

# NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 11 Sayı: 3 2022

Volume: 11 Issue: 3 2022



[www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi](http://www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi)  
[www.ohu.edu.tr/facultyofengineering](http://www.ohu.edu.tr/facultyofengineering)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh>



**Dergi Sahibi/Journal Owner**

Prof. Dr. Murat Barut

**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan Vekili, Türkiye/  
Niğde Ömer Halisdemir University, Acting Dean of Engineering Faculty, Turkey**

**Baş Editör/Editor-in-Chief**

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

**Yardımcı Editörler/Associate Editors**

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Doç. Dr./*Assoc. Prof. Dr.* Firdevs Uysal

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Dr. Öğr. Üyesi/*Assist. Prof. Dr.* Ahmet Şakir Dokuz,

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*



**Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board**

Prof. Dr. Adnan Görür

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Metin Yıldırım

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Murat Gökçek

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/*Yıldırım Beyazıt University, Turkey*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University University of Hubei, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Turkey*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Turkey*

Prof. Dr. Farid Abed

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Ghassan Abu-Lebdeh

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Serter Atabay

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Doç. Dr. Kazi Fattah

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye/*Tekirdağ Namık Kemal University, Turkey*

Prof. Dr. Filipe Figueiredo

Aveiro Üniversitesi, Portekiz/*Aveiro University, Portugal*



### Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/Editor-in-Chief)	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Mustafa Korkaç (Yardımcı Editör/Co-Editor)	Jeoloji Mühendisliği Geological Engineering
Doç. Dr. Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/Co-Editor)	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/Co-Editor)	Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering
Prof. Dr. Fehiman Çiner	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Prof. Dr. Hakan Erdem	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Saffet Ayasun	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Yonca Yüceer	Gıda Mühendisliği Food Engineering
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği Industrial engineering
Prof. Dr. Murat Barut	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Prof. Dr. Seval Kutlu Akal Solmaz	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Prof. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Prof. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği Geomatics Engineering
Doç. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical Electronics Engineering
Doç. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği Geomatics Engineering
Doç. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği Mechatronics Engineering
Doç. Dr. Serkan Çayırılı	Maden Mühendisliği Mining Engineering
Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh	Makine Mühendisliği Mechanical Engineering
Doç. Dr. Hatice İnan	Çevre Mühendisliği Environmental Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği Civil Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği Manufacturing Engineering
Dr. Öğr. Üyesi Casen Panaitescu	Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği Perolium and Natural Gas Engineering



### Mizanpaj Editörleri/Composition Layout Editors

Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>

### İngilizce Dil Editörleri/English Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>

### Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language Editors

Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>



### Yazışma Adresi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü, 51240 Niğde/Türkiye

### Correspondence Address

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences Publishing Coordinatorship, 51240 Niğde/Turkey

E-posta/E-mail: [mbdergisi@ohu.edu.tr](mailto:mbdergisi@ohu.edu.tr)

İnternet sayfası/Web page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>

### Dergi Bilgisi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, NÖHÜ Mühendislik Fakültesi tarafından 2012 yılından beri Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış Orijinal Araştırma Makaleleri ve Derleme Makaleleri yayınlayan hakemli bir dergidir. Dergi, hiçbir aşamada yayın ücreti talep etmemektedir ve DergiPark sistemi üzerinden ücretsiz erişimli bir dergidir.

### Publication information

Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences is a peer-reviewed journal that has published Original Research Articles and Review Articles written in Turkish or English since 2012 by NOHU Faculty of Engineering. The journal does not require any publication fee at any stage and is a free access journal from the DergiPark system.

## Özetlenme, Dizinlenme/Abstracting, Indexing



## Erişilebilirlik /Accessibility



## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

### Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Antep fıstığının derin öğrenme ile dış kabuk rengine göre sınıflandırılması

*Classification of pistachios based on outer shell color using deep learning*

**Hakan Aktaş**

461-466

Araştırma Makalesi/Research Article

Yerel faz niceleme ile ayak görüntülerinin kişi, yaş ve cinsiyete göre sınıflandırılması

*Classification of foot images according to person, age, and gender with the local phase quantization*

**Emrah Aydemir, Mustafa Shwaish Al-Azzawi**

467-476

Research Article/Araştırma Makalesi

A high order proximity measure for linear network embedding

*Ağ gömülümü için yüksek boyutlu yakınsaklık ölçüsü*

**Mustafa Coşkun**

477-483

Review Article/Derleme Makalesi

A survey of recent studies on COVID-19 outbreak prediction using statistical and machine learning methods

*İstatistiksel ve makine öğrenme yöntemleri ile COVID-19 salgın tahmini üzerine yapılan güncel çalışmaların incelemesi*

**Umut Ahmet Çetin, Fatih Abut**

484-495

Araştırma Makalesi/Research Article

ESA tabanlı göz durumu tespitinde görüntü ön işleme yöntemlerinin etkisi

*The effect of image preprocessing methods in CNN-based eye state detection*

**İsmail Kayadibi, Gür Emre Güraksın, Uçman Ergün**

496-505

Araştırma Makalesi/Research Article

İmar uygulamalarında dağıtımın veri madenciliği yöntemi kullanılarak yapılması

*Distribution in zoning practices using data mining method*

**İbrahim Karaaslan, Nuh Azgınoğlu, Murat Taşyürek**

506-512

Araştırma Makalesi/Research Article

SURF ve MSER kombinasyonu ile kopya taşı sahteciliği algılama

*Copy move forgery detection with SURF and MSER combination*

**Yıldız Aydın, Funda Akar**

513-521



## Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Sivas ilinin iklim değişikliği projeksiyonları

*Climate change projections of Sivas province*

**Sefa Furkan Selçuk, Meltem Sarıoğlu Cebeci, Orhan Cerit, Burcu Çirci Selçuk,  
Bünyamin Karagözoğlu**

522-533

Araştırma Makalesi/Research Article

Mann-Kendall trend analizi ile Sivas ilindeki sıcaklık ve yağış trendlerinin belirlenmesi

*Determination of temperature and precipitation trends in Sivas by Mann-Kendall trend analysis*

**Can Bülent Karakuş, Ülker Aşlı Güler**

534-544

Araştırma Makalesi/Research Article

Anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde azot giderme performansına kademeli besleme sayısının etkisi

*Effect of number of step-feed on nitrogen removal performance in anoxic-aerobic sequencing batch reactor*

**Engin Gürtekin**

545-549

Araştırma Makalesi/Research Article

Tunceli biyolojik atıksu arıtma tesisinde gastrointestinal patojenlerin belirlenmesi

*Determination of gastrointestinal pathogens in Tunceli biological wastewater treatment plant*

**Murat Topal, Zülal Aşçı Toraman, E. Işıl Arslan Topal, Ceren Sel Süer, Erdal Öbek**

550-556

Araştırma Makalesi/Research Article

Şişelenmiş sularda ve tatlı su çeşme sularında trihalometan konsantrasyonları

*Trihalomethane concentrations in bottled water and fresh water taps*

**Arzu Ulvi, Senar Aydın, Mehmet Emin Aydın**

557-566

## Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Biyomedikal uygulamaları için vücut içi geniş bantlı İD-EDDK beslemeli SBT bant anten analizi

