHA iniş uygulaması gerçek koşullarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12 sırasıyla X ve Y eksenli hareketi için tasarlanmış PSO tabanlı kontrolörlerin performansını göstermektedir.

#### 4. Tartışma ve Gelecek Çalışması

Bu çalışma, bir İHA iniş sisteminin kontrolör parametrelerini GA ve PSO optimizasyon yöntemlerini kullanarak tanımlamanın mümkün olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, PSO ile hesaplanan kontrolör parametreleri, GA ile elde edilen parametrelerden daha iyi dinamik davranış sağlamıştır. Şekil 11 ve Şekil 12 incelendiğinde sistemin X ve Y eksenlerindeki dinamik davranışının farklı olduğu görülmektedir. Bu durum, bu iki eksenle hareket için kullanılan motorlar her ne kadar özdeş olsa da diğer hareket etkenleri olan kayış gerginliği ve özellikle sürtünmenin farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

İHA'nın platforma ilk teması sırasında kayma ve titreşim meydana gelmiş ve bu da İHA'nın hareket ettirici plakanın tam ortasına inmesini engellemiştir. Daha iyi iniş koşulları sağlamak için geliştirilen

sistemin mevcut haline bir İHA sabitleme parçasının eklenmesi gerektiği açıktır. Bu çalışmada, İHA'ların inişinde oluşan konum hatasını gideren ve emniyetli inişini sağlayan 2 serbestlik dereceli yardımcı bir sistem tasarlanmış ve kontrol edilmiştir. Geliştirilen sistem düz zeminde kullanılabilir. Bundan sonraki çalışmalarda eğimli zeminde bile güvenli bir iniş sağlamak için, geliştirilen iniş sistemi yapısına Stewart platformu gibi 6 serbestlik dereceli bir paralel manipülatörü entegre edilebilir.

## 5. Kaynaklar

- Abo-Hammour, Z. S., Asasfeh, A. G., Al-Smadi, A. M. and Alsmadi, O. M., 2011. A novel continuous genetic algorithm for the solution of optimal control problems, *Optimal Control Applications&Methods*, **32(4)**, 414-432
- Çınar S. M., Balcı Z. and Yabanova İ., 2019. Performing Speed Control of a DC Motor with Auto-Tuning PID, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19**, 690-696
- Choi, C.H., Jang, H.J., Lim, S.G., Lim, H.C., Cho, S.H., Gaponov, I., 2016. Automatic wireless drone charging station creating essential environment for continuous drone operation. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Control, Automation and Information Sciences*, ICCAIS 2016, Ansan, South Korea, 27-29 October,
- Feng, Y., Zhang, C., Baek, S., Rawashdeh, S. And Mohammadi, A., 2018. Autonomous Landing of a UAV on a Moving Platform Using Model Predictive Control, *Drones*, **2(4)**, 34.
- Jayachitra, A. and Vinodha, R., 2014. Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning Approach for Continuous Stirred Tank Reactor, *Advances in Artificial Intelligence*, **2014**,1-8.
- Junaid, A.B., Konoiko, A., Zweiri, Y., Sahinkaya, M.N., and Seneviratne, L. 2017. Autonomous wireless self-charging for multi-rotor unmanned aerial vehicles, *Energies*, **10(6)**, 803.
- Kealy,T. and O'Dwyer, A., 2003. Analytical ISE Calculation And Optimum Control System Design. *Proceedings of the Irish Signals and Systems Conference*, Limerick, Ireland, July, 418-423.
- Maier, M., Oeschger, A. and Kondak, K., 2015. Robot-assisted Landing of VTOL UAVs: Design and Comparison of Coupled and Decoupling Linear State-space Control Approaches. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **1(1)**, 114-121.
- Modares, H. and Naghibi-Sistani, M.-B., 2011. Solving nonlinear optimal control problems using a hybrid IPSO-SQP algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **24(3)**, 476-484
- Mukhtar, A., Tayal, V. K. and Singh, H., 2019. PSO Optimized PID Controller Design for the Process Liquid Level Control, *3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)*, Noida, India, 10-11 October, 590-593.
- Nezhadhossein, S., Heydari, A. and Ghanbari R., 2015. A Modified Hybrid Genetic Algorithm for Solving Nonlinear Optimal Control Problems, *Mathematical Problems in Engineering*, **2015**, 1-21
- Rao, P. V. G. K., Subramanyam, M. V. and Satyaprasad, K., 2014. Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques, *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, Kanyakumari, India, 10-11 July, 1411-1417
- Wills, A., Mills, A. and Ninness, B., 2009. A MATLAB Software Environment for System Identification?. *Proceedings of the 15th IFAC Symposium on System Identification*, Saint-Malo, France, 6-8 July, 741-746.

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 057202 (1231-1246)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 057202 (1231-1246)

DOI: 10.35414/akufemubid.888661

Araştırma Makalesi / Research Article

## Güney Okyanusunun Atmosfer ve Okyanus Sirkülasyonlarının Sayısal Modeller Yardımıyla İncelenmesi

Yasemin EZBER<sup>1\*</sup>, Bilge TUTAK<sup>2,3</sup>, Mehmet ILICAK<sup>1</sup><sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi ve Deniz Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, İstanbul.<sup>3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Kutup Araştırmaları Uyg-Ar Merkezi (PoLReC), İstanbul.Sorumlu yazar e-posta: ezber@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4512-685X>e-posta: tutak@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2885-9338>e-posta: milicak@itu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4777-8835>

Geliş Tarihi: 01.03.2021

Kabul Tarihi: 14.10.2021

### Öz

Bu çalışmada amacımız, Güney Okyanusu üzerindeki rüzgar dinamiklerini ve bunun okyanus devinim sirkülasyonu üzerindeki etkisini incelemektir. Bu amaçla, atmosfer ve bileşik okyanus-deniz buzu yüksek çözünürlüklü bölgesel modelleri ayrı ayrı koşturulmuştur. 2007 ve 2013 yılları arasında eşzamanlı olarak üç benzetim gerçekleştirilmiştir. İlk benzetim, gözlemlenen deniz yüzeyi sıcaklığı ve deniz buzu konsantrasyonu tarafından zorlanan sadece atmosfer bölgesel modelidir. Model, ortalama deniz seviyesi basıncı, 2 metre hava sıcaklığı, yukarı atmosfer jetleri ve Stratosferik Polar Vortex gibi önemli atmosferik özelliklerin mevsimselliğini başarıyla yakalamıştır. Model, Antarktika'daki gözlem istasyonlarıyla uyumluluk göstermektedir. İkinci benzetim, reanaliz atmosferik veri seti ile zorlanan kontrol okyanus-deniz buzu bileşik bölgesel modeldir. Okyanus modeli, deniz yüzeyi sıcaklık gradyanını doğru şekilde yakalamayı başarmıştır. Drake Geçidi'ndeki taşınım değerleri gözlemler dahilinde yaklaşık 152 Sv'dir. Son olarak, Güney Okyanusu üzerindeki bölgesel rüzgar gerilmesinin 1,5 kat arttığı bir duyarlılık benzetimi de yapılmış ve daha güçlü Drake Geçidi taşınımı ve Deacon Hücreli sirkülasyonu gözlemlenmiştir. Bu çalışma ileride gerçekleştirilebilecek Güney Okyanusu tamamen bütünleşik atmosfer-okyanus modeli geliştirilmesi için kapasite ve kabiliyetlerin ortaya konmasını sağlamıştır.

### Anahtar kelimeler

MITgcm; WRF; Güney Okyanusu; Antarktika; Modelleme

## Analysis of the Atmospheric and Oceanic Circulations of the Southern Ocean with the Help of Numerical Models

### Abstract

In this study, our aim is to investigate Southern Ocean wind dynamics and its impact on the ocean overturning circulation. To this end, we performed atmosphere and ocean-sea ice coupled regional high-resolution models separately. We conduct three concurrent simulations spanning between 2007 and 2013. The first simulation is atmosphere only regional model forced by observed sea surface temperature and sea ice concentration. The model successfully captures important atmospheric properties such as mean and seasonality of the sea level pressure, 2 meter air temperature, upper level jet, Stratospheric Polar vortex. The model compares well against the observation stations throughout the Antarctica. The second simulation is the control ocean-sea ice coupled regional model forced with reanalysis atmospheric dataset. In the ocean model, we capture the sea surface temperature gradient. The transport at the Drake Passage is around 152 Sv which is within the observation values. Finally, we conduct a sensitivity simulation where the zonal wind stress over the Southern Ocean is increased 1.5 times. This leads to stronger Drake Passage transport and Deacon Cell overturning circulation in the model. This study has provided to demonstrate the capacity and capabilities to develop a Southern Ocean integrated fully coupled atmosphere-ocean model that can be carried out in the future.

### Keywords

MITgcm; WRF; Southern Ocean; Antarctica; Modeling

## 1. Giriş

Okyanus hacminin çoğunluğunu oluşturan su kütleleri ya Güney Okyanusu'nda oluşmuş, değişmiş ya da o bölgeden geçmiştir (Sverdrup vd. 1942, Doney vd. 1998). Güney Okyanusu'ndaki orta ölçekli girdaplar (mesoscale eddies) bu bölgede oldukça önemli bir role sahiptirler. Son zamanlarda kabul edilen teoriye göre Antarktika Kutupsal Akıntısı (Antarctic Circumpolar Current-ACC) tabakalaşması ve devinim sirkülasyonu (overturning circulation) aslında orta ölçekli girdaplar ile rüzgâr yoluyla yüzeye çıkma (wind driven upwelling) arasındaki etkileşimden ibarettir (Marshall ve Radko 2003, Abernathy ve Cessi 2014). Okyanusların büyük çoğunluğunda, rüzgarlardan oluşan yatay hareket, düşük yoğunluktaki yüzey sularının kıtaların kenarlarına yığılması ile dengelenir (Veronis 1996). Bu sayede rüzgar sirkülasyonun sadece yüzeyde oluşmasına neden olur. Fakat, Güney Okyanusu'nda bazı boylamlarda kıta kenarı bulunmamaktadır. Bu bölgede esen rüzgarlar Ekman taşınımı ile kuzeye doğru yüzey akıntısı oluşturur. Bunu dengelemek için de derin okyanus akıntısının güneye akması gerekmektedir. Bu dengeye ait jeostrofik hızın boylamsal bileşeni olamaz (kıta sınırları olmadığı için), ve bu nedenle akıntıların dinamiğinde büyük bir kısıtlamaya neden olur (Hughes ve de Cuevas 2001). Kısıtlama özellikle orta ölçekli girdaplarda kendini gösterir.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC 2007) için yapılan benzetimler ve gözlemler Güney Okyanusu üstündeki batılı rüzgarların 1950'den beri kutba doğru kaydığını (poleward shift) ve şiddetlerinin arttığını göstermektedir (bakınız Şekil 1, Farneti vd. 2015). Bu değişim 21. yüzyıl iklim projeksiyonlarında da benzer şekilde devam etmektedir. Antarktika Kutupsal Akıntısı'nın (ACC) buna nasıl cevap vereceği ise belirsizdir. Bu konuda kabul edilen iki farklı teori vardır: 1) rüzgâr arttıkça Ekman taşınımı artacak ve bu etki ACC'yi hızlandıracaktır. Bu senaryoda orta ölçekli girdaplar doyum noktasında olmaları (eddy saturation) nedeniyle değişmezler, 2) diğer bir olasılık ise Ekman taşınımı artarken aynı zamanda baroklinik kararsızlıkların da artması ile birlikte girdap enerjisini arttırıp geri Ekman taşınımını bastırarak

ACC hızının değişmesini girdap dengelenmesi (eddy compensation) ile engelleyecektir (Marshall ve Radko 2003). Orta ölçekli girdapların rüzgar değişikliği altındaki davranışlarının küresel etkisi de vardır. Meridyonel devinim sirkülasyonu (Meridional Overturning Circulation, MOC) da Güney Okyanusu rüzgarlarına direk olarak bağlıdır. Bu rüzgarlar oluşacak olan soğuk ve derin su kütlelerini değiştirebilir. Bununla birlikte, bu soruyu cevaplamaya yardımcı olabilecek okyanus gözlemleri nispeten azdır. Güney Okyanusu'nun 1980'den 2010'a kadar önemli ölçüde ısındığını ve bu dönemde daha az tuzlu olduğunu gösteren gözlemler mevcuttur (Böning vd. 2008, Gille 2008, Durack ve Wijffels 2010). Ek olarak, Böning vd., (2008) kutup ve subantarktik cephe arasındaki üst 2 km'deki meridyonel izopiknik eğimlerinde çok az değişiklik olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, 30 yıl boyunca ACC hızında çok az değişiklik olduğuna işaret eder. Bununla birlikte, ACC kütle taşınım tahminleri büyük hata aralıklarına sahip olduğundan yapılan gözlemlerin doğruluğu sorgulanabilir. MOC'un nasıl değiştiği sorusunun cevabı önemlidir, çünkü MOC Güney Okyanusu'ndaki ısı ve karbondioksit alımını (uptake) etkilemektedir.

Güney Okyanusunda MOC'nin doğrudan ölçümleri olmadığından dolayı, artan bölgesel rüzgar gerilmelerinin MOC'yi nasıl etkilediğini anlayabilmek için sayısal modellerin kullanılması gerekmektedir. Bugüne kadar yapılan modelleme çalışmalarını toplam dört grup altında toplayabiliriz: 1) Quasi-Geostrophic (QG, Yarı-Jeostrofik) kanal modelleri; bunlar QG denklemlerini çözerek ACC değişimine bakmışlardır (Meredith and Hogg 2006, Hogg vd. 2008, Meredith vd. 2012). Bu modellerin temel avantajı, yüksek yerel çözünürlük kullanarak girdapları temsil etme yetenekleridir. Dezavantajı ise QG denklemlerinin iki boyutlu (enlem, boylam) olmaları nedeniyle MOC ile ilgili bilgi vermemeleridir. 2) Üç boyutlu denklemleri çözen okyanus modelleri; bunlar idealize kanal topografyasını kullanıp rüzgârı değiştirerek ACC değişimini incelemişlerdir (Henning ve Vallis 2005, Viebahn ve Eden 2010, Wolfe ve Cessi 2010). Bu modellerin temel problemi ise basit topografya bilgisi kullanılmaları nedeniyle gerçeklikten uzak olmalarıdır. 3) Bölgesel okyanus modelleri; atmosfer tarafından zorlanan yüksek çözünürlüklü okyanus ve deniz buzu

bütünleşik modelleridir. Hallberg ve Gnanadesikan (2006) 0.17 derece yatay çözünürlüklü model ile rüzgârı %20 artırıp-azaltarak girdap enerjisini incelemişlerdir. Bu tip modellerin en büyük dezavantajı ise atmosfer-okyanus etkileşimini ihmal etmeleridir. 4) Tamamen bütünleşik çalışan atmosfer, okyanus ve deniz buzu küresel modelleri; bu tür modeller çok yüksek miktarda hesaplama kaynağına ihtiyaç duydukları için yatay yersel çözünürlükleri orta ölçekli girdapları çözmede yetersiz kalır. Orta ölçekli girdaplar, düşük yersel çözünürlüğe sahip okyanus modellerinde basitleştirilmiş alt modeller kullanılarak (parametrizasyonlar) tanımlanmak zorundadır. Bu problemin çözülmesi amacıyla son yirmi yılda birçok farklı yöntem öne sürülmüştür. Bunların en önemlisi Gent ve McWilliams ya da bilinen adı ile GM (Gent and McWilliams 1990, Gent *et al.* 1995) alt modelidir. GM alt modelinde izopiknik katmanlarının açısı (slope of isopycnic layers) hesaba katılır ve bu bilgi sahte bir hız (bolus velocity) olarak kullanılır. Ancak, bu tür alt modeller MOC'nin nasıl değişeceğini hesaplamakta büyük bir belirsizlik yaratmaktadır. Bu yüzden en iyi yaklaşım hem orta ölçekli girdapları çözebilen hem de atmosfer-okyanus etkileşimini tanımlayabilen yersel bütünleşik model sistemleridir (Farnetti ve Gent 2011).

Bu çalışmadaki amacımız, bütünleşik bir atmosfer, okyanus ve deniz buzu modeli geliştirmeden önceki gerekli olan modellerin Antarktika ve Güney Okyanusu için olan performanslarını incelemek ve ayrıca iklim değişikliğinden kaynaklanan rüzgar artımı etkisini inceleyebilmektir. Bu amaçla bölgesel yüksek çözünürlüklü atmosfer ve okyanus-deniz buzu modelleri ayrı ayrı çalıştırılmış ve rüzgarın etkisini incelemek için duyarlılık benzetimleri yapılmıştır. Bölüm 2'de kullanılan modeller tanıtılmış, model alanları ve özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. 3. Bölümde atmosfer sonuçları incelenmiş ve okyanus-deniz buzu modeli ile yapılan duyarlılık benzetimleri analiz edilmiştir. Bölüm 4'te ise sonuçlar tartışılmış, gelecekteki çalışılacak konular hakkında bilgi verilmiştir.