*In-body wideband CB-CPW Fed ISM band antenna analysis for biomedical applications*

**Seda Habergötüren Ateş, Tayfun Okan, Nursel Akçam**

567-573

Araştırma Makalesi/Research Article

Yeni bir otomatik yüz tanıma sistemi

*A novel automatic face recognition system*

**Engin Cemal Mengüç, Nurettin Acır**

574-583





Araştırma Makalesi/Research Article

Ritmik desen üreteçleri için Rayleigh osilatörünün fraksiyonel versiyonu ve devre sentezi

*The fractional version and the circuit synthesis of the Rayleigh oscillator for the rhythmic pattern generators*

**Nimet Korkmaz, İbrahim Ethem Saçu**

584-591

Derleme Makalesi/Review Article

Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi

*Investigation of the parameters affecting the total efficiency of solar energy panels designed with half and full photovoltaic cells*

**Sevgi Duman, Mustafa Alçı**

592-600

Araştırma Makalesi/Research Article

Batarya sağlık durumunun makine öğrenmesi ile kestirimi

*Determining battery health with machine learning*

**Emine Çavuş, İdris Sancaktar**

601-610

Araştırma Makalesi/Research Article

Yağlı tip transformatörlerde hibrit bir soğutma sistem tasarımının FEM ve CFD analizleri

*FEM and CFD analysis of a hybrid cooling system design in oil-type transformers*

**Murat Tören**

611-619

## **Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Konjoint analizi ile Kocaeli ilinde konut seçiminin incelenmesi

*Examination of housing selection in Kocaeli province with conjoint analysis*

**Gülşen Akman, Leyla Şimşek**

620-625

## **Gıda Mühendisliği / Food Engineering**

Derleme Makalesi/Review Article

Prediktif modellemelerin gıdalarla ilgili mikrobiyal çalışmalarda kullanımı

*The use of predictive models in food related microbial studies*

**Cengiz Çetin, Suzan Öztürk Yılmaz**

626-634



Derleme Makalesi/Review Article

Shiitake mantarı (*Lentinula edodes*) ve eşsiz biyokaktif bileşeni: Lentinan

*Shiitake mushroom (Lentinula edodes) and its unique bioactive compound: Lentinan*

**Emine Nakilcioğlu, Selen Seyhan**

635-641

Research Article/Araştırma Makalesi

Examination of rehydration ratio, color properties and drying kinetics of microwave dried garlic (*Allium sativum* L.)

*Mikrodalga'da kurutulan sarımsağın (Allium sativum L.) rehidrasyon oranı, renk değerleri ve kurutma kinetiğinin incelenmesi*

**Fatma Coşkun Topuz**

642-646

## Harita Mühendisliği / Geomatic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Frekans oranı, kanıt ağırlığı ve lojistik regresyon yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması

*Comparison of landslide susceptibility maps using frequency ratio, weight of evidence and logistic regression methods based on GIS*

**Aslan Cihat Başara, Yasemin Şişman**

647-660

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı regresyon modelleriyle kestirilen zenit troposferik gecikmelerin değerlendirilmesi

*Evaluation of zenith tropospheric delays estimated by different regression models*

**Ali Utku Akar, Cevat İnal**

661-671

Araştırma Makalesi/Research Article

Otonom araçlarda çoklu GNSS uydu sistemleri kullanımının konum doğruluğuna etkisinin araştırılması

*Investigation of the effect of multiple GNSS satellite systems usage on position accuracy in automated vehicles*

**Ahmet Can Uçarlı, Veli İlçi, Kerem Par, Ali Ufuk Peker**

672-680

Araştırma Makalesi/Research Article

Ankara / Mamak ilçesinde taşınmaz değer haritalarının bulanık mantık yöntemiyle irdelenmesi

*Examination of real estate value maps by fuzzy logic method in Ankara / Mamak district*

**Merve Girgenç, Tansu Alkan, Süleyman Savaş Durduran**

681-688

Araştırma Makalesi/Research Article

Arazi yönetimi paradigması çerçevesinde Türkiye'de binalar için enerji kimlik belgesi uygulamasının değerlendirilmesi

*Evaluation of energy performance certificate actions for buildings in Turkey within the framework of land management paradigm*

**Mehmet İşiler, Mustafa Yanalak, Mahmut Oğuz Selbesoğlu**

689-705

Review Article/*Derleme Makalesi*

The development of the North Macedonian cadastral system: An overview of the cadastral system

*Kuzey Makedonya kadastro sisteminin gelişimi: Kadastro sistemine genel bakış*

**Edmond Jonuzi, Süleyman Savaş Durduran**

706-712

## **İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering**

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Mechanical and microstructural properties of cement mortars developed with different curing conditions and design parameters

*Farklı kür koşulları ve tasarım parametreleri ile geliştirilen çimento harçlarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri*

**Muhammet Güneş, Hasan Erhan Yücel, Hatice Öznur Öz**

713-726

Review Article/*Derleme Makalesi*

Investigation of boron waste usage in civil engineering applications

*İnşaat mühendisliği uygulamalarında bor atıklarının kullanımının araştırılması*

**Asena Karşlıoğlu, Mehmet İnanç Onur, Eren Balaban**

727-735

Araştırma Makalesi/*Research Article*

CFRP lif takviyesi ile onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi

*Experimental investigation of behaviour of reinforced concrete beam with openings repaired using CFRP sheets*

**Yasin Mohammady, Sıla Yaman, Abdullah Gündoğay, Ceyhun Yüksel,  
Nebyi Asmerom Negash, Hamide Tekeli Kabaş**

736-743

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama

*Performance evaluation of artificial intelligence and heuristic regression methods for rainfall-runoff modelling: An application in Aksu Stream*

**Hasan Törehan Babacan, Ömer Yüksek, Fatih Saka**

744-751

Research Article/*Araştırma Makalesi*

The effect of different viscosity modifying additives on the mechanical and flow properties of self-compacting mortars

*Farklı viskozite düzenleyici katkı maddelerinin kendiliğinden yerleşen harçların mekanik ve akış özelliklerine etkisi*

**Furkan Türk, Murat Saydan, Ülkü Sultan Keskin**

752-757

Araştırma Makalesi/*Research Article*

Mikrodalga ısıtma işlemi uygulanan kaolinin puzolanik aktivitesinin incelenmesi

*Investigation of the pozzolanic activity of microwave heat-treated kaolin*

**Adil Gültekin, Kambiz Ramyar**

758-765



Araştırma Makalesi/Research Article

Savunmasız yol kullanıcıları için yaya yolu hizmet düzeyinin belirlenmesi

*Determining the level of service for vulnerable road users' sidewalk*

**Ayşe Ünal, Meltem Saphıoğlu, Furkan Turgut**

766-775

### **Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering**

Research Article/Araştırma Makalesi

Preparation of high solid loading and low viscosity ceramic slurry for dip-coating method