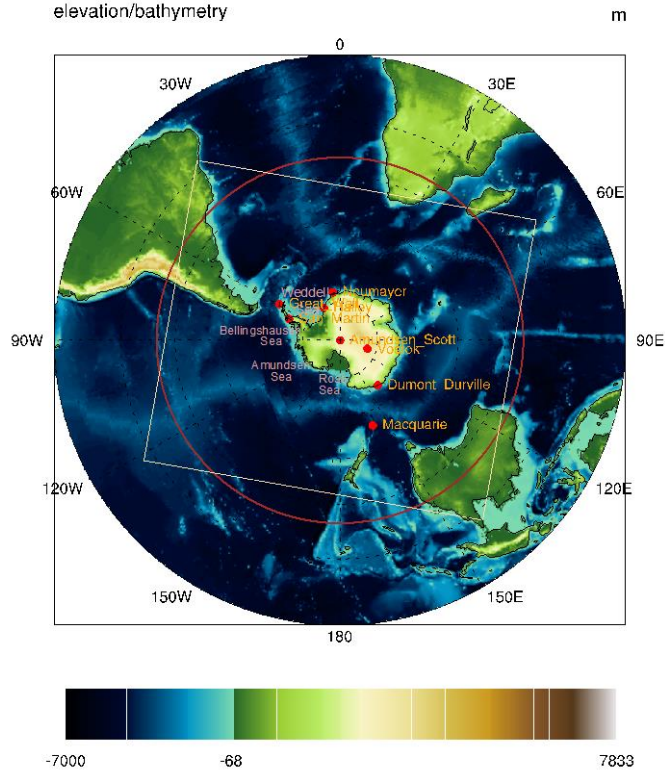
## 2. Materyal ve Metot

Güney Okyanusu'nda iklim değişikliği ile beraber yaşanacak olası değişimleri tespit etmek üzere okyanus ve atmosfer modelleri birlikte kullanılarak bir hassasiyet çalışması yürütülmüştür. Bu kısımda atmosfer ve okyanus modellerinin ayrı ayrı çalışma alanları ve kurulum detayları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

### 2.1 Atmosfer ve Okyanus Modeli Çalışma Alanları

Bu çalışmada atmosfer modeli olarak "Weather Research and Forecasting (WRF)" modeli kullanılmıştır. WRF, National Center for Atmospheric Research (NCAR) tarafından geliştirilmiş açık kaynak kodlu sıkıştırılabilir (fully compressible), hidrostatik olmayan (non-hydrostatic) bir atmosfer modelidir (Skamarock *et al.* 2008). Yatay modeli ağı olarak Arakawa-C ağı kullanırken, düşeyde ise topografyayı takip eden (terrain-following) bir ağ yapısına sahiptir. Model iç içe yuvalanmış olarak (nest) ve farklı düşey seviyelerde çalıştırılabilir. Model ayarları, sınır tabaka, kümülüs bulut, uzun dalga ve kısa dalga radyasyon ve mikrofizik parametrizasyonları için kullanıcıya oldukça geniş bir şema yelpazesi sunmaktadır. Güney Okyanusu ve Antarktika Kıtası'nın uygun bir şekilde modellenebilmesi amacıyla Atmosfer modelinin alanı kıta Antarktika'sı merkezde kalacak şekilde Şekil 1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir (sarı kare alan). Atmosfer modeli 25 km x 25 km yatay çözünürlüğe sahip, USGS (United States Geological Survey) tarafından sunulan yüzey verileri kullanılarak oluşturulan altlıkla model koşturmaları için hazırlanmıştır.

Bu çalışmada Antarktika kıtası için yapılacak benzetimlerde meteorolojik veriler ise ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) tarafından hazırlanıp servis edilen yeni veri seti ERA5'ten (C3S 2017) elde edilmiştir. ERA5 veri seti tüm dünya için 30km yatay çözünürlüğüne ve yerden 80 km'ye kadar 137 düşey seviyeye sahip, gelişmiş modelleme teknikleri ve veri asimilasyon sistemlerini gözlem verileri ile birleştirerek hazırlanmış bir veri setidir.



**Şekil 1.** Güney yarımküre topoğrafya ve batimetrisi ile gözlem istasyonlarının bulunduğu konumlar. WRF model alanı sarı kare ile, MITgcm model alanı ise kırmızı daire ile gösterilmiştir.

Çalışmada modelin analiz periyodu 2007-2013 yıllarını kapsamaktadır. Bu bağlamda modelin spin-up zamanı da göz önünde tutularak model koşurmalarında yüzey ve basınç seviyeleri için gerekli meteorolojik parametreler, ERA5 verisinden 2006 yılı Ocak ayından 2014 yılı Ocak ayına kadar olan bir periyodu kapsayacak şekilde 6 saatlik veri setleri olarak hazırlanmıştır. Bununla birlikte modelin günlük deniz suyu sıcaklığı ve deniz buzu verileri küresel olarak 0.25 derece yatay çözünürlüğe sahip Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST, NCEI 2016) verisi kullanılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 1’de verilen model ayarları, Antarktika kıtası için yapılan çalışmalar ve modeli geliştiren kurumun kutup bölgesi için tavsiye ettiği ayarlar göz önünde tutularak hazırlanmıştır.

**Çizelge 1.** Atmosfer modelinde kullanılan konfigürasyon detayları

Ayar	Ayar Değeri
Toplam Ağ Boyutu	414 x 368
Hücre Boyutları (dx, dy)	25km x 25km
Düşey Seviye Sayısı	44
Mikrofizik parametrisasyonu	WSM5
Kısa-Uzun dalga Radyasyon şemaları	Goddard, RRTMG
Bulut şeması	Kain-Fritsch
PBL şeması	MYJ
Kara yüzey şeması	Noah-LSM

Dinamik Parametrisasyon Ayarları	
	Simple diffusion
	No vertical damping
	Positive definite
	advection of moisture and scalars

Bu fiziksel ve dinamik parametrisasyonlara ilave olarak model alanı spektral nudging tekniği ile girdi olarak verilen meteorolojik durumdan uzaklaşmaması için sınırlardan zorlanmıştır. Spektral nudging (Skamarock vd. 2021) yapılmasının en önemli sebebi WRF modelinin yapılan çalışmalarda daha çok günlük, haftalık ya da aylık tahmin ya da meydana gelmiş herhangi bir meteorolojik olayın detaylı incelenmesinde tercih edilmesidir (Glisan vd 2013, Markina vd. 2018). Bir bölgesel model gibi çalıştırıldığında başlangıç-sınır şartlarından uzaklaşması model sonuçlarının istenilen ve/veya beklenen doğrulukta olmamasına neden olabilecektir. Bu durumda modelin başlangıç ve sınır şartlarından çok uzaklaşmaması için rüzgar ( $u$  ve  $v$ ), sıcaklık ve nem değişkenlerine ilk 20 seviyenin üzerinde her 6 saatte dalga sayıları (wavenumbers)  $x$  yönünde 10 ve  $y$  yönünde 9 olacak şekilde zorlama yapılmıştır. Model, 1 Ocak 2006 yılından 1 Ocak 2014 tarihine kadar sürekli koşurulmuştur.



Okyanus ve deniz buzu modeli olarak Massachusetts Institute of Technology (MIT) Üniversitesi tarafından geliştirilen MIT Genel Sirkülasyon Modeli'nin (MITgcm General Circulation Model, Adcroft *et al.* 1999) revizyon 65 sürümü kullanılmıştır. MITgcm açık kaynak, üç boyutlu, serbest yüzey ve  $z^*$  koordinatlarını kullanarak Reynolds ortalama Navier-Stokes eşitliklerini, hidrostatik ve Boussinesq kabullerini kullanarak çözen bir modeldir. Modeli oluşturan eşitlikler akı formunda olup yatay ekseninde küresel koordinatları ve düşey ekseninde kısmi  $z^*$ -koordinatlarını kullanmaktadır. Model sıcaklık, tuzluluk ve momentum için ikinci, üçüncü ve dördüncü dereceden yatay ve düşey iletim şemalarını desteklemektedir. Tanımlanan parametreler ile kullanılan alt modeller ve sayısal çözüm teknikleri değiştirilerek farklı uygulamalar için modeli özelleştirmek mümkündür. Okyanus model alanı Antarktika kıtasından 24°G enlemine kadar seçilmiştir (Şekil 1 kırmızı daire). MITgcm modeli 1/12 derece yatay çözünürlüğe sahip, batimetrisi GEBCOV1 (Becker *et al.* 2009) açık kaynak kullanılarak hazırlanmış ve model koşturmaları için hazırlanmıştır. Kuzey sınır bölgesinin 24°G enlemine kadar alınmasının nedeni hem ACC'yi iyi çözebilmek hem de deniz buzu açık sınır koşullarında oluşabilecek problemlere karşı deniz buzunun erişemeyeceği enlemlere çıkmaktır. Okyanus modeli için kullanılan yüzey sınır koşulları atmosfer modelinde de olduğu gibi ERA5 reanaliz veri seti kullanılarak koşturulmuştur. Kuzeydeki yatay sınır koşulları da The Simple Ocean Data Assimilation (SODA, Carton *et al.* 2018) okyanus reanaliz veri setinden üretilmiştir. Çalışma kapsamında modelin analiz periyodu 2007-2013 yıllarını kapsamaktadır. Zaman aralığı seçimlerinde özellikle atmosfer modeli ile aynı zaman aralığı seçilmiştir. Model çalışmasında seçilen yüksek çözünürlüğün (1/12 derece) avantajı orta ölçekli girdapları parametrize etmeye yarayan Gent-McWilliams şemasına gerek kalmadan, girdapların çözülebilesidir.

**Çizelge 2.** Okyanus model konfigürasyonu

Ayar	Ayar Değeri
Toplam Ağ Boyutu	4320 x 640
Hücre Boyutları (dx, dy)	4km x 4km
Düşey Seviye Sayısı	42
GM Thickness diffusion	Kapalı
Deniz buzu şemaları	MITgcm Seaice package
Sınır tabakası şeması	KPP
Dinamik	Implicit diffusion
Parametrizasyon	Leith Viscosity
Ayarları	7th order advection scheme

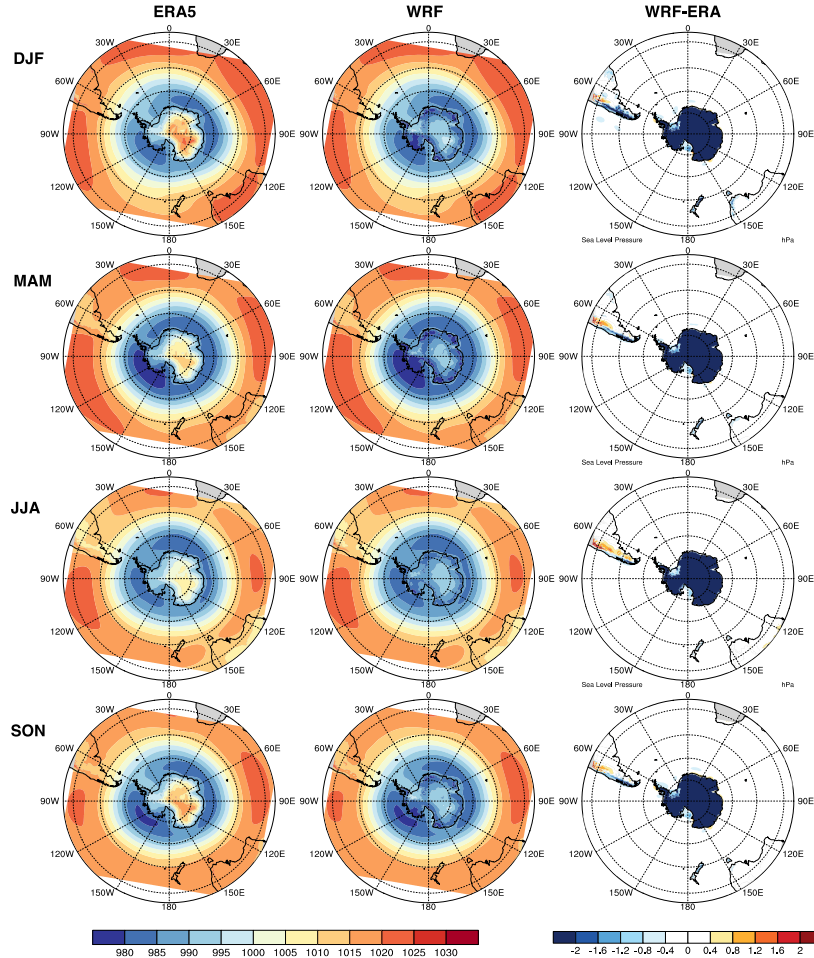
Çizelge 2'de verilen model ayarları, MITgcm modelinin kullanıldığı ve daha öncede test edilen Southern Ocean State Estimate (SOSE, Mazloff *et al.* 2010) konfigürasyonuna benzer olarak seçilmiştir. Bu fiziksel ve dinamik parametrizasyonlara ilave olarak kuzey sınırda Orlanski tipi açık sınır koşulları kullanılmıştır. Modelde herhangi bir zorlama (nudging) kullanılmamıştır. Model, 1 Ocak 2007 yılından 1 Ocak 2014 tarihine kadar sürekli olarak koşturulmuştur. Toplam iki adet farklı model benzetimi yapılmıştır. Bunlardan biri kontrol benzetimidir. Kontrol (bundan sonra Ctrl) benzetiminde açık sınır koşulları SODA okyanus reanaliz model veri setinden alınmıştır. İkinci benzetimde yatay rüzgar gerilmeleri Güney Okyanusu üzerinde 1.5 kat artırılarak duyarlılık analizi yapılmıştır.

### 3. Bulgular

#### 3.1. Atmosferik Model Bulguları

Benzetim sonuçlarını karşılaştırmak için girdi verisi olarak ERA5 verilerinin 2007-2013 yıllarını kapsayan uzun dönem mevsimsel ortalamaları ile WRF sonuçlarının mevsimsel ortalamaları alansal olarak karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte modelin koşturulduğu döneme ait gözlem verilerine sahip olan bazı istasyonlar için sıcaklık ile rüzgar yön ve hızı için zaman serisi şeklinde karşılaştırmalar da yapılmıştır.

ERA5 ile WRF benzetimleri sonucunda elde edilen deniz seviyesi basınçları karşılaştırıldığında, modelin mevcut alçak ve yüksek basınç alanlarının yerlerini tespit etmede bütün mevsimler için başarılı olduğu Şekil 2'den görülmektedir.

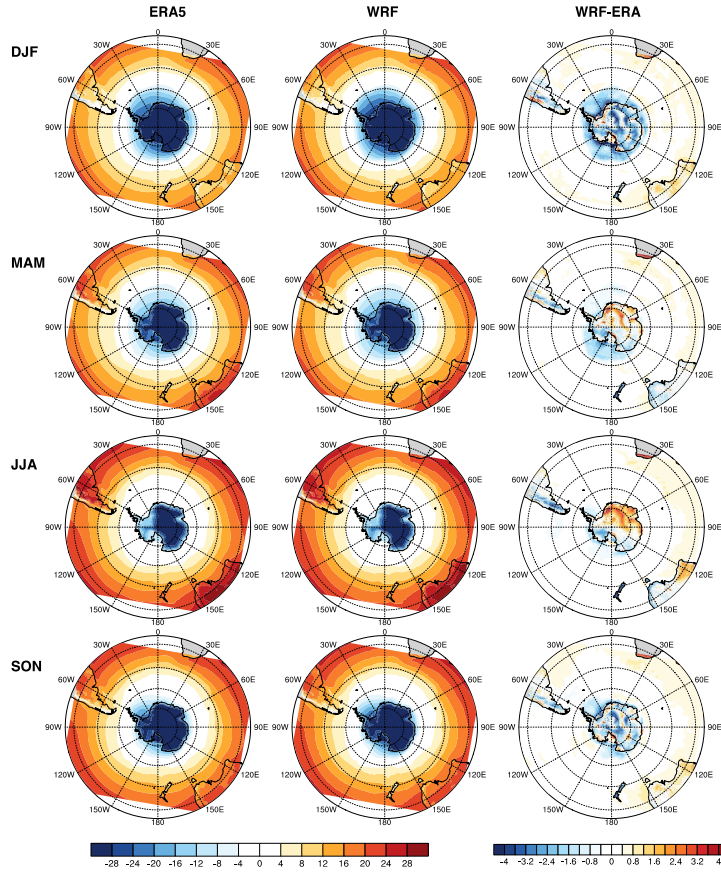


**Şekil 2.** Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) deniz seviyesi basıncının ERA5 ve WRF ve WRF ile ERA5 farkı için dağılımı.

Bellingshausen-Amundsen Denizi üzerindeki alçak basınç merkezi bütün mevsimler boyunca hem ERA5 hem de WRF için gözlemlenmektedir ve fark haritalarına bakıldığında alçak merkezin büyüklükleri için fark çok küçüktür ( $\pm 0.2$  hPa). Ancak model buz örtüsü (ice sheet) üzerinde bütün mevsimlerde daha derin bir alçak basınç merkezi (fark  $-2$  hPa üzerinde) göstermektedir. Güney Amerika'nın Pasifik Okyanusu kıyılarına komşu olan kara alanlarında ise model daha düşük basınçlar gösterirken, Avustralya üzerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir.