*Daldırarak kaplama yöntemi için katı yüklemesi yüksek ve viskozitesi düşük seramik kaplama çözeltisinin hazırlanması*

**Bercestte Beyribey, Joshua Persky**

776-780

### **Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering**

Research Article/Araştırma Makalesi

Benefiting from solar energy due to different emissivity levels of multiple glass windows for buildings

*Binalarda farklı yayma oranlarına bağlı olarak çok camlı pencerelerden güneş enerjisinden yararlanma*

**Okan Kon, İsmail Caner**

781-796

Research Article/Araştırma Makalesi

An investigation of the effect of tapered angle and boundary condition on natural frequency of different ceramic coated Ti-6Al-4V alloy with finite element analysis

*Farklı seramik kaplı Ti-6Al-4V alaşımının doğal frekansına konik açı ve sınır koşulunun etkisinin sonlu eleman analizi ile incelenmesi*

**Berkay Ergene, Çağın Bolat**

797-805

Research Article/Araştırma Makalesi

Co-injection filling characterization of the polypropylen packaging by 3-D simulation

*Polipropilen ambalajın eş-enjeksiyon dolum karakteristiğinin 3-B simülasyonu*

**Bekir Yalçın, Ahmet Yılmaz, Zübeyir Gök**

806-812

Research Article/Araştırma Makalesi

CdSO<sub>4</sub>-CdS Composite nanowires synthesized by arc discharge method

*CdSO<sub>4</sub>-CdS Kompozit nanotellerin ark deşarj yöntemi ile sentezi*

**Tugay Üstün, Volkan Eskizeybek, Omar Toumiat, Ahmet Avcı**

813-818



---

## **Malzeme ve Metalürji Mühendisliği / *Materials and Metallurgical Engineering***

---

Research Article/*Araştırma Makalesi*

Usage of acetic acid for boric acid production from boron wastes

*Bor atıklarından borik asit üretiminde asetik asidin kullanımı*

**Emine Yoğurtcuoğlu**

819-825

---

*Araştırma Makalesi/Research Article*

GaAs yarıiletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilmesi ve FLIM tekniği ile yüzey karakterizasyonu

*Fabrication of the micro grooves on GaAs semiconductor surfaces and surface characterization via FLIM technique*

**Sabriye Acikgoz, Hasan Yungevis**

826-837

---



# Antep fıstığının derin öğrenme ile dış kabuk rengine göre sınıflandırılması

## Classification of pistachios based on outer shell color using deep learning

Hakan Aktaş<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Merkez, Niğde, Türkiye

### Özet

Antep fıstığı, ticari değeri yüksek bir ürün olup; Türkiye bu alanda ciddi bir üretim ve ihracat potansiyeline sahiptir. Bu ürünlerin yetiştirilmesi kadar toplanması ve ayıklanması da bir o kadar önemli bir işlemdir. Antep fıstıklarının toplandıktan sonra dış kabuk renklerine göre sınıflandırılması fıstığın pazarlanmasından önce yapılması gereken önemli işlemlerden bir tanesidir. Bu çalışmada Antep fıstığının dış rengine göre ayıklanması için derin öğrenme teknikleri kullanılmıştır. Ayıkla işlemi için gerekli olan veri seti endüstriyel bir deney düzeneği kullanarak elde edilmiştir. AlexNet yapısı, elde edilen bu veri setleri ile eğitilip test edilmiştir. Yine farklı yüzdelerdeki ve sayılardaki eğitim, doğrulama ve test verilerinin test doğruluğuna etkisini araştırmak için iki farklı yüzde (%70,%15,%15 ve %60,%20,%20) ve üç farklı sayıda veri seti için ağ yapısı eğitilmiş ve test edilmiştir. En yüksek test doğruluğu %60,%20,%20 oranlarına ait eğitim, doğrulama ve test için sırasıyla 580x2, 193x2 ve 193x2 adet verinin kullanılması ile %98.44 olarak hesaplanmıştır. Ayıklama işlemi derin öğrenme teknikleri ile yüksek doğruluklarda gerçekleştirilmiş olup; geliştirilen endüstriyel veri seti ile eğitilmiş ağ yapıları endüstriyel ayıklama makinelerinde yüksek doğrulukta çalışabilecek seviyededir.

**Anahtar kelimeler:** Görüntü İşleme, Derin Öğrenme, Antep Fıstığı, Ayıklama Sistemleri

### 1 Giriş

2019 FAO verilerine göre dünya Antep fıstığı üretim alanları itibarıyla ülkemiz, İran'dan sonra ikinci sırada olduğundan hem bölge hem de ülke ekonomisi açısından önem arz etmektedir. Ancak verimi ve ihracatı açısından değerlendirildiğinde aynı başarıyı sağlayamamaktadır. TÜİK verilerine göre 2019/20 üretim döneminde Türkiye'de 80 bin ton Antep fıstığı üretimi gerçekleşirken Antep fıstığı ihracatı 2600 ton olarak gerçekleşmiştir. Üretim ve ihracat arasındaki farkın temel nedeni, üreticilerin modern üretim, işleme ve muhafaza tekniklerini doğru bir şekilde kullanmaması ve Antep fıstığını işleyecek tam entegre modern tesislerin sayısının yetersiz olmasıdır [1]. Antep fıstığının hasadından pazara ulaşıncaya kadar tüm işleme aşamalarında önemli kayıplar olabilmektedir. Bu kayıpların son yıllarda yeni teknolojilerle azaltılması mümkün olup üretim maliyetinin düşmesine olanak sağlamaktadır [2].

### Abstract

Pistachio is a product with high commercial value and Turkey has a serious production and export potential in this field. The harvesting and sorting of these products is as important process as their cultivation. Classification of pistachios according to their outer shell color after harvest is one of the important processes that must be done before presenting the pistachio to market. In this study, deep learning techniques were used to sort the pistachios according to their outer color. The data set required for the extract process was obtained using an industrial experimental setup. The AlexNet structure was trained and tested with these data sets. The network structure was trained and tested for two different percentages (70%, 15%, 15% and 60%, 20%, 20%) and three different data numbers to investigate the effect of training, validation and test data in different percentages and numbers on test accuracy. The highest test accuracy was calculated as 98.44% by using of 60%, 20%, 20% percentages and 580x2, 193x2 and 193x2 data for training, validation and testing, respectively. Classification process has been performed with deep learning techniques with high accuracy. Network structures trained with the developed industrial data set are at a level to obtain high accuracy in industrial sorting machines.

**Keywords:** Image Processing, Deep Learning, Pistachio, Sorting Systems

Hasat olgunluğuna gelmiş Antep fıstığı meyvelerinde renk değişimi gerçekleşmektedir. Olgun taze Antep fıstığının dış kabuğu mor olup, %78 oranında nem barındırmaktadır. Hasat sonrasında mor kabuklu Antep fıstığı meyvelerine kurutma ve kavlama işlemleri uygulanmaktadır. Kurutma işlemi mekanik kurutucular ile yapılabildiği gibi açık havada serilerek de yapılabilmektedir. Kavlatma ise meyvedeki mor kabuğun sert kabuktan ayrılarak çıkarılması işlemi olup depolama sonrasında yapılmaktadır [3].

Olgunlaşmamış Antep fıstıklarının kurutma ve kavlatma işleminde mor kabuklu meyvelerde mekanik zararların ve fizyolojik bozuklukların artması ürün kalitesini etkilediğinden doğru zamanda hasat edilmesi önem arz etmektedir [2]. Ancak Antep fıstığında hasattan sonra elde edilen tam olgunlaşmış düşük kalite ürün ile "boz" fıstık olarak adlandırılan ürün birbirinden farklıdır. Hasattan bir ay önce ürün tam olgunlaşmadan dalından toplanan ve rengi çok yeşil olan boz fıstık, aroması yüksek olduğundan tatlı

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: haktas@ohu.edu.tr (H. Aktaş)

Geliş / Received: 28.01.2022 Kabul / Accepted: 04.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1064522

sektöründe kullanılan kaliteli bir üründür [4]. Düşük kalite ürünün ise bahçenin tamamı hasat olgunluğuna geldiğinde kısmen oluştuğu görülmektedir. Tüm meyveler aynı anda olgunlaşmadığı için hasat edilen yığın içinde rengi henüz mora dönmemiş meyveler de bulunmaktadır. Bu rengin oluşmaması genellikle boş veya yeterli olgunlukta olmadığına göstergesidir [2].

Kurutma işleminin mor kabuklarına zarar vermeden hızlı bir şekilde yapılması küf gelişimini önleme açısından büyük önem arz etmektedir. Hasat sonrasında kurutma ve kavlatma işlemlerinin doğru yapılmadığı takdirde ihracatın gerektirdiği koşulları yerine getirmesi mümkün olmamaktadır [3]. Kavlatma işlemi öncesinde taze Antep fıstığı meyvelerinin dış kabuk rengine göre sınıflandırılması kavlatma işlemlerinde oluşacak risklerin azaltmasına katkı sağlayacaktır. Böylece kavlatma işlemi sadece mor kabuklu tam olgun meyvelere uygulanacağından daha yüksek kalitede ürün oluşmasına olanak sağlayacaktır. Bu çalışmada derin öğrenme ve görüntü işleme tekniklerine dayalı Antep fıstığı meyvelerinin dış kabuk rengine göre sınıflandırılma uygulaması yapılmıştır.

Literatürde Antep fıstığı ürünlerinin görüntü işleme teknikleri ile sınıflandırılması konu alan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Pearson ve ark. kabuk kusurlarına sahip fıstıkların ayıklanması için görüntüleme algoritmaları geliştirmiş ve %98'lik sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir [5]. Gazanfari ve ark. dört grup Antep fıstığını 2 boyutlu şekillerine göre sınıflandırmak için yapay sinir ağlarına dayalı şekil tanıma yöntemlerini kullanmış ve %94.8 sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir [6]. Haff ve Pearson, ayırma makineleri için kullanılacak optimal spektral bantları seçmek için yakın kızılötesi spektroskopi (NIR) kullanan bir teknik geliştirdi. Önerilen yöntemin sıralama doğruluğunun, ticari olarak mevcut sıralama makinesinin sıralama doğruluğundan daha iyi performans gösterdiğini gösterdiler [7]. Ghezlbash ve ark. bilgisayar görüşüne dayalı fıstık ayıklama için uygun maliyetli bir akıllı sistem geliştirmiş, açık ve kapalı kabuklu fıstıklar için sırasıyla %92.7 ve %86.7 sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir [8]. Sabancı ve ark. Siirt ve Uzun Antep fıstığı olmak üzere iki farklı çeşidi sınıflandırmak için yapay sinir ağları ile entegre görüntü işleme teknikleri ve Otsu Metodu kullandılar [9]. Nouri-Ahmadabadi ve ark. soyulmuş fıstık kabuklarının ve çekirdeklerinin ayıklanması için yapay görme ve destek vektör makinesinin entegrasyonu ile akıllı bir sistem geliştirdi. Renkli CCD kamera, sıralama birimi ve işlem biriminden oluşan sistemin elde edilen sınıflandırma doğrulukları, sistemin çevrim dışı ve çevrim içi karar verme birimi için sırasıyla %99.17 ve %94.33'tür [10]. Literatürde Antep fıstığını dış kabuk rengine göre derin öğrenme teknikleri ile ayıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, Antep fıstığını dış kabuk rengine göre ayırmak için AlexNet ağ yapısı kullanılmıştır. AlexNet yapısını eğitmek için gerekli olan veri seti sıfırdan üretilmiştir. Veri setini oluşturmak için endüstriyel bir test düzeneği kullanılmıştır. Bu çalışmada ikinci kısımda veri setini oluşturmak için kullanılan materyal ve yöntem detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise bu veri setleri ile AlexNet yapısı eğitilip test edilmesi sonucu elde edilen

değerler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve gelecek çalışmalardan söz edilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Veri seti oluşturma

Antep fıstıkları depolama sonrası ve pazarlama öncesi kavlatma işlemine tabi tutulmaktadır. Kavlatma işlemine sadece dış kabuğu mor olan Antep fıstıklarının girmesiyle daha yüksek kalitede ürün elde edilmektedir. Bu çalışmada derin öğrenme teknikleri kullanılarak Antep fıstıklarının toplandıktan ve kurutulduktan sonra dış kabuk rengine göre sınıflandırmak için derin öğrenme teknikleri kullanılmıştır. Literatürdeki sınıflandırma ve ayıklama çalışmalarına bakıldığında kullanılan veri setleri elle oluşturulmuş veri setleridir. Bu çalışmada oluşturulacak veri setinin ve eğitilecek ağ yapısının endüstride de yüksek doğrulukta çalışabilmesi için Şekil 1'deki gibi bir deney düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 1. Deney düzeneği

Bu deney düzeneği fıstıkların koyulduğu haznedan, fıstıkların düşme bölgesine doğru ilerlediği oluktan, oluktaki titreşimi sağlayan vibrasyon motorundan, Basler marka 107649 acA1440-73gc 1440 x 1080 73 fps, color 1/3" CMOS kameradan ve kameranın pozlama zamanı ile senkron çalışabilen MJB imaging marka DTL-ic-1010 Diffuse Flat Dome Light aydınlatmadan oluşmaktadır. Yine veri setlerini oluşturmak ve ağ yapısını eğitip test etmek için Intel i7, 3.6 GHz, 32 GB DDR3 1600 MHz RAM, Nvidia RTX 3070 GPU, Windows 10 Pro özelliklerde bir masa üstü sistem kullanılmıştır.