Model ve ERA5 reanaliz veri arasında 2 m'deki hava sıcaklıkları karşılaştırıldığında her iki veri mevsimsel olarak benzer örüntülere sahiptirler. Kıta

Antarktika'sı Güney Okyanusu'na göre hem model hem de reanaliz verisinde daha soğuktur. Her iki veri birbiri ile karşılaştırıldığında ise kış ve sonbahar (DJF ve SON) mevsimlerinde buz örtüsü üzerinde model daha düşük sıcaklık değerlerine sahiptir (Şekil 3). Bu çalışmada mevsimler Austral mevsim olarak gösterilmiştir (DJF: Austral kış, JJA: Austral yaz gibi). Yine Şekil 3'de ilkbahar ve yaz ayları için ise  $60^{\circ}B-60^{\circ}D$  alanları arasında model buz örtüsü üzerinde  $2^{\circ}C$ 'den fazla sıcaklık farkı meydana gelirken Bellingshausen-Amundsen Denizi kıyılarında  $2^{\circ}C$  daha düşük sıcaklıklara sahiptir. Kıtaların doğu kıyılarında ise modelin okyanus üzerinde en fazla  $1^{\circ}C$ 'ye kadar daha sıcak bir havaya sahip olduğu görülmektedir.

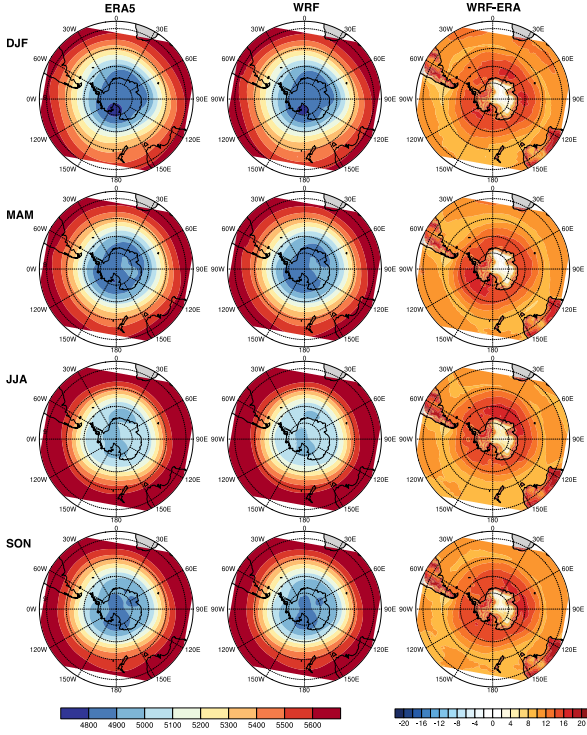


Şekil 3. Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) 2m sıcaklığı için ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Yukarı seviyede modelin nasıl bir benzetim gerçekleştirdiğini ortaya koyabilmek için 500 hPa jeopotansiyel yükseklikleri arasındaki fark incelendiğinde, genel olarak modelin daha yüksek jeopotansiyel değerlere sahip olduğu ve bu değerlerin yaklaşık 10 hPa ile 20 hPa arasında değiştiği Şekil 4'te gözlemlenmiştir. Bu değişimler bütün mevsimlerde benzer örüntüler göstermektedir. Antarktik Yarımadası dışında kalan kıtanın doğu kıyılarında ise basınç değişiklikleri 6 hPa'dan daha düşük değerlere sahiptir. Bellingshausen-Amundsen Denizi'nde görülen alçak basınç merkezi ile uyumlu olarak 500 hPa jeopotansiyel yüksekliğinde daha batıda meydana gelen oluk, yaz (güney yarımküre) mevsimi hariç bütün mevsimler boyunca gözlemlenmektedir. Ancak meydana gelen oluk sonbaharda model sonuçlarında Ross Denizi yakınlarında daha küçük bir alan üzerine yerleşmiştir.

Güney Kutbu etrafını halka şeklinde çeviren sürekli güçlü batılı rüzgarlar bandı mevcuttur. Bu kuvvetli batılı rüzgarlar yapılan benzetimlerde de elde

edilmiştir. Bu batılı rüzgar bandının kuzey-güney hareketi Southern Hemisphere Annular Mode (SAM) olarak da bilinen Antarktik Salınımının pozitif ya da negatif fazını bu da batılı rüzgar bandının güneye Antarktika'ya ya da kuzeye ekvatora doğru yer değiştirmesini göstermektedir. Birkaç hafta süren salınımın negatif fazı güçlü batılı rüzgarlar, kararsız hava ve fırtınaların Yeni Zelanda bölgesinde meydana gelmesine neden olmaktadır.

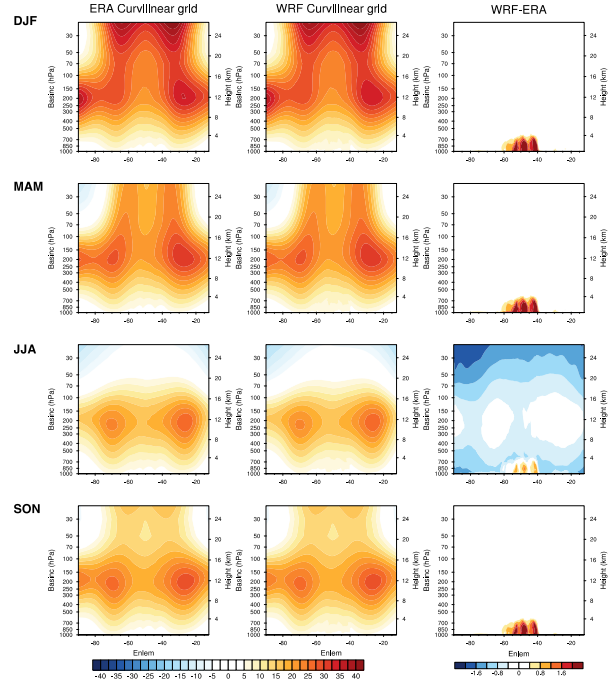


**Şekil 4.** Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) 500hPa jeopotansiyel yüksekliği için ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen benzetimlerde bütün mevsimler için meydana gelen batılı rüzgarların örüntüsü ERA5 reanaliz verisi ile karşılaştırıldığında benzerlik göstermektedir Ancak büyüklük olarak irdelendiğinde modelin genel olarak kutup dairesi etrafındaki okyanus üzerinde yaklaşık  $1 \text{ ms}^{-1}$  daha zayıf rüzgarlara sahip olduğu ve güney yarımküre kış ve sonbahar mevsimlerindeki bu rüzgar farkının yaz ve ilkbahar mevsimlerinde genel olarak  $1 \text{ ms}^{-1}$ 'nin altında olduğu görülmüştür. Kıta Antarktika'sı üzerinde ise bu farklar  $1 \text{ ms}^{-1}$ 'nin üzerinde değerlere sahiptir.

Yer seviyesi ya da belli bir basınç seviyesinde sıcaklık, rüzgar, basınç, jeopotansiyel yükseklik gibi bazı parametrelerdeki değişimin yanı sıra bazı değişkenlerin bütün atmosfer sütunu boyunca olan değişimi de önemlidir. Güney yarımküre üzerinde özellikle zonal rüzgarın değişiminin buradaki atmosferik olaylar açısından önemli olması nedeniyle zonal rüzgarın zonal ortalamasının basınç seviyelerindeki değişimi incelenmiştir. 1000 hPa-20 hPa arasındaki basınç seviyeleri boyunca model tarafından gerçekleştirilen mevsimsel zonal rüzgar

benzetimlerinin ERA5 reanaliz verisi ile benzer bir yapı gösterdiği Şekil 5'te görülmektedir.



**Şekil 5.** Güney yarımküre (austral) mevsimsel (kış-DJF; ilkbahar-MAM; yaz-JJA; sonbahar-SON) zonal rüzgarın zonal ortalamasının ERA5, WRF ve WRF ile ERA5 farkı dağılımı.

Yine Şekil5'te 200 hPa-100 hPa basınç seviyesinde güçlü batılı rüzgarların hakim olduğu jetlerin görüldüğü model sonuçları ERA5 ile benzerdir. Bu kuvvetli rüzgarların meydana geldiği enlemler polar vortex olarak ifade edilir. Polar vortex bütün mevsimler boyunca görülür. Bununla birlikte daha yukarı basınç seviyelerine baktığımızda sonbahardan ilkbahara kadar batılı rüzgarların hakim olduğu stratosferik polar vortex'de hem model hem de ERA5 analizlerinden gözlemlenmektedir. Yaz ayında herhangi bir stratosferik polar vortex'in mevcut olmadığı da Şekil 5'teki JJA dağılımından görülmektedir.

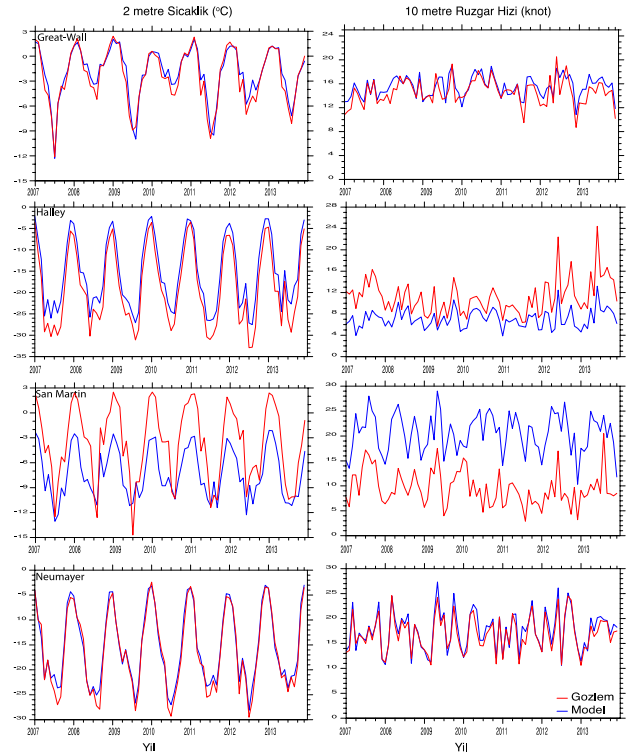
Model ve ERA5 arasındaki farklara baktığımızda iki veri arasında büyük farklar ( $1 \text{ ms}^{-1}$  üzerinde) daha çok 1000 hPa'dan 700 hPa'a kadar olan atmosfer tabakasında  $40^{\circ}\text{G}$ - $60^{\circ}\text{G}$  enlemleri arasında meydana gelmekte, model daha güçlü rüzgarlar üretmektedir. Genel olarak troposferik polar vortex'in yer aldığı seviyelerde fark yaklaşık  $0.4 \text{ ms}^{-1}$ 'dir. En büyük farkın yaz mevsiminde meydana geldiği Şekil 5'den de açıkça görülmektedir. Polar vortex'in görüldüğü 200 hPa ile 100 hPa arası hariç genel olarak model daha

düşük zonal rüzgar verileri ile benzetimi gerçekleştirmiştir. Yaz mevsiminde, model tarafından diğer mevsimlerde kuvvetli batılı rüzgarların görüldüğü 40°G-60°G enlemleri arasında düşeyde 700 hPa kadar olan tabakada görülen rüzgarların diğer mevsimlerden görece daha zayıf olduğu söylenebilir.

Model benzetimlerinin ERA5 reanaliz verileri ile karşılaştırması ilk olarak basınç, sıcaklık, rüzgar mevsimsel örüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Alansal karşılaştırmanın yanı sıra çalışmanın yapıldığı 2007-2013 tarihlerine ait, kalite kontrolü gerçekleştirilmiş gözlem verileri ile model sonuçlarını noktasal olarak karşılaştırmak için British Antarctic Survey Yüze İstasyonları (BASSM 2013) listesinde yer alan gözlem istasyonları içerisinde sekiz istasyonun sıcaklık ve rüzgar hızları zaman serisi olarak incelenmiştir. Seçilen istasyonların bulunduğu konumlar Şekil 1'de yer alan yükseklik ve batimetri haritası üzerinde görülmektedir. Sekiz gözlem istasyonuna ait model sonuçları elde edilirken istasyona en yakın ağ noktaları kullanılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7'de zaman serileri verilen istasyonların dört tanesi (Amundsen - Scott (2835 m), Vostok (3490 m), Dumont D'urville (43 m) ve Macquarie (8 m)) doğu boylamlarında diğer dört istasyon ise (Great Wall (10 m), Halley (30 m), San Martin (4 m) ve Neumayer (50 m)) batı boylamlarında yer almaktadır.

Yükseltisi daha düşük olan batı boylamlarında yer alan istasyonlara baktığımızda model sıcaklığının yıllar arası aylık salınımlarının gözlemlerle büyük uyum sağladığını söylemek mümkündür. San Martin istasyonu dışında modelin diğer istasyonlarda (Great Wall istasyonu 2009 yılı sonbahar ayları hariç) daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğu Şekil 6'dan görülmektedir. Antarktika Yarımadası'nda yer alan ve 4 m yükseltiye sahip olan San Martin istasyonunda ise model sıcaklıkları 5-6 °C daha düşüktür. Genel olarak yıllık değişimlere baktığımızda ise özellikle Haziran-Temmuz-Ağustos (güney yarımküre kışı) aylarında modelin sıcaklık benzetimlerindeki farkların daha büyük olduğu görülmektedir. Bu istasyonlar arasında modelin daha az bir farkla sıcaklık benzetimi gerçekleştirdiği istasyonlar Great Wall ve Neumayer istasyonlarıdır.

Rüzgar hızının zamansal değişimine baktığımızda ise San Martin istasyonunda model yüksek hızlara sahiptir ve gözlem ile arasındaki fark ortalama olarak 10 ms<sup>-1</sup>'in üzerindedir. 30 m topoğrafyaya sahip Halley istasyonunda ise model gözlemlere göre daha zayıf rüzgar benzetimleri gerçekleştirmektedir. Great Wall ve Neumayer istasyonlarında ise rüzgar hızlarının benzetimlerinin model tarafından oldukça başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği yine Şekil 6'dan görülmektedir.

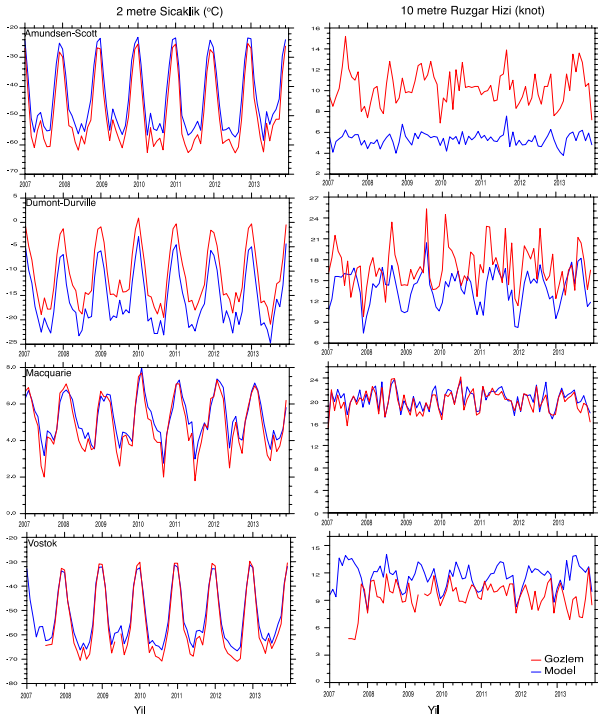


**Şekil 6.** Kıta Antarktika'sının batı bölgesinde yer alan istasyonlarda model ve gözlem sonuçlarının sıcaklık ve rüzgar hızı karşılaştırması. Mavi çizgi model kırmızı gözlem verilerini göstermektedir.

Şekil 7'de yer alan doğu boylamları üzerindeki istasyonlar incelendiğinde 43 m yükseltiye sahip Dumont D'urville istasyonunda modelin sıcaklık benzetimleri gözlemlerden daha düşük, diğer istasyonlarda ise genel olarak sıcak olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Macquarie ve Vostok istasyonlarındaki sıcaklıklarda ise hataların daha düşük olduğunu söylemek mümkündür. Yıllar arası ve mevsimsel değişimler model tarafından oldukça iyi bir şekilde temsil edilmiştir. Özellikle iki yüksek istasyon Amundsen-Scott ve Vostok istasyonlarındaki model ve gözlemin yıllar içindeki



ısınma ve soğuma periyodlarının aynı değişimlere sahip olduğu görülmektedir.