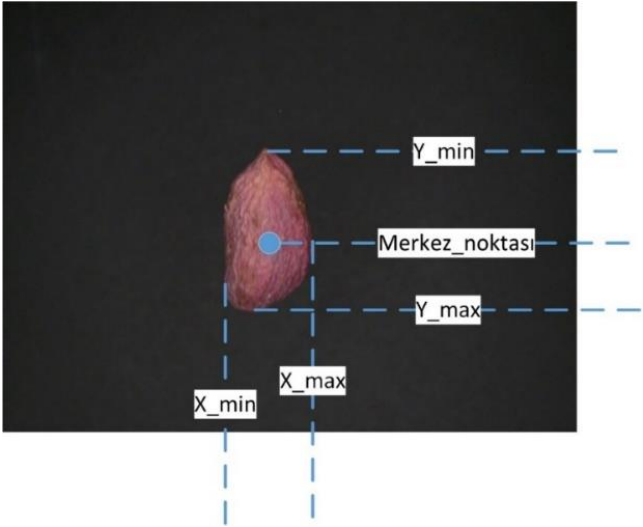
Öncelikle hazne boş iken tamamen mor olduğundan emin olduğumuz (daha önce gözle kontrolü yapılmış) fıstıklar hazneye dökülmektedir. Hazneye döküldükten sonra vibrasyon motoruna kontrol kartından hareket verilmektedir. Fıstıklar hazne üzerinde ilerleyip oluğun ucundan aşağıya doğru serbest düşme yapmaktadırlar. Fıstıklar düşerken oluğun altında bulunan kamera anlık görüntülerini çekmektedir. Bu sayede veri setinde kullanılmak üzere görüntüler oluşturulmaktadır. Fıstıklar düşerken çekilmiş örnek görüntüler Şekil 2'deki gibidir.



Şekil 2. Örnek fıstık görüntüleri

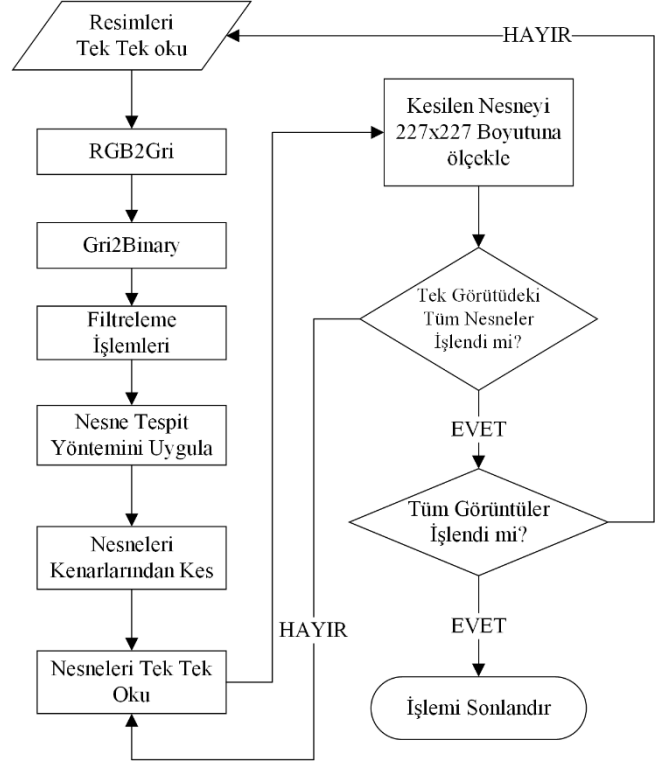
Şekil 2'den de görüleceği üzere fıstıklar serbest düşme yaparken x,y ve z eksinde sürekli döndüklerinden dolayı çok farklı açılarda görüntülenmektedirler. Fıstıkların ayıklanması için endüstriyel bir düzenek geliştirildiğinde gerçek görüntüler yine bu şekilde olacaktır. Mor ve sarı kabuklu Antep fıstıklarına ait görüntüler bu şekilde çekilmiş olup toplamda 2426 adet sarı kabuklu, 1557 adet mor kabuklu Antep fıstığı görüntüsü hafızada kaydedilmiştir.

Veri seti oluşturmak için blob analizi etkin bir şekilde kullanılmıştır. Blob analizi nesnelere ait birçok bilgi vermekte olup; bu çalışmada blob analizinden elde edilen X\_min, X\_max, Y\_min, Y\_max ve centre of blob parametreleri kullanılacaktır. Örnek bir görüntü üzerinde blob analizinin uygulanması, Antep fıstığının görüntüden kesilmesi için gerekli parametrelerin gösterilmesi Şekil 3'deki gibidir.



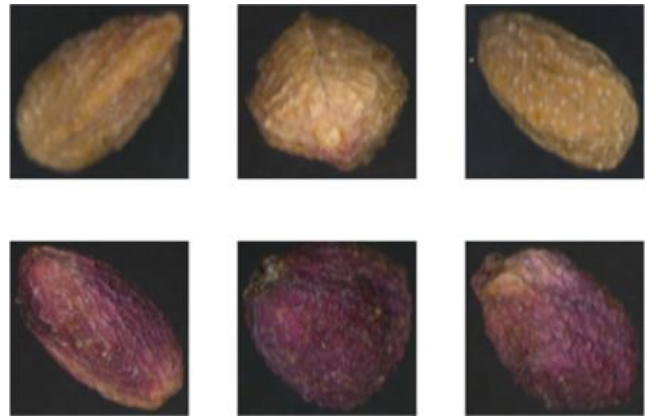
Şekil 3. Blob Algoritması ile koordinatların bulunması

Tek bir görüntü üzerindeki fıstıkların(blobların) blob analizi ile bulunması ve kesilmesi işlemi kayıtlı olan tüm görüntülere uygulandığında kayıtlı görüntülerdeki fıstıkların tamamı tespit edilmiş, kenarlarından kesilmiş ve ağ yapısına uygun hale getirilmiş olacaktır. Bu işlem tek bir fıstık sınıfı için Şekil 4'de gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Veri seti oluşturma algoritması

Şekil 4'e göre görüntülere nesne tespit yöntemi uygulanmadan önce görüntüleri ve küçük parçaları silmek için yoğun filtreleme işlemleri kullanılmıştır. Yine daha büyük parçacıklar ise blob analizinden sonra alanına göre bir threshold uygulanmış olup veri setlerine dahil edilmemişlerdir. Tüm bu işlemler uygulandıktan sonra mor kabuklu fıstıklara ait 966, sarı kabuklu fıstıklara ait 966 adet görüntü kesilmiş ve 227x227'ye boyutlandırılmıştır. Örnek fıstık görüntüleri Şekil 5'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 5. Örnek 227x227 boyutundaki görüntüler

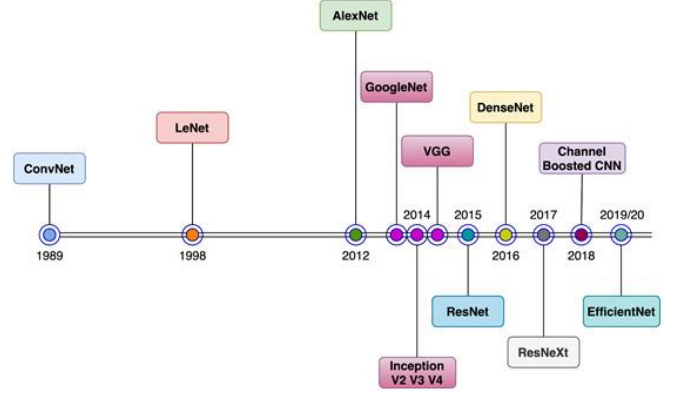


## 2.2 Derin öğrenme

Derin öğrenme, günümüzde birçok uygulamada kullanılan; yapay sinir ağlarının ilkelerine dayanan çoklu işlem katmanlarından oluşan bir hesaplama modelidir [11]. Derin öğrenmenin tarım alanında ise arazi örtüsü tanımlaması, hastalık tespiti, akıllı sulama, hassas hayvancılık, bitki sınıflandırması, haşere tanıma, yabancı ot tespiti ve fenotipleme gibi uygulamaları mevcuttur [12-13].

Son yıllarda hızlı GPU donanımı sayesinde makine öğrenimindeki hızlı gelişmelere bakıldığında, makine görme uygulamalarında gerçek kırılma, Derin Evrişimli Sinir Ağı (CNN) AlexNet sonrası olmuştur [14]. AlexNet'ten sonraki yıllarda VGGNet [15], Microsoft'un Artık Ağları (ResNet) (He ve diğerleri 2016), GoogleNet veya Inception mimarisi [16], Xception [17] vb. gibi birkaç derin öğrenme mimarisi geliştirildi. Şekil 6, CNN mimarilerinin evrimini özetlemektedir. Burada, AlexNet mimarisinin CNN'nin evrimini nasıl hızlandırdığı görülebilir [18].

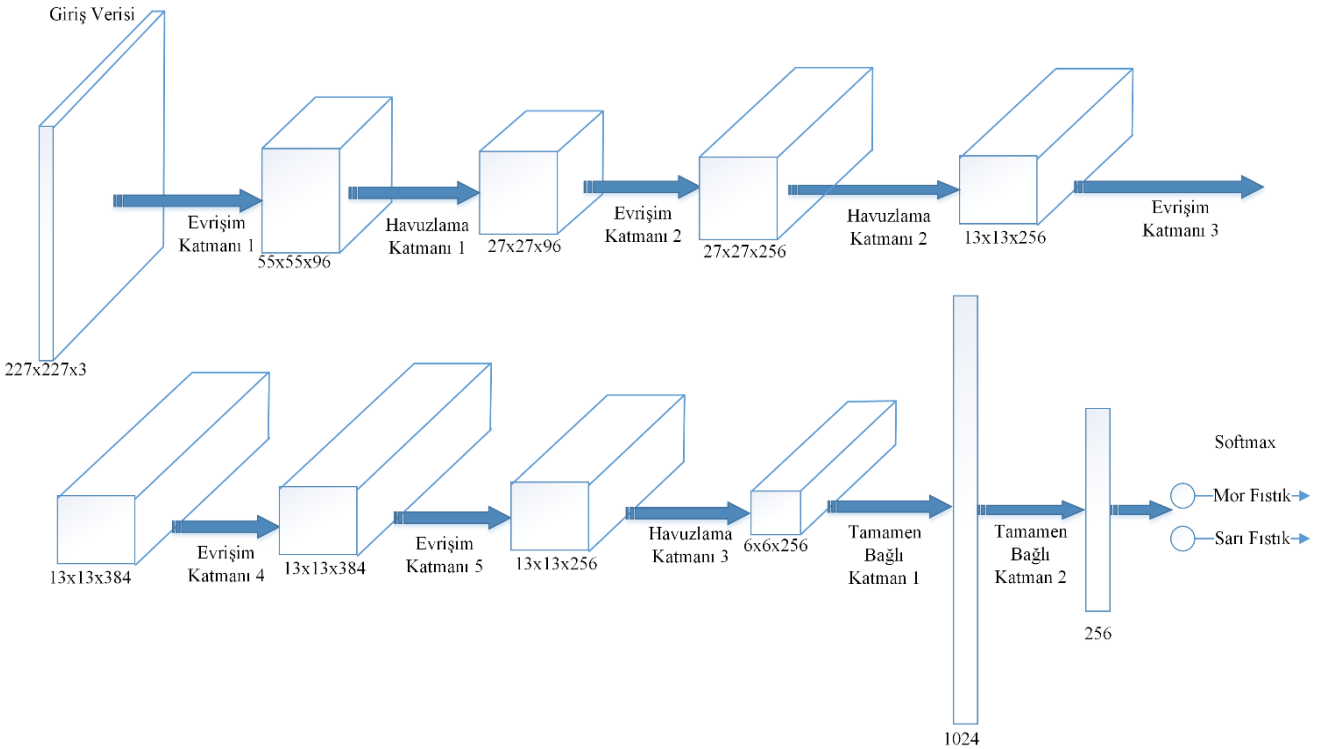
Bu çalışmada, Alexnet mimarisi kullanılarak Antep fıstıkları dış kabuk rengine göre sınıflandırmış ve sınıflandırma performansı değerlendirilmiştir. Uygulamada kullanılan AlexNet yapısı Şekil 7'deki gibi olup; literatürde tanımlı olan ağ yapısı kullanılmış ve tam bağlı katmanlar 1024, 256 ve 6 çıkış katmanı da 2 olarak güncellenmiştir. Keras kütüphanesi ile oluşturulan ağ yapısında transfer öğrenme yöntemi kullanılmamış olup; geliştirilen ağ yapısı fıstık veri seti ile sıfırdan eğitilmiştir. Eğitim aşamasında kullanılan parametreler ise şu şekildedir: optimizer= SGD, learning rate = 1e-05, batch size = 64, loss\_function= categorical\_crossentropy.



Şekil 6. CNN yapılarındaki gelişim süreci[18]

## 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada Antep fıstıkları dış kabuk rengine göre derin öğrenme ağ yapıları ile sınıflandırılmıştır. Derin öğrenme ağları ile bu sınıflandırmaları yapabilmek için öncelikle bu sınıflara ait veri setleri oluşturulmuştur. İlk olarak blob analizi ile oluşturulan veri setinin tamamı kullanılarak eğitim ve test işlemleri yapılmıştır. Kullanılan veri setinin tamamı mor kabuklu fıstıklara ait 966, sarı kabuklu fıstıklara ait 966 adet kesilmiş ve 227x227'ye boyutlandırılmış fıstık görüntüsünden oluşmaktadır. Literatürde eğitim, doğrulama ve test veri setlerini oluştururken en yaygın kullanılan %70, %15, %15 ve %60, %20, %20 oranları seçilmiştir. Her sınıfa ait 966 adet Antep fıstığı görüntüleri, %70, %15, %15 oranı kullanarak, her sınıftan 676 adet görüntü eğitim için, 145 adet doğrulama için ve 145 adet test işlemi için ayrılmıştır.