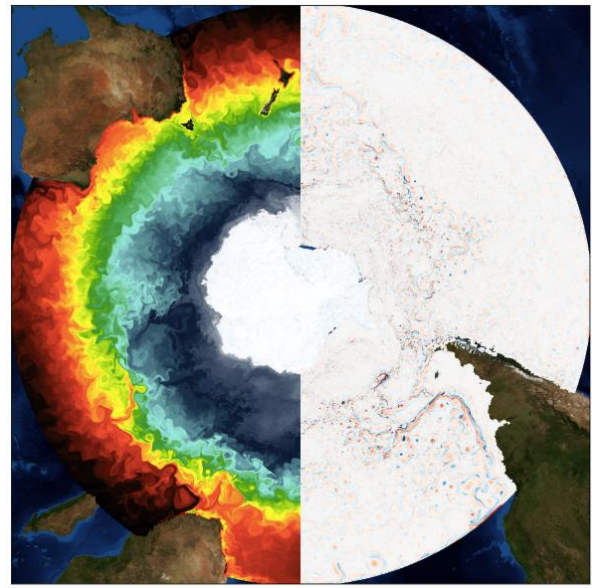
**Şekil 7.** Kıtada Antarktika'nın doğu bölgesinde yer alan istasyonlarda model ve gözlem sonuçlarının sıcaklık ve rüzgar hızı karşılaştırması. Mavi çizgi model kırmızı gözlem verilerini göstermektedir.

Rüzgar hızında ise beklendiği gibi model yüksek istasyonlarda oldukça büyük hatalar ile benzetimler gerçekleştirmiştir. Amundsen - Scott hariç diğer üç istasyon büyüklük olarak rüzgar hızında farklılıklar gösterse de genel olarak istasyonla uyumlu bir şekilde rüzgar değişimlerini (düşüş ve yükselişleri) takip edebilmektedir. Ancak burada dikkat çeken bir diğer husus modelin her iki istasyonda (Amundsen-Scott ve Vostok) benzer bir örüntü göstererek bütün benzetim periyodunda gözleme göre daha zayıf ya da daha kuvvetli rüzgarlar üretmiş olmasıdır. Bu istasyonlardan tam kutup noktasından bulunan Amundsen - Scott istasyonunda bu hızlar gözlemden  $8-10 \text{ ms}^{-1}$  daha düşük iken Vostok istasyonunda ise Amundsen - Scott istasyonuna göre görece daha az bir hata ile daha yüksek rüzgar hızları model tarafından üretilmiştir. Dumont D'urville istasyonunda da yine model gözlemlerden daha zayıf rüzgarlara sahiptir. Doğu boylamında yer alan bu dört istasyondan daha kuzeyde kıta Antarktika'sı üzerinde yer almayan ve daha düz bir topografyaya sahip Macquarie istasyonunda ise daha düşük hatalar ile model benzetiminin gerçekleştiği Şekil

7'de görülmektedir. Gözlem ve model arasında meydana gelen farklarda modelin düşük çözünürlüğünün etkisi de önem teşkil etmektedir.

### 3.2. Okyanus Modeli Bulguları

Şekil 8'de Kontrol benzetiminin (Ctrl) 15 Ocak 2008 günlük yüzey deniz sıcaklığı (SST) ile göreceli girdaplık (relative vorticity) alanları gösterilmiştir. Antarktika Kutupsal Akıntısı (ACC) üzerinde bulunan SST gradyanı başarılı bir şekilde yakalanmıştır. Ayrıca ACC üzerindeki girdaplar da şeklin sağ tarafındaki göreceli girdaplık alanında rahatça görülebilmektedir.

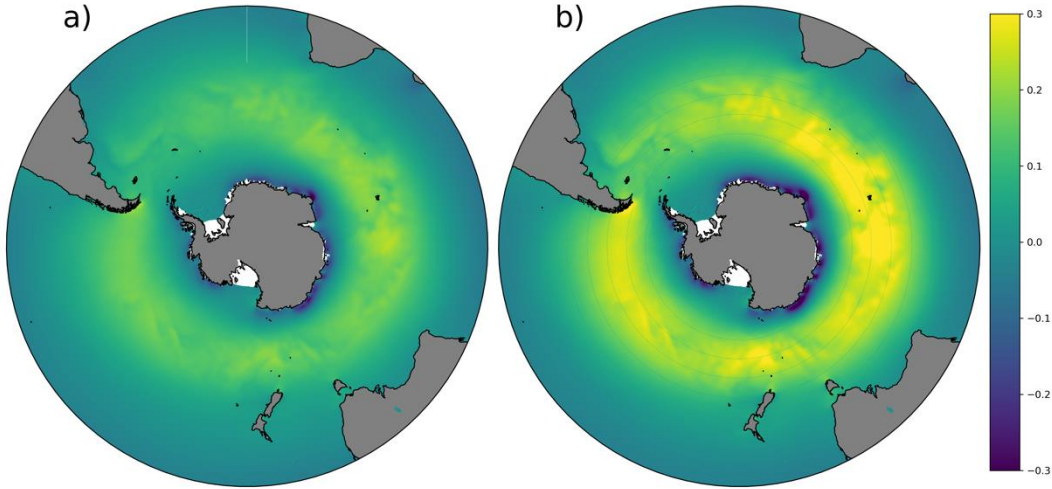


**Şekil 8.** MITgcm modelinin toplam alanı, solda 15 Ocak 2008 günü deniz yüzey sıcaklığı ve sağda göreceli girdaplık (relative vorticity) alanları gösterilmiştir.

Yapılan ikinci benzetim (1.5x rüzgar) ise kontrol benzetiminin üzerine Güney Okyanusu'ndaki Batılı rüzgarların yatay gerilme değerleri 1.5 katı artırılması ile elde edilmiştir. Okyanusun zorlandığı toplu formüllerde (Bulk formula) yatay rüzgar gerilmesi artırıldığında Ekman kuvveti değişir. Bu yüzden rüzgar değiştiğinde mekanik bir kuvvet yaratır. Şekli 9'da okyanus benzetimlerinde yatay gerilmelerin 7 yıllık ortalaması verilmiştir. Şekil 9a kontrol benzetimini göstermektedir. Şekil 9b ise yatay rüzgar geriliminin 1.5 katı artırıldığı benzetimdir. Kontrol benzetimindeki maksimum gerilme değeri yaklaşık olarak  $0.2 \text{ Nm}^{-2}$  olmasına rağmen 1.5x rüzgar benzetiminde bu değer beklenildiği gibi yaklaşık olarak  $0.3 \text{ Nm}^{-2}$ 'dir.

Güney Okyanusu'ndaki ACC'de oluşan değişimi anlamanın iki farklı yolu vardır. Bunlardan biri aynı zamanda model doğrulaması olarak da kullanılan Drake Geçidi su taşınımıdır (Drake Passage

transport). Şekil 10'da bütün benzetimlerin zamana bağlı Drake Geçidi taşınım miktarları gösterilmiştir. Drake Geçidi'nin taşınım miktarını ölçebilmek deniz koşulları nedeni ile oldukça zahmetli bir işlemdir.

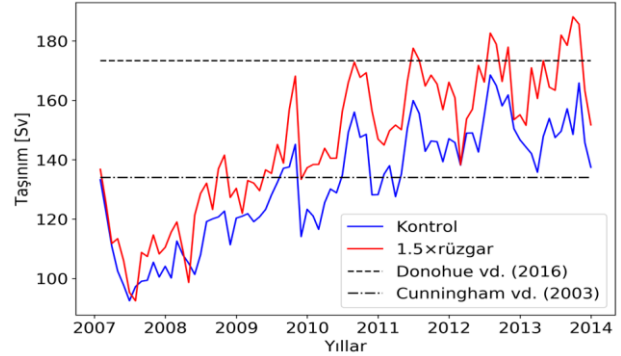


Şekil 9. İki farklı benzetimin yatay rüzgar gerilme değerleri ( $\tau_x$ ) gösterilmiştir.

Cunningham vd. (2003) taşınımı yaklaşık 137 Sv ( $1\text{Sv}=10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) olarak hesaplamışlardır (noktalı kesikli çizgi). Drake taşınımı zaman ile de değişiklik göstermektedir. Donohue vd. (2016) da debiyi 173 Sv olarak hesaplamıştır (kesikli çizgi). Model çıktılarında elde edilen sonuçların her ikisinde ilk yılda bir düşme göstermektedir. İlk yıldaki düşüşe rağmen modelin hızlı alışması (model adjustment) sayesinde, daha sonraki senelerde taşınımın büyüklüğü artmaya başlamış ve üçüncü yılın sonunda dengelenmiştir. Kontrol benzetiminin son dört yıldaki ortalama taşınım değeri yaklaşık 152 Sv'dir. Bu değer literatürde bulunan iki gözlem değerinin arasında yer almaktadır. Bunun yanında iklim çalışmalarında kullanılan CMIP5 ve CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, 5 ve 6. versiyon) modelleri de oldukça farklı taşınım değerleri gösterebilmektedir. Hatta bu model çalışmalarının bazıları 80 Sv'un altında veya 200 Sv'un üstündedirler (Meijers *et al.* 2012, Farneti *et al.* 2015). Kontrol benzetimlerinin literatürde verilen iki önemli değer arasında bir sonuç ürettiği olması modelin önemli dinamikleri doğru bir şekilde temsil ettiğini ortaya koymaktadır.

Duyarlık deneyi için yapılan değişiklikte rüzgar hızı artırıldıkça Drake Geçidi'ndeki taşınım miktarı da artış göstermiştir. Kontrol ile arasındaki farkın son dört yıl ortalaması yaklaşık olarak 14 Sv'dur. Bu da

yüzeyde yoğunluk gradyanının (meridional density gradient) değiştirdiğini göstermektedir. Bu değişim düşeyde de devam etmektedir.



Şekil 10. Farklı benzetimlerin zamana bağlı Drake Geçidi taşınım debisi. Daha önceki gözlem değerleri çizgili ve noktalı çizgili doğrular ile gösterilmiştir.

Değişimi ölçmenin diğer bir yolu da akım fonksiyonu (stream function,  $\Psi$ ) alanına bakmaktır. Bunu hesaplamak için 1-3 numaralı denklemler kullanılmıştır.

$$U = \frac{-\partial\Psi}{\partial y} \quad (1)$$

$$\int U \partial y = - \int \partial\Psi \quad (2)$$

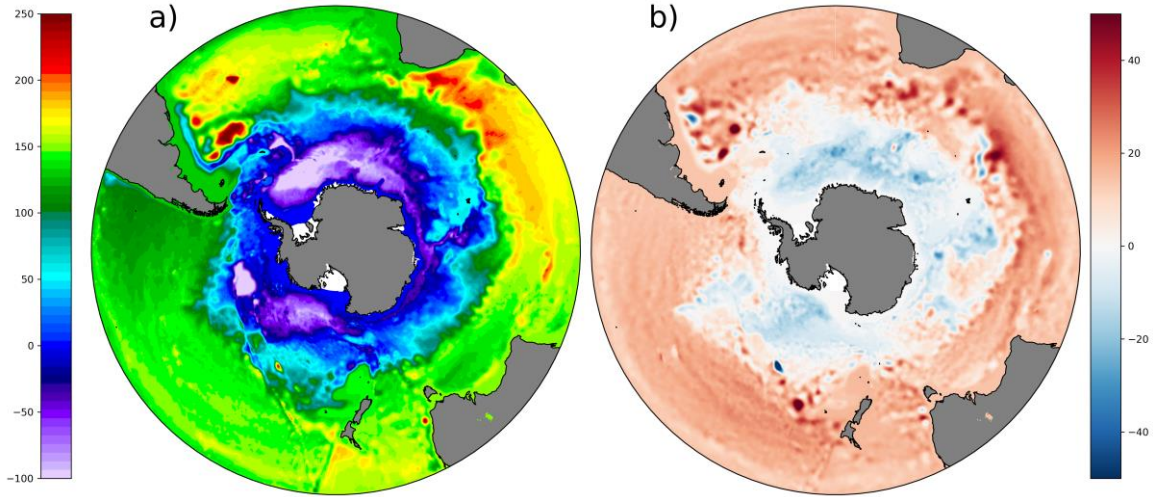
$$\int U \partial y = - \int_{lat=Antarktika}^{lat=24^\circ G} \partial\Psi \quad (3)$$

Burada  $U$  iki boyutlu Barotropik yatay hızı göstermektedir. İntegral işlemi Antarktika Kıtası'nın



kıyısından başladığı için başlangıç koşulu sıfır alınır ve her enlem boyunca yatay Barotropik hız toplanarak hesaplanır. Şekil 11a'da Ctrl benzetiminin yedi yıllık ortalama akım fonksiyonu değerleri gösterilmiştir. Weddel Gyre ve etrafında güçlü bir akıntı gözükmektedir. Model alanının büyüklüğünden dolayı Agulhas akıntısının yeri de belirgindir (Afrika Kıtasının güney ucu). Model çalışmalarında Agulhas akıntısını çözebilmek önemli bir göstergedir. Çünkü ACC'nin tam yerini

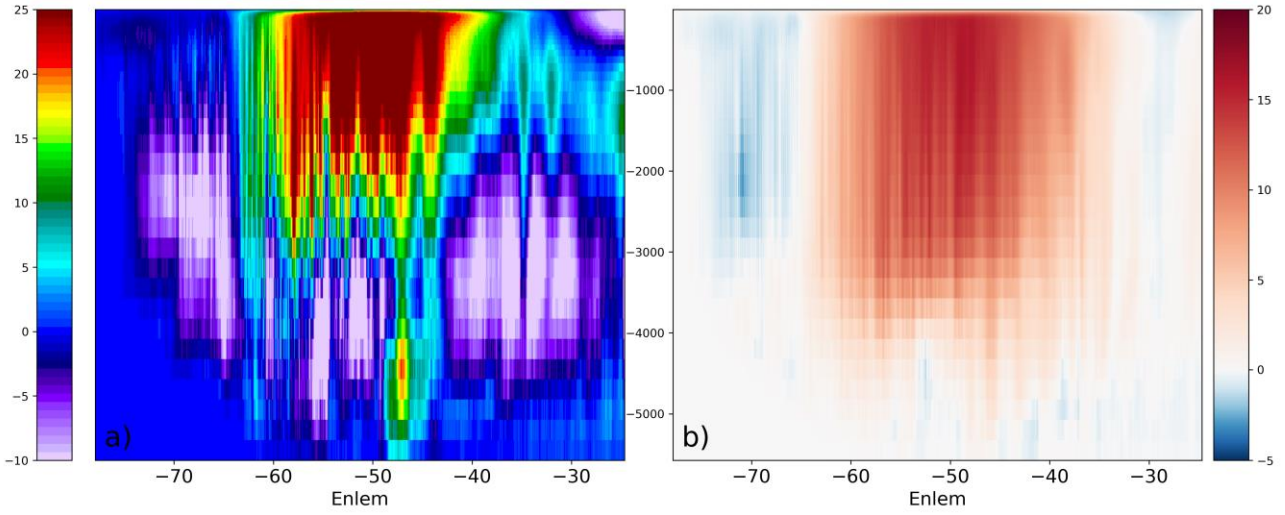
şekillendirme konusunda önemli bir dinamiğe sahiptir. Şekil 11b ise 1.5x rüzgar benzetimi ile kontrol benzetimi arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 11b'den net olarak gözüktüğü gibi artan rüzgar gerilmesi akım fonksiyonunu negatif yönde güçlendirmiştir. Bu da daha önce belirtildiği gibi daha yüksek bir Drake Geçiş taşınımına sebep olmaktadır. Akım fonksiyonunun gradyan değişimi de bu artışın diğer bir göstergesidir.



**Şekil 11.** a) Ctrl benzetiminin 7 yıllık ortalama akım fonksiyon alanı. b) 1.5x rüzgar benzetim değerlerinin Ctrl benzetiminden çıkartılması ile elde edilmiştir.

Son olarak Güney Okyanus'unda Batılı rüzgarların artmasının ACC'ye olan etkisini incelemek için oşinografide sıklıkla kullanılan overturning sirkülasyonu (derinliğe bağlı olarak) hesaplanmıştır. Şekil 12 bu sirkülasyonları göstermektedir. Kontrol benzetim sirkülasyonu Şekil 12a'da gösterilmiştir. Pozitif olan yüzey ve yüzey altı (surface, sub-surface) devinim ACC'nin etkisini ortaya koymaktadır. 60°G'den daha güneye doğru oluşan negatif sirkülasyon, derinden gelen Kuzey Atlantik Derin Suyunun (North Atlantic Deep Water) batılı rüzgarlar ile yüzeye doğru çıkmasından (upwelling) kaynaklanmaktadır. Aynı noktada Deacon

hücrenin de görülmesi mümkündür. Deacon hücrenin maksimum büyüklüğü 8-9 Sv mertebesinde ve bu değer de gözlem değerleri ile uyumludur. Şekil 12b, 1.5x rüzgar benzetiminin devinim sirkülasyon alanının kontrol benzetimi ile aralarındaki farkı göstermektedir. Artan rüzgar hızı ACC tarafındaki sirkülasyonu da arttırmıştır (kırmızı alanlar). Toplam artış yaklaşık olarak 20 Sv seviyesindedir. Özellikle yüksek enlemlerde (30°G enlemi ve kuzeyi), değişen izopiknik konturlarının etkisi net olarak gözükmektedir.



**Şekil 12.** a) Ctrl benzetiminin 7 yıllık ortalama devinim sirkülasyon (overturning circulation) alanı. b) 1.5x rüzgar benzetim değerlerinin Ctrl benzetiminden çıkartılması ile elde edilmiştir. Renk ölçeği doğrusal verilmemiştir.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

İnsan kaynaklı iklim değişikliğinin bir sonucu olarak Güney Okyanusu üzerindeki Batılı rüzgarların kutba doğru kayması ve hızlarının artması beklenmektedir. Rüzgarlardaki bu artışın Antarktika Kutupsal Akıntısı'nın üzerindeki etkileri henüz tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada bölgesel atmosfer ve okyanus-deniz buzu modelleri geliştirilmiş ve rüzgar artışlarının ACC üzerindeki etkisi incelenmiştir. Atmosfer modeli, 2007-2013 yıllarını içeren periyod için koşturulmuştur. Bu benzetim sonucunda modelin mevcut hali ile Antarktika kıtasındaki önemli atmosfer özelliklerini oldukça iyi bir şekilde temsil etmektedir. Model ortalama deniz seviyesi basınç alanlarını yersel olarak yakalamış olmakla beraber özellikle deniz buzu üzerinde büyüklük olarak daha derin alçak basınç merkezlerine sahiptir ve bu değer 2hPa değerlerine kadar ulaşabilmektedir. Buz örtüsü üzerinde modelin yere yakın atmosfer sıcaklığı (2 metre) güney yarımküre kış ve sonbahar mevsimlerinde daha soğuktur. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde ise Bellingshausen-Amundsen Denizi kıyılarında daha soğuk, 60°B-60°D alanları arasında ise reanaliz verisine göre daha sıcak yere yakın hava sıcaklığı değerleri hakimdir. Model ayrıca kıtaların doğu kıyılarında yer alan okyanuslar üzerinde 1°C daha sıcak atmosfere sahiptir. Modelin yukarı atmosfer benzetimleri ise beklenen bütün temel motiflerin ve bunların mevsimsel değişimlerin oldukça iyi bir şekilde yakalandığına işaret etmektedir. Büyüklük olarak ise genelde model

daha yüksek basınç değerlerine sahiptir. Yukarı seviyelerde jet alanları ve bununla birlikte Polar vortex ve Stratosferik Polar vortex'in hakim olduğu alanlar ve mevsimsel davranışlar model tarafından yakalanmıştır. Model, aşağı ve orta troposferde  $1\text{ms}^{-1}$ 'den daha güçlü rüzgarlara sahiptir. Bu daha güçlü rüzgarlar yukarı seviyelere doğru gücünü azaltmaktadır. İstasyon özelinde baktığımızda model mevsimsel ve yıllar arası değişimleri iyi bir şekilde göstermektedir. Yüksek istasyonlarda (Amundsen - Scott ve Vostok) ise modelin rüzgarda çok büyük hatalara sahip olması beklenen bir sonuçtur. Buradaki hataların bilindiği gibi bir kısmı model çözünürlüğünün normalde noktasal karşılaştırma için çok kaba olmasından dolayıyla modelin üretmiş olduğu topoğrafya ile gözlem noktasının yükseltisi arasında meydana gelecek farktan, bir kısmı da gözlem noktası yerinin ağ üzerindeki en yakın nokta olarak tespit edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak burada modelin mevsim geçişlerini ve yıllar arası değişimi yakalamış olması modelin seçilen dinamik ve fiziksel parametrisasyonları ile yapılmış olan benzetimlerin gözlemlerle uyumlu olduğuna işaret etmektedir.

Atmosfer modeli çalışmaları ile uyumlu olarak iki adet okyanus-deniz buzu model benzetimi yapılmıştır. Bu benzetimler atmosfer modelinde olduğu gibi 2007-2013 tarihleri arasında koşturulmuştur. Kontrol benzetimi deniz yüzey sıcaklığı grayanını ve orta ölçekli girdapları başarı ile

yakalamıştır. Drake Geçidi taşınım değerleri yaklaşık olarak 152 Sv olarak hesaplanmıştır. Bu değer gözlem değerlerinin içinde yer almaktadır ve modelin Drake Geçidi dinamiklerini doğru bir şekilde benzeştirdiğini göstermektedir. Rüzgar yatay gerilmesinin 1.5 kat artırıldığı benzetimde Drake Geçidi taşınımı yaklaşık olarak 14 Sv artış göstermiştir. Bu da yüzeyde yoğunluk gradyanının değiştiğini göstermektedir. Akım fonksiyon değerlerini incelediğimizde Güney Okyanusu üzerinde 30 Sv artış gözlenmiştir. Derinliğe bağlı olan devinim sirkülasyonuna baktığımızda ise Deacon hücresi Barotropik olarak 20 Sv kadar artmıştır. Kutupaltı hücresi (Subpolar cell) büyüklüğü ise -5 Sv negatif yönde artmıştır.

Bu çalışmada, Güney Okyanusu'nda iklim değişikliği ile meydana gelecek olası değişimleri tespit etmek için yüksek çözünürlüklü okyanus modelinden elde edilen deniz suyu sıcaklığı ve deniz buzu parametreleri atmosfer modeline girdi olarak verilerek bir hassasiyet çalışması yürütülmüştür. Bu çalışmanın sonrasında amacımız daha önce gerçekleştirilmemiş bir hassasiyet analizi yaparak atmosfer ve okyanus-deniz buzu modellerini tamamen bütünleşik olarak çalıştırmak ve yatay gerilme artmasının atmosfer geri beslemelerini de inceleyebilmektir. Bu sayede Antarktika Kıtası ve Güney Okyanusunu kapsayan son teknoloji (state-of-the-art) bir modelleme sistemi işlevsel hale gelmiş olacaktır.

#### Teşekkür

Bu proje, TÜBİTAK tarafından Proje No: 118Y329 olarak fonlanmıştır. Proje kapsamında kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi (UHEM) tarafından 1006542019 numaralı sözleşme ile sağlanmıştır.

#### 5. Kaynaklar

Abernathey, R., and Cessi, P., 2014. Topographic enhancement of eddy efficiency in baroclinic equilibration. *Journal of Physical Oceanography*, **44**, 2107–2126.

Adcroft, A., Hill, C. N., and Marshall, J.C., 1999. A new treatment of the coriolis terms in c-grid models at both high and low resolutions. *Monthly Weather Review*, **127**, 1928-1936.

Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.H. and Ladner, R., 2009. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30\_PLUS. *Marine Geodesy*, **32(4)**, 355-371.

Böning C.W., Dispert, A., Visbeck, M., Rintoul, S.R., Schwarzkopf, F.U., 2008. The response of the Antarctic Circumpolar Current to recent climate change. *Nature Geosciences*, **1**, 864–869.

Carton, J. A., Chepurin, G. A., & Chen, L., 2018. SODA3: A new ocean climate reanalysis. *Journal of Climate*, **31(17)**, 6967-6983.

Cunningham, S. A., Alderson, S. G., King, B. A., & Brandon, M. A., 2003. Transport and variability of the Antarctic circumpolar current in drake passage. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **108 (C5)**.

Doney, S. C., Large, W. G., and Bryan, F. O., 1998. Surface ocean fluxes and water mass transformations in the coupled NCAR Climate System Model. *Journal of Climate*, **11**, 1420–1441.

Donohue, K. A., Tracey, K. L., Watts, D. R., Chidichimo, M. P., & Chereskin, T. K., 2016. Mean antarctic circumpolar current transport measured in drake passage. *Geophysical Research Letters*, **43(22)**, 11-760.

Durack, P.J., Wijffels, S.E., 2010. Fifty-year trends in global ocean salinities and their relationship to broad-scale warming. *Journal of Climate*, **23**, 4342–4362.

Farneti R. and Gent P.R., 2011. The effects of the eddy-induced advection coefficient in a coarse-resolution coupled climate model. *Ocean Modelling*, **39**, 135-145.

Farneti, R., Downes, S. M., Griffies, S. M., Marsland, S. J., Behrens, E., Bentsen, M., ... & Yeager, S. G., 2015. An assessment of Antarctic Circumpolar Current and Southern Ocean meridional overturning circulation during 1958–2007 in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, **93**, 84-120.

Gent, P.R., McWilliams, J.C., 1990. Isopycnal mixing in ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, **20**, 150–155.

- Gent, P.R., Willebrand, J., McDougall, T. J. and McWilliams, J. C., 1995. Parameterizing eddy-induced tracer transports in ocean circulation models. *Journal of Physical Oceanography*, **25**, 463–474.
- Gille, S.T., 2008. Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere ocean. *Journal of Climate*, **21**, 4749–4765.
- Glisan J.M., Gutowski JR. W. J., Cassano J.J. and Higgins M.E., 2013. Effects of Spectral Nudging in WRF on Arctic Temperature and Precipitation Simulations. *Journal of Climate*, **26**, 3985-3999.
- Hallberg, R., Gnanadesikan, A., 2006. The role of eddies in determining the structure and response of wind-driven Southern Hemisphere overturning: results from the modeling eddies in the Southern Ocean (MESO) project. *Journal of Physical Oceanography*, **36**, 2232–52.
- Henning, C.C., Vallis, G.K., 2005. The effects of mesoscale eddies on the stratification and transport of an ocean with a circumpolar channel. *Journal of Physical Oceanography*, **35**, 880–896.
- Hughes, C.W. and De Cuevas, B.A., 2001. Why western boundary currents in realistic oceans are inviscid: A link between form stress and bottom pressure torques. *Journal of Physical Oceanography*, **31(10)**, 2871-2885.
- Hogg, A.M., Meredith, M.P., Blundell, J.R., Wilson, C., 2008. Eddy heat flux in the Southern Ocean: response to variable wind forcing. *Journal of Climate*, **21**, 608–620.
- IPCC, 2007. The Physical Science Basis. Contribution of WGI to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Climate Change 2007, edited by S. Solomon, et al., Cambridge University Press, Cambridge, 996.
- Markina M., Gavrikov A., Gulev S., Barnier B., 2018. Developing configuration of WRF model for long-term high-resolution wind wave hindcast over the North Atlantic with WAVEWATCH III. *Ocean Dynamics*, **68**, 1593-1604.
- Marshall, J., and Radko, T., 2003. Residual-mean solutions for the Antarctic Circumpolar Current and its associated overturning circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **33**, 2341–2354.
- Mazloff, M. R., Heimbach, P., & Wunsch, C., 2010. An eddy-permitting Southern Ocean state estimate. *Journal of Physical Oceanography*, **40(5)**, 880-899.
- Meijers, A. J. S., Shuckburgh, E., Bruneau, N., Sallee, J.-B., Bracegirdle, T. J., Wang, Z., 2012. Representation of the Antarctic Circumpolar Current in the CMIP5 climate models and future changes under warming scenarios, *Journal of Geophysical Research*, **117**, C12008.
- Meredith, M. P. and Hogg, A. M., 2006. Circumpolar response of Southern Ocean eddy activity to a change in the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, **33**, L16608.
- Meredith, M. P., Naveira-Garabato A. C., Hogg, A.M., Farneti, R., 2012. Sensitivity of the overturning circulation in the Southern Ocean to decadal changes in wind forcing. *Journal of Climate*, **25**, 99–110.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G, Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J. G., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113. doi:10.5065/D68S4MVH.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., ... Huang, X. -yu., 2021. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. doi:10.5065/1dfh-6p97.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., and Flemming, R. H., 1942: The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice Hall, 1087.
- Veronis, G., 1996: Effect of a constant, zonal wind on wind-driven ocean circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **26**, 2525–2528.
- Viebahn J., Eden C., 2010. Towards the impact of eddies on the response of the Southern Ocean to climate change. *Ocean Modelling*, **34**, 150–165.
- Wolfe, C.L., Cessi, P., 2010. What sets the strength of the middepth stratification and overturning circulation in eddy ocean models? *Journal of Physical Oceanography*, **40**, 1520–1538.

**İnternet kaynakları**

1-<https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/surface/>,  
(03.02.2020)

2-<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>,  
(07.04.2019)

3-<https://doi.org/10.5067/GHAAO-4BC02>, (08.05.2019)

# Yara Örtü Materyallerinde Aktif Ajan Olarak Kullanılmak Üzere Jelatin Kaplı Gümüş Nanoparçacıkların Sentezlenmesi ve Karakterizasyonu

Zehra GÜN GÖK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, Yahşıhan, Kırıkkale, Türkiye.

e-posta: zzehragunok@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6426-0395>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 31.10.2021

## Öz

Bu çalışmada, yara örtü materyallerinde antimikrobiyal ajan olarak kullanılabilir jelatin kaplı gümüş nanopartiküller (J-AgNPs) sentezlemek için jelatin proteini hem indirgeme hem de kaplama ajanı olarak kullanılmıştır. J-AgNPs sentezi için, %1'lik jelatin çözeltisi ile belirli derişimde AgNO<sub>3</sub> çözeltisi karıştırılmış ve karışım 2 saat boyunca 100 °C'de inkübe edilmiştir. J-AgNPs komplekslerinin 300 ile 600 nm arasındaki absorpsiyon spektrisi UV-Vis spektrofotometre ile ölçülerek, gözlemlenen yüzey plazmon pikleri ile AgNPs oluşumu tespit edilmiştir. J-AgNPs'lerin sudaki kararlılıkları ve boyutları Zetasizer ile incelenmiştir. Sentezlenen bütün J-AgNPs gruplarının zeta potansiyeli pozitif çıkmış ve zeta-boyutlarının 116,3-170 nm aralığında olduğu bulunmuştur. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri ile J-AgNPs'lerin kimyasal yapısı incelenmiş ve AgNPs'lerin çevresinde jelatin bulunduğu gösterilmiştir. Yapılan taramalı elektron mikroskopu (SEM) incelemeleri ile sentezlenen J-AgNPs'lerin morfolojilerinin küresel formda olduğu anlaşılmış ve SEM görüntüleri üzerinden yapılan enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri ile J-AgNPs'lerin yapısında karbon, azot ve gümüş varlığı kanıtlanmıştır. X-Işını difraktometresi (XRD) analizi ile jelatinin amorf yapısı ve J-AgNPs'lerde metalik gümüş varlığı gösterilmiştir. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarına göre, J-AgNPs'lerin termal olarak saf jelatine göre daha kararlı olduğu ve 900 °C'nin sonunda arta kalan miktarının gümüş varlığı ile arttığı görülmüştür.

## Anahtar kelimeler

Jelatin; Gümüş nanopartikül; Yeşil sentez; Karakterizasyon; Antibakteriyel ajan

## Synthesis and Characterization of Gelatin Coated Silver Nanoparticles for Use as Active Agent in Wound Dressing Materials

### Abstract

In this study, gelatin protein was used both as a reducing agent and as a coating agent to synthesize gelatin coated silver nanoparticles (J-AgNPs) that can be used as an antimicrobial agent in dressing materials. For the synthesis of J-AgNPs, 1% gelatin solution and AgNO<sub>3</sub> solution of certain concentration were mixed and the mixture was incubated at 100 °C for 2 hours. By measuring the absorbance spectra of J-AgNPs complexes between 300 and 600 nm with UV-Vis spectrophotometer, AgNPs formation were detected with the observation of surface plasmon peaks. Stability and dimensions of J-AgNPs in water were examined with Zetasizer. The zeta potential of all synthesized J-AgNPs groups were found to be positive and zeta-dimensions were found to be in the range 116.3-170 nm. The chemical structure of J-AgNPs was examined by fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) analysis and it was shown that there was gelatin around AgNPs. It was understood that the morphologies of J-AgNPs synthesized by scanning electron microscopy (SEM) examinations were in spherical form, and the presence of carbon, nitrogen and silver in the structure of J-AgNPs was proved by energy dispersion spectrometry (EDS) analyzes made on SEM images. The amorphous structure of gelatin and the presence of metallic silver in J-AgNPs were shown by X-Ray diffractometer (XRD) analysis. According to the thermogravimetric analysis (TGA) results, it was observed that J-AgNPs were thermally more stable than pure gelatin and the remaining amount at the end of 900 °C increased with the presence of silver.

### Keywords

Gelatin; Silver nanoparticle; Green synthesis; Characterization; Antibacterial agent.



## 1. Giriş

Günümüzde, nanomalzemelerin hazırlanması ve çeşitli alanlarda kullanılması güncel araştırma konularıdır. Yenilikçi nanomalzemeler, özellikle tıp alanında, yeni sensörlerin yapımında ve çevresel teknolojilerin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Gümüş nanopartiküller (AgNPs'ler), yüksek antimikrobiyal aktiviteleri nedeniyle ticari olarak en ilgi çeken nanomalzemeler arasındadır. AgNPs'ler, yapay kalp kapakları, vasküler kateterler ve endoprotezler gibi tıbbi cihazlara antibakteriyel aktivite eklemek için kullanılmaktadır (Chen *et al.* 2008; Rai *et al.* 2009; Chaloupka *et al.* 2010; Sivera *et al.* 2014). Ayrıca, AgNPs'ler tekstil endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmakta, kumaşlar AgNPs'lerle modifiye edilip ve antibakteriyel özelliğe sahip çoraplar, iç çamaşırları ve tişörtler gibi tekstil ürünleri elde edilmektedir (Lee *et al.* 2003; Ravindra *et al.* 2010). Bunların yanı sıra, AgNPs'ler suyu dezenfekte etmek için filtre kartuşlarının modifikasyonu için de kullanılmaktadır (Jain and Pradeep 2003; Inyang *et al.* 2013).