Şekil 7. AlexNet yapısı

Bu veri seti kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma sonuçları **Tablo 1**'de verilmiştir. Ağın daha fazla veri ve daha fazla tur sayısı ile eğitilmesiyle ağın doğruluğunun artması beklenen bir sonuçtur. Mevcut veri sayısı 966 ile sınırlı olup; ağın daha uzun süre eğitilmesi ile daha yüksek sonuç vermesi beklenmektedir. Ancak ağın eğitimindeki tur sayısı belirli bir sayıdan fazla olduğunda ağ öğrenmemeye başlamaktadır. Bunu engellemek ve maksimum tur sayısını rast gele değil de kod ile belirlemek adına bu çalışmada tur sayısını otomatik olarak sınırlandırmak için Keras kütüphanesine ait early stopping (erken durdurma) fonksiyonu kullanılmıştır. **Tablo 1**'e bakıldığında en yüksek doğruluk oranı %96.87 olarak hesaplanmıştır. Bu değer için hesaplanması için ağ yapısı 83 turda eğitilmiş ve tur sayısı erken durdurma fonksiyonu ile otomatik olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 1.** 966 verinin kullanılması sonucu eğitim sonuçları

Tur Sayısı	Test Doğruluğu
10	%93.79
20	%93.44
50	%95.17
83 ED*	<b>%96.87</b>

ED: Erken Durdurma

Veri sayısının ağın test doğruluğuna etkisini araştırmak adına bir sonraki aşamada her sınıftan 338 adet görüntü eğitim için, 72 adet doğrulama için ve 72 adet görüntü test işlemi için kullanılmıştır. Bu veriler eşliğinde en yüksek test doğruluğu **Tablo 2**'deki gibi hesaplanmıştır. En yüksek test doğruluğu erken durdurma fonksiyonun hesapladığı 69 tur için %96.52 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 2.** 482 verinin kullanılması sonucu eğitim sonuçları

Tur Sayısı	Test Doğruluğu
10	%82.63
20	%84.02
50	%92.36
69 ED	<b>%96.52</b>

Son aşamada her sınıftan 67 adet görüntü eğitim için, 14 adet doğrulama için ve 14 adet görüntü test işlemi için kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler eşliğinde en yüksek test doğruluğu %96,42 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar **Tablo 3**'deki gibidir.

**Tablo 3.** 95 verinin kullanılması sonucu eğitim sonuçları

Tur Sayısı	Test Doğruluğu
10	%50.5
20	%64.28
50	%96.42
150 ED	<b>%96.42</b>

Literatürde farklı oranlarda eğitim, test ve doğrulama oranları kullanılmakta olup; bu çalışmada %70, %15, %15 oranları ve %60, %20, %20 oranlarının ve veri seti boyutunun test doğruluğuna etkisi incelenmiştir. %70, %15, %15 oranlarına ait test sonuçları **Tablo 1, 2 ve 3**'deki gibi olup tüm bu işlemler %60, %20, %20 oranları kullanılarak tekrar

yapıldığında farklı veri sayılarına ait test sonuçları **Tablo 4**'teki gibi bulunmuştur. En yüksek test doğruluğu tüm veriler (her sınıftan 580 adet görüntü eğitim için, 193 adet doğrulama için ve 193 adet test işlemi için) kullanıldığında %98.44 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu sonuçlar **Tablo 4**'teki gibidir.

**Tablo 4.** %60, %20, %20 oranları ile farklı sayılardaki verilerin test doğruluğu sonuçları

%60 Eğitim, %20 Doğrulama, %20 Test					
Eğitim = 580x2, Doğrulama=193x2, Test=193x2		Eğitim = 290x2, Doğrulama=96x2, Test=96x2		Eğitim = 58x2, Doğrulama=19x2, Test=19x2	
Tur Sayısı	Test Doğruluğu	Tur Sayısı	Test Doğruluğu	Tur Sayısı	Test Doğruluğu
10	%93.52	10	%85.93	10	%76.31
20	%95.85	20	%93.75	20	%84.21
50	<b>%98.44</b>	50	%93.75	50	%92.10
71ED	%97.15*	96ED	%96.87	100ED	%94.52

Antep fıstığının rengine göre ayıklanması kısmen kolay bir problem gibi gözükse de ayıklama işleminin endüstriyel bir ortamda gerçekleştirilmesi ayıklama işlemini zorlaştırmaktadır. Literatürdeki derin öğrenme temelli ayıklama ve sınıflandırma çalışmalarına [9-10] bakıldığında daha çok masaüstünde oluşturulmuş veri setleri ile ağın eğitilmesi ve test edilmesi işlemleri yapılmaktadır. Bu veri setleri oluşturulurken sınıflandırılmak istenen nesnelerin (tohum, bakliyat, kuruyemiş) görüntüleri sabit bir pozisyonda oluşturulmaktadır. Ancak uygulamada işler bu kadar kolay değildir. Endüstriyel bir ayıklama sisteminde ayıklanmak istenen nesne oluktan ya da konveyörden ilerlerken x, y, z eksenlerinde dönecekleri için çok farklı açılarda görüntüleri oluşacaktır. Hakan ve ark. yaptıkları çalışmada masaüstü veri seti ve endüstriyel veri seti ile eğitilmiş ağ yapılarını endüstriyel bir uygulamada test ettiklerinde; masaüstü veri seti ile eğitilen ağ yapısının test doğruluğu %61.75 buna karşılık endüstriyel veri seti ile eğitilen ağ yapısının test doğruluğu ise %96.54 olarak hesaplanmıştır [19].

#### 4 Sonuçlar ve gelecek çalışmalar

Bu çalışmada Antep fıstıklarının dış kabuklarına göre sınıflandırılması için derin öğrenme teknikleri kullanılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında derin öğrenme ile Antep fıstığı ayıklama ve sınıflandırma son zamanlarda çalışılan popüler konulardan bir tanesidir. Antep fıstıklarının dış kabuk renklerine göre sınıflandırılması için endüstriyel bir deney düzeneği geliştirilmiş ve bu düzenek kullanılarak veri setleri elde edilmiştir. Veri setlerinin oluşturulması için blob analiz yöntemi etkin bir şekilde kullanılmıştır. Elde edilen veri setleri ile AlexNet ağ yapısı farklı yüzdelere sahip eğitim, doğrulama ve test verileri ile eğitilip test edilmiştir. En yüksek test doğruluğu %60, %20, %20 yüzdelere sahip veri seti ile elde edilmiştir. Test doğruluğu %98.44 olarak hesaplanmıştır. Yine veri setlerinin farklı sayılarda olmasının test sonucuna etkisini araştırmak için 3 farklı sayıda veriye sahip veri setleri kullanılmıştır. Yüksek sayıda verinin eğitim ve doğrulamada kullanılması sonucunu test

doğruluğu yüksek hesaplanmıştır. Kullanılan veri sayısı onda birine indirildiğinde test doğruluğunda, %60, %20, %20 yüzdelerine sahip veri setleri için %98.44 – %94.52 = %3.92 ‘lik bir farka sebep olmuştur.

Elde edilen test sonuçları ayıklama sistemleri için yüksek doğruluk kriterini sağlamakta olup; gelecekteki çalışmalarda böylesi bir ayıklama sisteminin kurulması için sistemin gerçek zamanlı hale getirilmesi hedeflenmektedir. Sistemin gerçek zamanlı çalıştırılabilmesi için uygulamaya özel düşük işlem yüküne sahip ağ yapılarının araştırılması ve optimize edilmiş ağ yapılarının geliştirilmesi hedeflenmektedir.