AgNPs'ler tipik olarak, bir gümüş öncüsünün kimyasal veya fiziksel araçlar kullanılarak indirgenmesine dayanan ıslak indirgeme yöntemleriyle sentezlenmektedir. Gümüş iyonları, sodyum borohidrit gibi güçlü indirgeyici maddelerle olduğu kadar sitrat veya şekerler gibi hafif indirgeyicilerle de indirgenebilmektedir. Gümüş iyonlarının indirgenmesi ayrıca mikrodalgalar, ultrason veya gama radyasyonu kullanılarak da sağlanabilmektedir (Sharma *et al.* 2009). Yaygın olarak "yeşil" yöntemler olarak adlandırılan biyolojik malzemeler, bitkiler, algler, bakteriler veya mantarlardan elde edilen özütleri kullanarak AgNPs'lerin sentezlendiği yöntemler de rapor edilmiştir (Kvitek *et al.* 2008; Thakkar *et al.* 2010).

Güvenliği ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve AgNPs'lerin medikal uygulamalarda genotoksitesini ve sitotoksitesini en aza indirmek için yeşil kimya ilkelerinin AgNPs'lerin sentezinde uygulanmasına yönelik bir ilgi artışı olmuştur. AgNPs'lerin yeşil sentezinde göz önünde bulundurulması gereken üç önemli faktör şunlardır:

(i) yeşil çözücülerin kullanımı, (ii) çevre dostu iyi huylu bir indirgeme ajanı kullanımı ve (iii) toksik olmayan bir materyalin stabilizatör olarak kullanılmasıdır. AgNPs hazırlamak için yeşil yöntemlerden biri polisakkarit yöntemidir. Bu yöntemde, su normalde çevre dostu iyi huylu bir çözücü olarak ve polisakkaritler kaplama ve indirgeme ajanı maddeler olarak kullanılmaktadır (Mohan *et al.* 2014). Raveendran *et al.* (2003), AgNPs sentezi için ilk yeşil sentez yöntemini bildirmişler ve bu yöntemde sırasıyla çözücü, kaplama maddesi ve indirgeme maddesi olarak su, nişasta-glikoz kullanmışlardır. Bu yöntemin modifikasyonuna dayanarak, AgNPs'lerin sentezi için, indirgeyici ajan olarak birçok farklı biyolojik madde (ipek serisin, jelatin, kitosan vb.) kullanılmasıyla AgNPs'lerin sentezlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Nate *et al.* 2018; Gün Gök *et al.* 2020; Lavanya *et al.* 2020).

AgNPs'lerin zamanla kümelenerek büyük agregalar halinde çökmesi, kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Çünkü, AgNPs'lerin kümelenerek çökmesi ile aktif yüzey alanları azalmakta ve dolayısıyla antimikrobiyal veya katalitik aktiviteleri gibi benzersiz özelliklerinde önemli bir azalmaya neden olan büyük agregaların oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Bundan dolayı, AgNPs'lerin özelliklerini geliştirmek ve yeni uygulamalarda kullanımlarını kolaylaştırmak için bu partiküllerin stabilize edilmesi gerekmektedir. Modifikasyon/stabilizasyon, elektriksel bir çift katmandan kaynaklanan elektrostatik itme ile veya polimerlerin yüzey katmanlarından kaynaklanan sterik itme ile elde edilebilmektedir. Elektrostatik stabilizasyon, yük bariyerinin gücünü artıran yüklü moleküller kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Sterik stabilizasyon, polimerlerin partikül yüzeylerine adsorbe edilmesiyle gerçekleştirilebilmektedir. Nanopartiküllerin stabilizasyonu için poli (vinilalkol), polietilen glikol, poliakrilonitril, polimetilmetakrilat ve poli (laktik asit) yaygın olarak kullanılan sentetik polimerlerdir. Bunların yanı sıra, kitosan, polisakkaritler ve jelatin gibi doğal polimerlerin inorganik nanopartiküllerin stabilizasyonu için kullanılmaktadır (Sivera *et al.* 2014).



Jelatin, doğal olarak bol miktarda bulunan bir biyopolimerdir ve kolajene benzer biyouyumluluğa ve biyolojik olarak parçalanabilirliğe sahip olduğu bilinmektedir. Jelatin, deri, kas ve kemik gibi hayvan dokularından ekstraksiyon yoluyla kolaylıkla elde edilebilir. Doğal bolluğu ve fizyolojik ortamlarda biyolojik olarak parçalanabilirliği nedeniyle jelatin, gıda, kozmetik, farmasötik ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulamasına bağlı olarak jelatin, filmler, mikro veya nanopartiküller ve yoğun veya gözenekli hidrojeller dahil olmak üzere birçok formda üretilebilir (Rujitanaroj *et al.* 2008; Jeong and Park 2014).

Jelatin, pozitif ve negatif yüklü ve ayrıca kararlı bir şekilde katlanmış hidrofobik alanlar içermektedir. Jelatin, sterik bir bariyer oluşturarak yüzeyleri stabilize edebilir. Bu nedenle, jelatinin ana işlevi bir stabilizatör olmasıdır (Akbulut *et al.* 2008). Bu özelliğinden dolayı da jelatin, gıda işleme, ilaç endüstrisi, fotoğrafçılık ve elektrokimya gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Darroudi *et al.* 2011).

Bu çalışmanın amacı, çevre dostu bir yöntemle, jelatinin hem indirgeme hem de kaplama ajanı olarak kullanılmasıyla, kararlı AgNPs'lerin sentezlenmesinin ve karakterizasyonunun yapılmasıdır. Bu çalışma kapsamında, 5 farklı derişimde J-AgNPs sentezlenmiştir. Sentezlenen AgNPs'lerin kimyasal, boyut, morfolojik, kristal ve termal özellikleri incelenmiştir. İleri çalışmalarımızda, bu çalışma ile sentezlenen ve karakterize edilen J-AgNPs'lerin antimikrobiyal ve sitotoksik etkileri incelenecek ve polimerik yara örtüsü malzemeleri içerisinde kullanılma kapasitesine sahip J-AgNPs grupları belirlenecektir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda kullanılan jelatin (G2625) ve gümüş nitrat Sigma-Aldrich'ten (Almanya) temin edilmiştir. 0,45 µm'lik filtreler Merck Millipore'dan (Almanya) satın alınmıştır.

### 2.2. J-AgNPs Sentezi

J-AgNPs sentezi için, 1 g jelatin 100 mL suya eklenmiş ve jelatinin çözünmesi için karışım 40 °C'de 2 saat boyunca karıştırılmıştır (Mohan *et al.* 2014). 100 mM'lık AgNO<sub>3</sub> çözeltisi hazırlanmış ve bu çözeltiden belirli miktar AgNO<sub>3</sub>, %1'lik jelatin çözeltisine eklenmiş ve çözeltinin son hacmi distile su ile 20 mL'ye tamamlanmıştır. Jelatin çözeltisi içerisindeki AgNO<sub>3</sub> miktarı 1, 3, 5, 10 ve 20 mM olarak ayarlanmıştır. Sonrasında, her bir çözelti 50 mL'lik bir erlene aktarılıp manyetik karıştırıcıya yerleştirilmiş ve çözeltiler yüksek hızda (800 rpm) karıştırılarak ısıtılmış ve 100 °C'de iki saat boyunca inkübe edilmiştir (Luo *et al.* 2019). Jelatin-AgNO<sub>3</sub> karışımlarında gözlemlenen sarı-kahverengi renk değişimi, Ag (I) iyonunun Ag (0)'a indirgenmiş olduğunu göstermektedir (Yue *et al.* 2014). Bu renk değişiminden sonra çözeltiler 8 saat boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Sonrasında elde edilen J-AgNPs içeren çözeltiler 0,45 µm'lik filtrelerden geçirilerek saflaştırılmıştır. J-AgNPs örnekleri karakterizasyon çalışmaları için +4°C'de muhafaza edilmiştir.

### 2.3. Sentezlenen J-AgNPs'lerin Karakterizasyonu

Sentezlenen J-AgNPs çözeltilerinin 300 ile 600 nm arasındaki absorpsanları UV-Vis spektrofotometre (PowerWave XS2 Microplate Spectrophotometer, BioTek, ABD) ile ölçülerek yüzey plazmon rezonan pikleri tespit edilmiştir. Sonikartörde bir müddet karıştırıldıktan sonra, J-AgNPs'lerin zeta potansiyeli ve boyutları ZetaSizer (Malvern Instruments, Malvern, UK) ile ölçülerek bulunmuştur. Jelatinin indirgeme ajanı olarak kullanılmasıyla sentezlenen J-AgNPs'lerin ve orijinal jelatinin kimyasal yapıları FTIR (Vertex 70V, Bruker) ile belirlenmiştir. Kurutularak toz haline getirilen J-AgNPs'lerin altın ile kaplandıktan sonra morfolojileri ODTÜ Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan FESEM cihazı (QUANTA 400F Field Emission SEM) ile araştırılmıştır. FESEM görüntüleri üzerinden EDS analizi ile J-AgNPs'lerin yapısında bulunan elementler incelenmiştir. J-AgNPs'ler kurutulup toz haline getirilmesinden sonra, J-AgNPs'lerin kristal yapıları ODTÜ Merkez Araştırma Laboratuvarında XRD cihazı (Rigaku Ultima-IV brand) ile 0-90° tarama

aralığında incelenmiştir. Yine toz haline getirilen J-AgNPs'lerin ve orijinal jelatinin termal özellikleri 25-900 °C arasında TGA (PerkinElmer) ile belirlenmiştir.

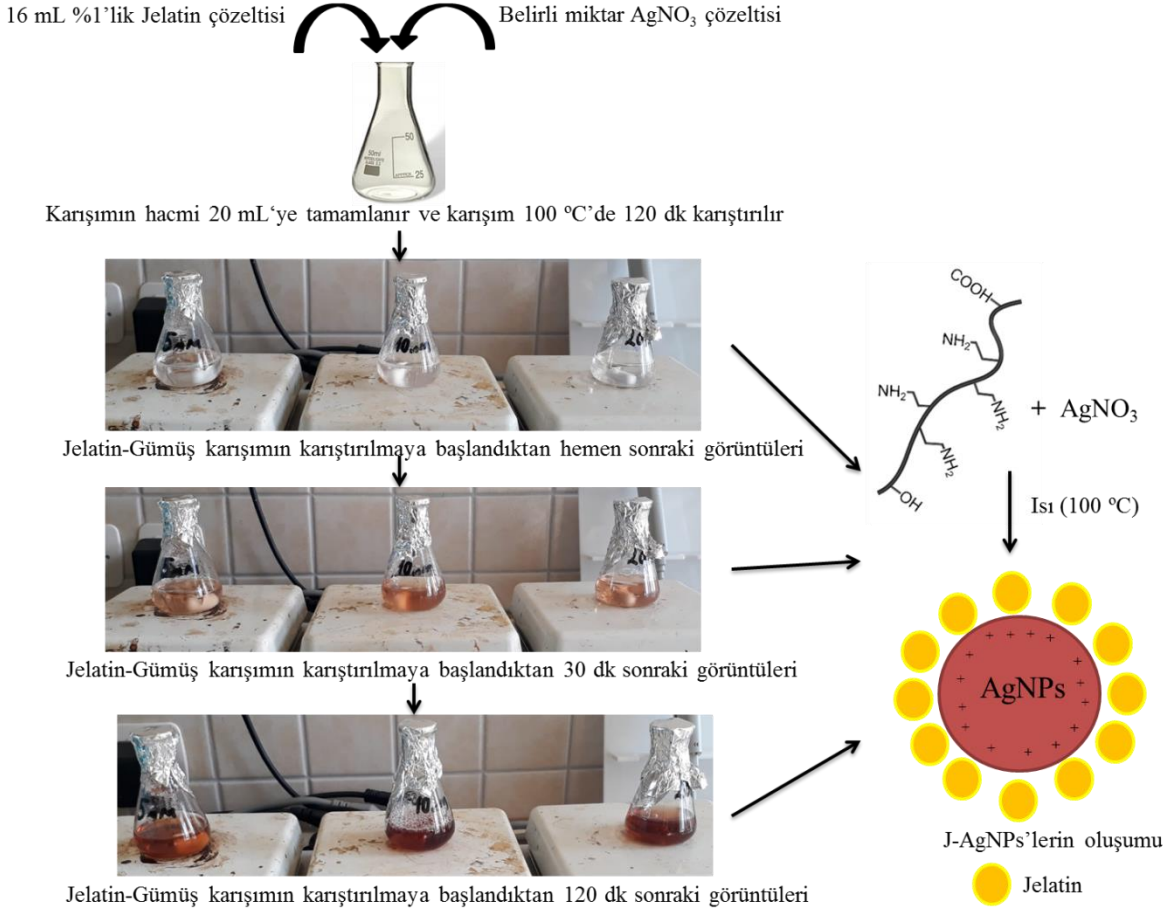
### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. J-AgNPs'lerin Sentezlenmesi

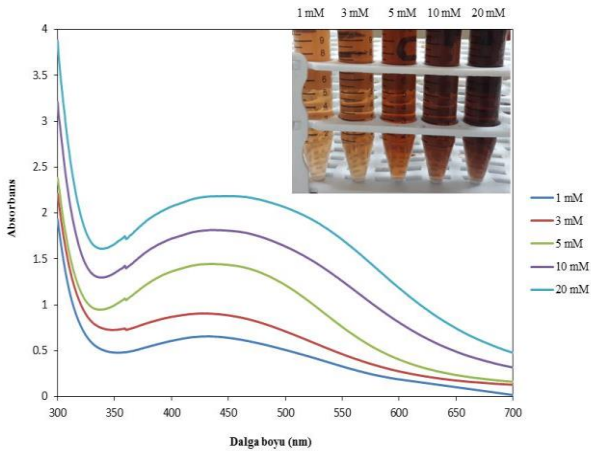
Literatürde bildirildiği gibi, AgNPs'ler deri, karaciğer, akciğer, beyin ve vasküler sistem dahil olmak üzere farklı dokulardan türetilen çeşitli memeli hücreleri için toksiktir (Dos Santos *et al.* 2014). Bu dezavantajların üstesinden gelmek için, biyopolimerlerden oluşan birçok biyo-uyumlu kaplama ve indirgeme ajanı, AgNPs'lerin oksidasyona, aglomerasyona ve çökelmeye karşı stabilitesini iyileştirmenin yanı sıra sitotoksiteyi azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Luo *et al.* 2019). Bu çalışmada, jelatin çevre dostu, biyoyumlu ve gümüş iyonlarını indirgeme potansiyeline sahip fonksiyonel gruplara sahip olması nedeniyle AgNPs sentezi için indirgeyici ve stabilize edici bir madde olarak kullanılmıştır. J-AgNPs'lerin sentezlenme mekanizması Şekil 1'de verilmiştir. Belirli derişimde AgNO<sub>3</sub>'ün %1'lik jelatin çözeltisiyle karıştırılması ve karışımın ısıtılmasıyla AgNPs'lerin sentezlenmeye başladığı renk değişimi ile görülmüştür. Jelatin ve AgNO<sub>3</sub> arasındaki reaksiyondaki Ag<sup>+</sup>/jelatin solüsyonlarının rengi, reaksiyon süresi arttıkça renksizden açık kahverengiye ve ardından koyu kahverengiye doğru değişimler göstermiş, bu da farklı partikül

boyutlarında jelatin kaplı AgNPs'lerin oluşumunu göstermektedir (Mohan *et al.* 2014).

Renk değişiminin yanı sıra, UV-Vis spektroskopisi, yoğun yüzey plazmon rezonansları nedeniyle metal NPs'lerin optik yanıtını karakterize etmek için kullanılan yöntemlerden biridir (Khanh *et al.* 2019). Sentezlenen J-AgNPs'lerin 300-600 nm arasındaki absorpsiyon spektrumları Şekil 2'de gösterilmektedir. 420 nm dalga boyunda gözlemlenen yüzey plazmon rezonans pikleri AgNPs'lerin sentezlendiğini göstermektedir çünkü AgNPs'ler sarı-kahverengi renge sahip 420-450 nm'de tipik absorpsiyon pikine sahip çözeltilerdir (Aramwit *et al.* 2014; Gün Gök *et al.* 2020). Tüm AgNO<sub>3</sub> konsantrasyonlarında (1, 3, 5, 20 ve 20 mM), farklı verimlerde J-AgNPs'lerin oluştuğu hem UV-Vis ölçüleriyle hem de renk değişimiyle gözlemlenmiştir. Jelatin, amino, hidroksil ve karboksil gibi polar birimlere sahiptir ve bundan dolayı, hidrofilik bir proteindir. Jelatin yapısında bulunan hidroksil gruplarının gümüş iyonları ile kompleksleşmesinin AgNPs'lerin bir araya toplanmasını veya çökmesini önlediği de düşünülmektedir (Shin *et al.* 2009). Bunun yanı sıra, jelatinin amino ve karboksilik grupları, AgNPs'lerin yüzey Ag atomları/iyonları ile koordine olmakta ve J-AgNPs'lerin biyolojik bir çözelti içinde aglomerasyona karşı stabilitesini artırmaktadır (Luo *et al.* 2019).



**Şekil 1.** Jelatin- $\text{AgNO}_3$  karışımın oluşturulması ve J-AgNPs'lerin oluşumunu gösteren şematik görüntü



**Şekil 2.** Sentezlenen J-AgNPs gruplarının UV-Vis spektrumları ve görüntüleri

### 3.2. J-AgNPs'lerin Boyutlarının ve Morfolojilerinin İncelenmesi

Sentezlenen J-AgNPs'lerin zeta potansiyelleri ve boyutları (Şekil 2 ve 3) Çizelge 1'de gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre tüm grupların zeta potansiyelinin pozitif olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, sentezlenen J-AgNPs'lerin pozitif yüzey yüküne sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar,

sentezlenen partiküllerin, pozitif yüzey yükleri sayesinde birbirini itmesi nedeniyle sıvı bir solüsyonda yüksek stabiliteye sahip olduğunu göstermektedir (Gün Gök *et al.* 2021a). Ayrıca, pozitif zeta potansiyeli kaplama malzemesinin (jelatinin) stabilizatör etkisini de ortaya koymaktadır. Çünkü pozitif yüzey yükü her polimer zincirinin birbirini ittiği ve böylece çevreledikleri AgNPs'lerin bir araya gelerek kümelenmesini engellediği bilinmektedir (Farhadi *et al.* 2017; Seong *et al.* 2017). J-AgNPs'lerin hidrodinamik çapları incelendiğinde, Ag konsantrasyonu arttıkça hidrodinamik çapın önce azaldığı, sonrasında birbirine yakın olduğu görülmüştür.

**Çizelge 1.** Sentezlenen J-AgNPs'lerin zeta potansiyeli ve boyutları

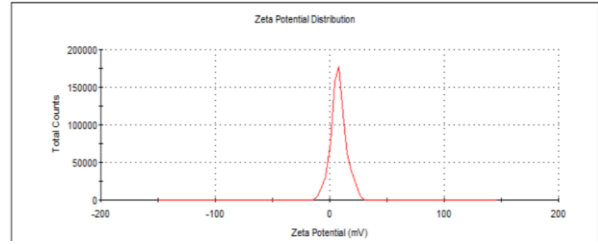
Örnekler	Zeta Potansiyeli (mV)	Boyut (nm)
1 mM J-AgNPs	7,70	170
3 mM J-AgNPs	7,76	124,4
5 mM J-AgNPs	8,24	116,3
10 mM J-AgNPs	7,33	125,1
20 mM J-AgNPs	7,57	139,5

Şekil 5'te jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin FESEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, elde edilen nanopartiküllerin küresel formda olduğu ve Ag derişiminin artması ile daha fazla AgNPs'nin görüntülediği tespit edilmiştir. Ayrıca SEM görüntülerinden, sentezlenen AgNPs'lerin herhangi bir kümelenme ya da aglomerasyon olmadan tekdüze bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçta stabilizatör olarak jelatinin etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 6'da 10 mM J-AgNPs grubunun daha yüksek büyütmelede FESEM görüntüsü ve bunun yanı sıra FESEM görüntüsü üzerinden alınan EDS analizi verilmiştir. Yüksek büyütmeledeki FESEM görüntülerinden, J-AgNPs'lerin küresel görüntüsü ve düzgün dağılımı daha iyi anlaşılmaktadır. EDS analizinde J-AgNPs'lerin elementel olarak karbon, azot, oksijen ve gümüş içerdiği görülmektedir. AgNPs'lerin EDS spektrumu, Ag ve tüm beklenen elementlerin varlığını göstermektedir. Özellikle 3 keV'de güçlü sinyaller incelendiğinde, bunlar Ag atomlarına ait olduklarının ve jelatinin indirgeme ajanı olarak kullanılmasıyla oluşan metal AgNPs'lere ait olduğu belirlenmiştir (Anjum *et al.* 2017; Gün Gök *et al.* 2021b). Bunun yanı sıra, EDS analizi ile, sentezlenen J-AgNPs'lerin herhangi bir yabancı madde içermediği de gösterilmiştir. C, O ve N pikleri de jelatininin AgNPs sentezi sırasında kullanıldığının kanıtıdır.

Zeta Potential (mV): 7,70  
Zeta Deviation (mV): 6,75  
Conductivity (mS/cm): 0,627

Peak 1: 7,70 100,0 6,75  
Peak 2: 0,00 0,0 0,00  
Peak 3: 0,00 0,0 0,00

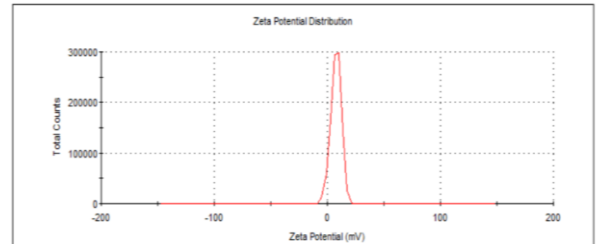
Result quality : Good



Zeta Potential (mV): 7,76  
Zeta Deviation (mV): 4,64  
Conductivity (mS/cm): 0,843

Peak 1: 7,76 100,0 4,64  
Peak 2: 0,00 0,0 0,00  
Peak 3: 0,00 0,0 0,00

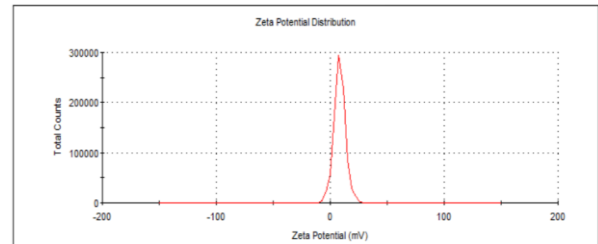
Result quality : Good



Zeta Potential (mV): 8,24  
Zeta Deviation (mV): 5,17  
Conductivity (mS/cm): 1,13

Peak 1: 8,24 100,0 5,17  
Peak 2: 0,00 0,0 0,00  
Peak 3: 0,00 0,0 0,00

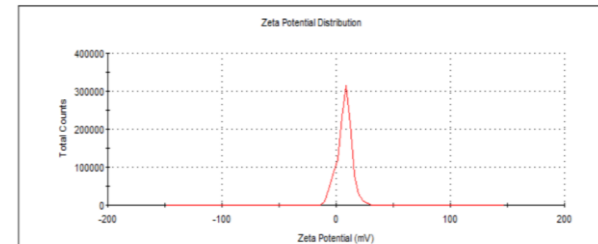
Result quality : Good



Zeta Potential (mV): 7,33  
Zeta Deviation (mV): 6,42  
Conductivity (mS/cm): 1,64

Peak 1: 7,33 100,0 6,42  
Peak 2: 0,00 0,0 0,00  
Peak 3: 0,00 0,0 0,00

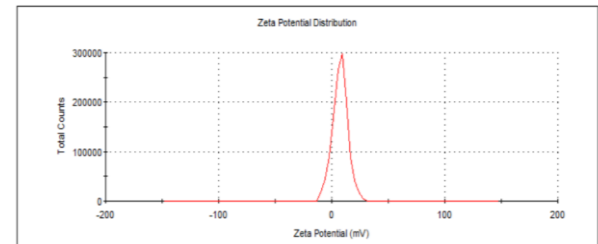
Result quality : Good



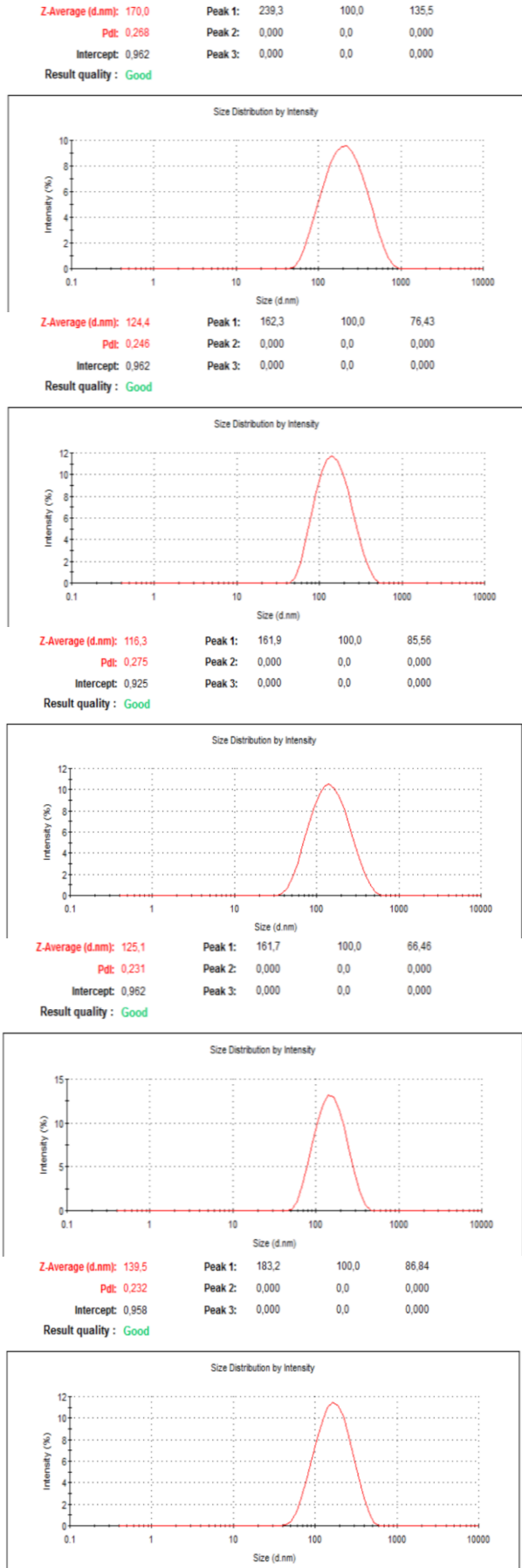
Zeta Potential (mV): 7,57  
Zeta Deviation (mV): 6,73  
Conductivity (mS/cm): 2,88

Peak 1: 7,57 100,0 6,73  
Peak 2: 0,00 0,0 0,00  
Peak 3: 0,00 0,0 0,00

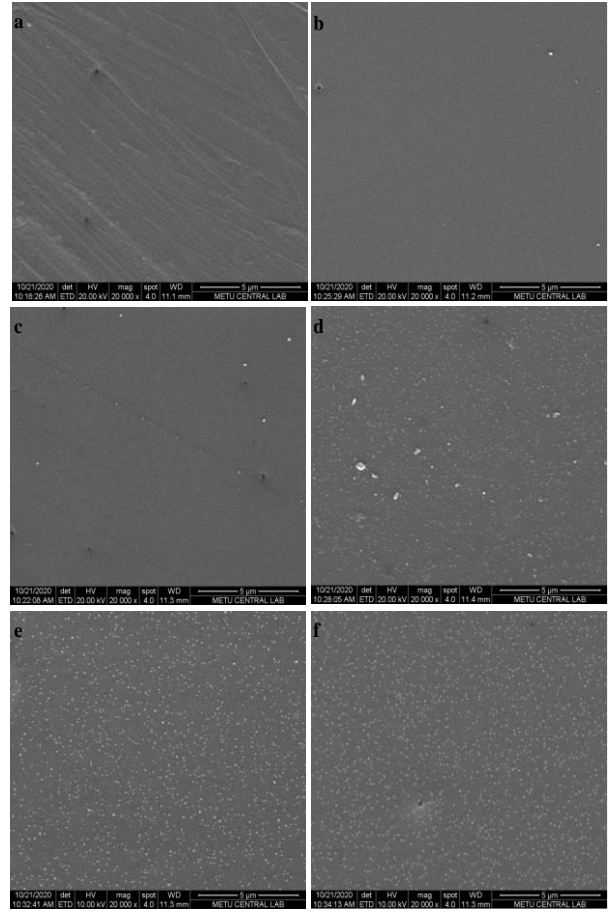
Result quality : Good



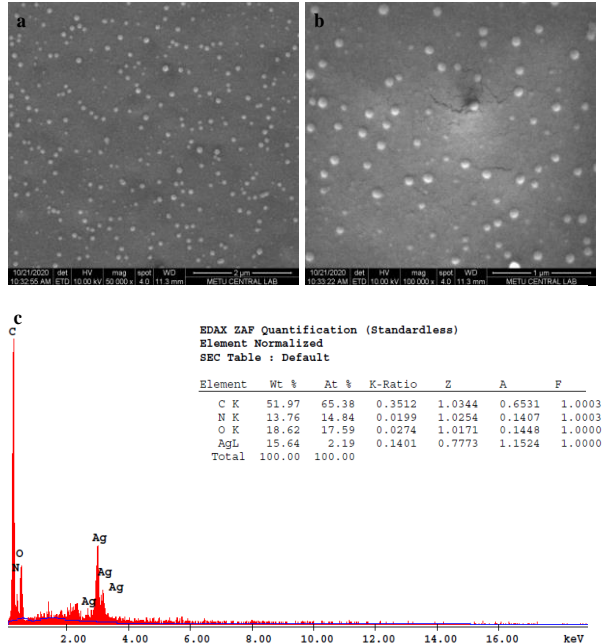
**Şekil 3.** J-AgNPs'lerin zeta-potansiyel dağılımları (üstten alta doğru: 1, 3, 5, 10 ve 20 mM J-AgNPs)



Şekil 4. J-AgNPs'lerin zeta-boyut dağılımları (üstten alta doğru: 1, 3, 5, 10 ve 20 mM J-AgNPs)



Şekil 5. Jelatinin (a) ve sentezlenen J-AgNPs'lerin FESEM görüntüleri (b: 1 mM, c: 3 mM, d: 5 mM, e: 10 mM ve f: 20 mM)

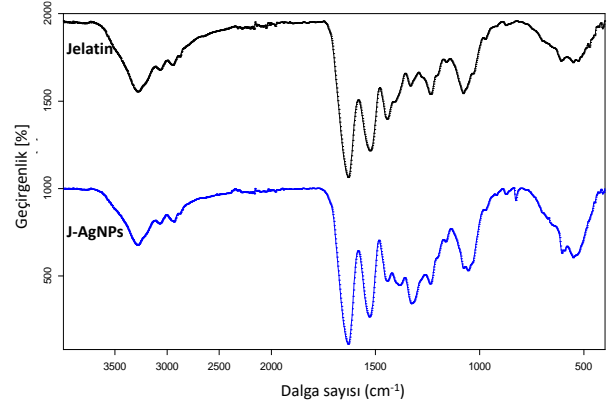


Şekil 6. 10 mM J-AgNPs grubun farklı büyütmelede FESEM görüntüleri (a, b) ve FESEM görüntüsü üzerinden elde edilen EDS analizi (c)



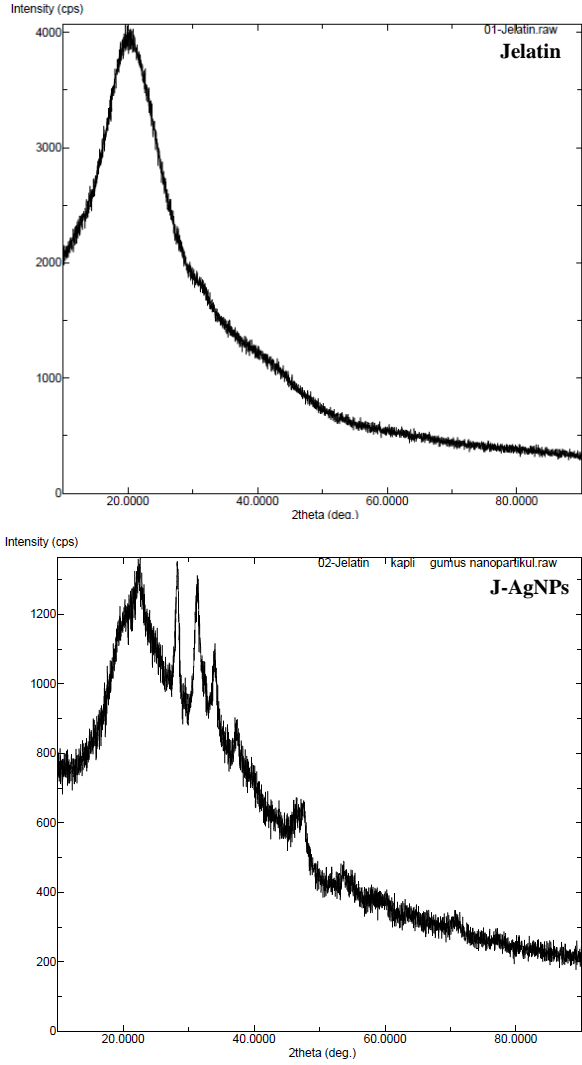
### 3.3. J-AgNPs'lerin Kimyasal ve Kristal Yapılarının İncelenmesi

J-AgNPs'lerin yüzey kimyası, AgNPs'lerin jelatin ile kaplandığını kanıtlamak için FTIR spektroskopisi kullanılarak araştırılmış ve Şekil 7'de jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin FTIR spektrumları verilmiştir. Proteinler, amit bağları ile birbirine bağlanmış amino asitlerden oluşmaktadır. Polipeptit ve protein tekrar birimleri, dokuz karakteristik kızılötesi (IR) absorpsiyon bandına yol açmaktadır (amit A, B ve I-VII) (Kong and Yu 2007). Amid bantları, peptid bağının farklı titreşim modlarını temsil etmektedir. IR spektrumlarında jelatinin absorpsiyon bantları amit bandı bölgesinde yer almaktadır. Amit-I, COO gruplarının C=O gerilmeleri ile ilgilidir. Amit-II NH gruplarının titreşimini ve CN gruplarının gerilme titreşimlerini temsil etmekte ve Amit-III, bağlı amitin CN ve NH gruplarının düzlemindeki titreşimleri ile ilgilidir (Nur Hanani *et al.* 2011). Orijinal jelatinin FTIR spektrumuna baktığımızda,  $1657\text{ cm}^{-1}$ 'deki bant, amid I'in kuvvetli C=O gerilmesine karşılık gelmektedir.  $1527\text{ cm}^{-1}$ 'deki bant, amid II'nin NH bükülmesi ve CN gerilmesine ve  $1236\text{ cm}^{-1}$ 'deki pik de amit III'ün NH bükülmesi ve CN gerilmesine atfedilmektedir.  $1333\text{-}1444\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler ise metil grubunun simetrik ve asimetrik gerilmelerinden kaynaklanmaktadır.  $2870$  ve  $2959\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikler, C-H gruplarından ve  $3284\text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş tepe O-H gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır (Mohan *et al.* 2014). Bu piklerin hepsi J-AgNPs'lerin spektrumunda da görülmüştür. Bu piklerin J-AgNPs'nin yapısında da olması jelatinin AgNPs'lerin çevresinde olduğunu kanıtlar. Bunun yanı sıra, jelatin spektrumundan farklı olarak, J-AgNPs spektrumunda  $1385\text{ cm}^{-1}$  ve  $827\text{ cm}^{-1}$ 'de sırasıyla karboksilat ve amin tuzu piklerinin oluştuğu görülmüştür (Gün Gök *et al.* 2020). Jelatinin gümüş ile karıştırılması ve ısıtılması ile açığa çıkan karboksilat grupları ( $\text{COO}^-$ ) gümüşün AgNPs'lere indirgenmesinde görev almaktadır. FTIR analizi ile, gümüş iyonlarının jelatin tarafından AgNPs'lere indirgeme mekanizması aydınlatılmıştır.



Şekil 7. Jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin (10 mM) FTIR spektrumları

Şekil 8'de jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin XRD spektrumları verilmiştir. Jelatinin XRD spektrumuna baktığımızda,  $15^\circ$  ve  $25^\circ$  arasındaki geniş tepe, jelatinin amorf ve sarmal yapısından kaynaklanmaktadır (Luo *et al.* 2019). Bu geniş pik kaplama ajanı olarak jelatinin kullanıldığından dolayı J-AgNPs'lerin XRD spektrumunda da vardır. Ancak bu geniş tepe noktasının yanında, J-AgNPs'lerin XRD spektrumunda,  $37.11^\circ$ ,  $47.57^\circ$ ,  $58.9^\circ$  ve  $70.7^\circ$  değerlerinde dört kırınım zirvesi gözlemlenmiştir. Gözlemlenen XRD pikleri metalik gümüşün kristal yapısının (111), (200), (220) ve (311) kristalografik düzlemlerine karşılık gelmektedir (Mohan *et al.* 2014; Luo *et al.* 2019; Gün Gök *et al.* 2021a). Bu sonuçta, jelatin ile gümüşün AgNPs'lere indirgenişinin göstergesidir.

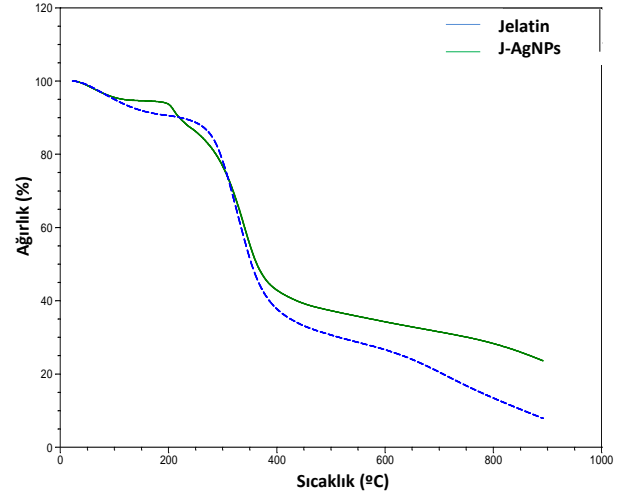


Şekil 8. Jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin (10 mM) XRD spektrumları

### 3.4. J-AgNPs'lerin Termal Özellikleri

Orijinal jelatinin ve J-AgNPs'lerin termal özellikleri TGA ile incelenmiş ve elde edilen TGA termogramları Şekil 9'da verilmiştir. TGA sonuçlarına göre hem jelatin hem de J-AgNPs örnekleri 3 basamakta termal bozunmaya uğramıştır. Başlangıçta, jelatinin yapısında bulunan nemin buharlaşması nedeniyle 25-200 °C sıcaklıklarda saf jelatin ve J-AgNPs için ağırlığın %5-13'ü azalmıştır. İkinci termal bozunma adımı, 200-550 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. Bu basamakta, polimer matris olarak kullanılan jelatinin termal ayrışmasına bağlı olarak, saf jelatin için yaklaşık 324 °C'lik ve J-AgNPs için 340 °C'lik bir maksimum ayrışma sıcaklığında büyük bozulma basamağı gözlemlenmiştir (Bang *et al.* 2019). 900 °C'nin sonunda arta kalan miktarlara baktığımızda ise, saf jelatin için %8 civarında iken, J-AgNPs örneği

için kalıntı miktarının %23 civarında olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanarak, jelatinin termal stabilitesi polimere AgNO<sub>3</sub> eklenmesiyle değiştiği görülmüştür. Ayrıca yapıdaki Ag nedeniyle 900 °C sonunda artan kalıntı miktarında artış olmuştur. Bizim bulgumuza benzer sonuçlar çeşitli kaplama ajanlarıyla AgNPs'lerin sentezlendiği diğer çalışmalarda da rapor edilmiştir (Goel *et al.* 2019; Gün Gök *et al.* 2021a).



Şekil 9. Jelatinin ve sentezlenen J-AgNPs'lerin (10 mM) TGA termogramları

## 4. Sonuç

Bu çalışmada, yeşil sentez yöntemiyle, jelatin polimerinin indirgeyici ve kaplama ajanı olarak kullanılmasıyla farklı derişimlerde J-AgNPs'ler başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Gümüş nitrat çözeltisinin konsantrasyonunun artmasıyla J-AgNPs oluşumun arttığı yapılan UV-Vis spektrofotometre analizleriyle belirlenmiştir. Sentezlenen J-AgNPs'lerin zeta-potansiyellerinin pozitif olduğu bulunmuştur, buda sentezlenen nanopartiküllerin sulu çözeltide kararlı olduğunu göstermektedir. Sentezlenen J-AgNPs'lerin zeta-boyutlarının 116,3-170 nm nm arasında değiştiği yapılan analizlerle bulunmuştur. Yapılan SEM analizleri ile J-AgNPs'lerin küresel formda olduğu görülmüş ve EDS analizi ile yapıdaki gümüş varlığı kanıtlanmıştır. FTIR analizlerine göre, jelatinin yapısında bulunan COOH gruplarının COO-'ye dönüştüğü gösterilmiş ve bu grupların gümüş iyonunun gümüş nanopartiküllere indirgenmesinden sorumlu olduğu düşünülmektedir. XRD analizleri ile metalik



gümüşün kristalografik düzlemlerine karşılık gelen kırınımalar görülmüş ve jelatin ile gümüş iyonlarının AgNPs'lere indirgenliği görülmüştür. TGA analizleri ile J-AgNPs'lerin orijinal jelatine göre termal kararlılığının arttığı ve AgNPs'lerin varlığı sayesinde 900 °C sonunda arta kalan miktarda artış olduğu görülmüştür. İleri çalışmalarla antimikrobiyal ve sitotoksik etkileri incelenecek olan J-AgNPs'lerin yara örtü materyallerinde biyoaktif ajan olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi bünyesinde bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı Kırıkkale Üniversitesi teşekkür ederim.

## 5. Kaynaklar

- Akbulut, M., Reddy, N.K., Bechtloff, B., Koltzenburg, S., Vermont, J. and Prudhomme, R.K., 2008. Flow-induced conformational changes in gelatin structure and colloidal stabilization. *Langmuir*, **24**, 9636-9641. <https://doi.org/10.1021/la800487b>
- Anjum, S., Gupta, A., Sharma, D., Kumari, S., Sahariah, P., Bora, J., Bhan, S. and Gupta, B., 2017. Antimicrobial nature and healing behavior of plasma functionalized polyester sutures. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, **32(3)**, 263-279. <https://doi.org/10.1177/088391151666866>
- Aramwit, P., Bang, N., Ratanavaraporn, J. and Ekgasit, S., 2014. Green synthesis of silk sericin-capped silver nanoparticles and their potent anti-bacterial activity. *Nanoscale Research Letters*, **9**, 79. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-79>
- Bang, Y.J., Shankar, S. and Rhim, J.W., 2019. In situ synthesis of multi-functional gelatin/resorcinol/silver nanoparticles composite films. *Food Packaging and Shelf Life*, **22**, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100399>
- Chaloupka, K., Malam, Y. and Seifalian, A.M., 2010. Nanosilver as a new generation of nanoparticle in biomedical applications. *Trends in Biotechnology*, **28**, 580-588. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.07.006>
- Chen, X. and Schluesener, H.J., 2008. Nanosilver: a nanoparticle in medical application. *Toxicology Letter*, **176**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2007.10.004>
- Darroudi, M., Ahmad, M.B., Abdullah, A.H. and Ibrahim, N.A., 2011. Green synthesis and characterization of gelatin-based and sugar-reduced silver nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, **6**, 569-574. <https://doi.org/10.2147/IJN.S16867>
- Dos Santos, C.A., Seckler, M.M., Ingle, A.P., Gupta, I., Galdiero, S., Galdiero, M., Gade, A., Rai, M., 2014. Silver nanoparticles: therapeutic uses, toxicity, and safety issues. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **103**, 1931-1944. <https://doi.org/10.1002/jps.24001>
- Farhadi, S., Ajerloo, B. and Mohammadi, A., 2017. Green Biosynthesis of Spherical Silver Nanoparticles by Using Date Palm (Phoenix Dactylifera) Fruit Extract and Study of Their Antibacterial and Catalytic Activities. *Acta Chimica Slovenica*, **64**, 129-143. <https://doi.org/10.17344/acsi.2016.2956>
- Goel, A., Meher, M.K., Gupta, P., Gulati, K., Pruthi, V. and Poluri, K.M., 2019. Microwave assisted κ-carrageenan capped silver nanocomposites for eradication of bacterial biofilms. *Carbohydrate Polymers*, **206**, 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.033>
- Gün Gök, Z., Günay, K., Arslan, M., Yiğitoğlu, M. and Vargel, İ., 2020. Coating of modified poly(ethylene terephthalate) fibers with sericin-capped silver nanoparticles for antimicrobial application. *Polymer Bulletin*, **77**, 1649-1665. <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02820-0>
- Gün Gök, Z., Karayel, M. and Yiğitoğlu, M., 2021a. Synthesis of carrageenan coated silver nanoparticles by an easy green method and their characterization and antimicrobial activities. *Research on Chemical Intermediates*, <https://doi.org/10.1007/s11164-021-04399-6>
- Gün Gök, Z., Yiğitoğlu, M., Vargel, İ., Şahin, Y. and Alçığır, M.E., 2021b. Synthesis, characterization and wound healing ability of PET based nanofiber dressing material coated with silk sericin capped-silver nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, **259**, 124043. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124043>
- Inyang, M., Gao, B., Wu, L., Yao, Y., Zhang, M. and Lin, L., 2013. Filtration of engineered nanoparticles in carbon-based fixed bed columns. *Chemical Engineering Journal*, **220**, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.054>
- Jain, P. and Pradeep, T., 2005. Potential of silver nanoparticle-coated polyurethane foam as an antibacterial water filter. *Biotechnology and*

- Bioengineering*, **90**, 59-63. <https://doi.org/10.1002/bit.20368>
- Khanh, L.L., Truc, N.T., Dat, N.T., Nghi, N.T.P., Toi, V., Hoai, N.T.T., Quyen, T.N., Loan, T.T.T. and Hiep, N.T., 2019. Gelatin-stabilized composites of silver nanoparticles and curcumin: characterization, antibacterial and antioxidant study. *Science and Technology of Advanced Materials*, **20**, 276-290. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1585131>
- Kong, J. and Yu, S., 2007. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, **39**, 549-59. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>
- Lavanya, K., Kalaimurugan, D., Shivakumar, M.S. and Venkatesan, S., 2020. Gelatin Stabilized Silver Nanoparticle Provides Higher Antimicrobial Efficiency as Against Chemically Synthesized Silver Nanoparticle. *Journal of Cluster Science*, **31**, 265-275. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01644-2>
- Lee, H., Yeo, S. and Jeong, S., 2003. Antibacterial effect of nanosized silver colloidal solution on textile fabrics. *Journal of Materials Science*, **8**, 2199-2204. <https://doi.org/10.1023/A:1023736416361>
- Luo, L.J., Lin, T.Y., Yao, C.H., Kuo, P.Y., Matsusaki, M., Harroun, S.G., Huang, C.C. and Lai, J.Y., 2019. Dual-functional gelatin-capped silver nanoparticles for antibacterial and antiangiogenic treatment of bacterial keratitis. *Journal of Colloid and Interface Science*, **536**, 112-126. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.10.041>
- Mohan, S., Oluwafemi, S.O., George, S.C., Jayachandran, V.P., Lewu, F.B., Songca, S.P., Kalarikkal, N. and Thomas, S., 2014. Completely green synthesis of dextrose reduced silver nanoparticles, its antimicrobial and sensing properties. *Carbohydrate Polymers*, **106**, 469-474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.008>
- Naten, Z., Moloto, M.J., Mubiayi, P.K. and Sibiyi, P.N., 2018. Green synthesis of chitosan capped silver nanoparticles and their antimicrobial activity. *MRS Advances*, **3(42-43)**, 1-13. <https://doi.org/10.1557/adv.2018.368>
- Nur Hanani, Z.A., Roos, Y.H. and Kerry, J.P., 2011. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic analysis of biodegradable gelatin films immersed in water. International Congress on Engineering and Food, Proceedings, 1-4. <http://www.icef11.org/content/papers/aft/AFT988.pdf>
- Rai, M., Yadav, A. and Gade, A., 2009. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, **27**, 76-83. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Raveendran, P., Fu, J. and Wallen, S.L., 2003. Completely green synthesis and sta-bilization of metal nanoparticles. *Journal of American Chemical Society*, **125**, 13940-13941. <https://doi.org/10.1021/ja029267j>
- Ravindra, S., Murali Mohan, Y., Narayana Reddy, N. and Mohana Raju, K., 2010. Fabrication of antibacterial cotton fibres loaded with silver nanoparticles via "Green Approach." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **367**, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.06.013>
- Rujitanaroj, P.O., Pimpha, N. and Supaphol, P., 2008. Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun gelatin fiber mats containing silver nanoparticles. *Polymer*, **49**, 4723-4732. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.08.021>
- Seong, M. and Lee, D.G. 2017. Silver Nanoparticles Against Salmonella enterica Serotype Typhimurium: Role of Inner Membrane Dysfunction. *Current Microbiology*, **74(6)**, 661-670. <https://doi.org/10.1007/s00284-017-1235-9>
- Sharma, V.K., Yngard, R.A. and Lin, Y., 2009. Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities. *Advances in Colloid and Interface Science*, **145**, 83-96. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.002>
- Shin, Y., Bae, I.T. and Exarhos, G.J., 2009. "Green" approach for self-assembly of platinum nanoparticles into nanowires in aqueous glucose solutions. *Colloids Surface A*, **348**, 191-195. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.07.013>
- Sivera, M., Kvitek, L. Soukupova, J., Panacek, A., Prucek, R. Vecerova, R. and Zboril, R., 2014. Silver Nanoparticles Modified by Gelatin with Extraordinary pH Stability and Long-Term Antibacterial Activity. *Plos One*, **9**, 103675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103675>
- Thakkar, K.N., Mhatre, S.S. and Parikh, R.Y., 2010. Biological synthesis of metallic nanoparticles.

*Nanomedicine*, **6**, 257-262.  
<https://doi.org/10.1016/j.nano.2009.07.002>

Yue, X., Lin, H., Yan, T., Zhang, D., Lin, H. and Chen, Y.,  
2014. Synthesis of silver nanoparticles with sericin  
and functional finishing to cotton fabrics. *Fibers and  
Polymers*, **15**, 716-722.  
<https://doi.org/10.1007/s12221-014-0716-8>