#### Teşekkür

Veri setlerinin oluşturulması için Antep fıstıklarının toplanması ve ulaştırılmasında emeği geçen Haleplioğlu Şirketi ve Hacıbekirlioğlu şirketi (Sayın Mehmet Bostancı) ve nazik destekleri için Gaziantep İl Müdürlüğü'nden Sedat Gökoğlu'na (Ziraat Mühendisi) ve Dr. Öğr. Üyesi Tefide Kızıldeniz'e teşekkür ederim.

#### Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

#### Kaynaklar

- [1] Y. E. Ertürk, M. K. Geçer, E. Gülsoy ve S. Yalçın, Antepfıstığı üretimi ve pazarlaması., Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(2), pp. 43-62, 2015.
- [2] İ. C. Bilim, R. Polat, K. Sarpkaya, N. Doğruer Kalkancı, N. Yıldırım ve A. Yaman, Antepfıstığı Entegre İşletme Tekniğinin Geliştirilmesi, <https://kutuphane.tarimorman.gov.tr/vufind/Record/18984/Description> Accessed 3 Jan 2022
- [3] Y. Gezginç ve A. D. Duman, Antep fıstığı işleme tekniği ve muhafazasının kalite üzerine etkisi, Gıda, c. 29(5), Eki. 2004
- [4] rekoltedunyasi.com, <https://rekoltedunyasi.com/arastirma/Antepfistigi-ile-ilgili-saptamalar/> Accessed 4 Jan 2022
- [5] T. C. Pearson, M. A. Doster and T. J. Michailides, Automated detection of pistachio defects by machine vision., Applied Engineering in Agriculture, 17(5), p. 729–732, 2001.
- [6] A. Ghazanfari, J. Irudayaraj, A. Kusalik and M. Romaniuk, Machine vision grading of pistachio nuts using Fourier descriptors, Journal of agricultural engineering research, 68(3), 247-252, 1997.
- [7] R. P. Haff and T. Pearson, Spectral band selection for optical sorting of pistachio nut defects, Transactions of the ASABE, 49(4), pp. 1105-1113, 2006. <https://doi.org/10.13031/2013.21716>
- [8] J. Ghezlbash, A. M. Borghaee, S. Minaei, S. Fazli and M. Moradi, Design and implementation of a low cost computer vision system for sorting of closed-shell pistachio nuts, African Journal of Agricultural Research, 8(49), pp. 6479-6484, 2013. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.1162>
- [9] K. Sabancı, M. Köklü and M. F. Ünleren, Classification of Siirt and long type pistachios (pistacia vera l.) by artificial neural networks., International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, p. 86–89, 2015. <https://doi.org/10.18201/ijisae.74573>
- [10] H. Nouri-Ahmadabadi, M. Omid, S. S. Mohtasebi and M. S. Firouz, Design, development and evaluation of an online grading system for peeled pistachios equipped with machine vision technology and support vector machine, Information Processing in Agriculture, 4(4), pp. 333-341, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.06.002>
- [11] E. C. Tetila, B. B. Machado, G. Astolfi, N. A. de Souza Belete, W. P. Amorim, A. R. Roel and H. Pistori, Detection and classification of soybean pests using deep learning with UAV images., Computers and Electronics in Agriculture, 179,105836, pp. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105836>
- [12] Z. Ünal, Smart farming becomes even smarter with deep learning—A bibliographical analysis, IEEE Access, 8, pp. 105587-105609, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000175>
- [13] F. Kurtulmuş, Identification of sunflower seeds with deep convolutional neural networks, Journal of Food Measurement and Characterization, 15(2), pp. 1024-1033, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00707-7>
- [14] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, Imagenet classification with deep convolutional neural networks, Advances in Neural Information Processing Systems, 25, pp. 1097-1105., 2012.
- [15] K. Simonyan and A. Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), San Diego, 2014.
- [16] C. Szegedy, V. Vanhoucke, S. Ioffe, J. Shlens and Z. Wojna, Rethinking the inception architecture for computer vision, in In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Las Vegas, USA, 2016. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>
- [17] F. Chollet, Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions, in In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Honolulu, USA, 2017.
- [18] A. R. Jha, Mastering PyTorch, USA: Packt, 2021.
- [19] H. Aktaş, T. Kızıldeniz and Z. Ünal, Classification of pistachios with deep learning and assessing the effect of various datasets on accuracy. Journal of Food Measurement and Characterization, 1-14, 2022 <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01313-5>





## Yerel faz niceleme ile ayak görüntülerinin kişi, yaş ve cinsiyete göre sınıflandırılması

### Classification of foot images according to person, age, and gender with the local phase quantization

Emrah Aydemir<sup>1,\*</sup> , Mustafa Shwaish Al-Azzawi<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, İleri Teknolojiler ABD, 40100, Kırşehir, Türkiye

#### Öz

Ayak görüntüleri insan vücudunun önemli bir biyolojik özelliği olup insanların çeşitli özelliklerini taşır. Ayak izindeki doku, şekil, uzunluk vb. farklı niteliklere bakılarak kişi tanımlamak mümkün olabilir. El yapısı kendine özgü şekil ve cilt dokusuna sahip olsa da bunların ayak biyometrisi ile karşılaştırılması karmaşık bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında yakın ayak parmakları, ayak izlerindeki tipik çizgilerin yokluğu ve dönmüş ayak izlerinin yüksek gürültü içermesi yer almaktadır. Fakat bu ayrıntılar el ile benzerlik göstermese de her kişi için ayak görüntülerinde farklılık oluşmasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra ayak görüntüleri yaş, cinsiyet, ırk, ayakkabılar ve ayakkabı giymeye başlama yaşına göre de farklılık göstermektedir. Buradaki çalışma da 100 kişiye ait sağ ve sol ayak görüntüleri olan 6944 veri toplanmıştır. Toplanan bu dosyaların yerel faz niceleme ile öznelikleri çıkarılmıştır. Her bir görüntü dosyası için 1x256 boyutlarında vektör üretilmiştir. Tüm dosyalar için bu işlemler yapılmış ve birçok farklı sınıflandırma algoritmaları ile görüntüler kişi, yaş ve cinsiyet için sınıflandırılmıştır. Kişi tanıma için % 99.42 oranında doğruluk oranı elde edilirken, cinsiyet için % 99.87 oranında başarı elde edilmiştir. Son olarak yaş için ise % 98.14 oranında sınıflandırma başarısına ulaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Ayak görüntüsü, Yerel faz niceleme, Sınıflandırma

#### 1 Giriş

Günümüz teknolojinin geldiği noktada birçok yer kamera ve çeşitli algılayıcılar ile donatılmıştır. Bu tür teknolojiler yardımıyla bir bireyin tanınması önemli bir görev haline gelmiştir. Özellikle ticari amaçlı geliştirilmiş birçok farklı sistemde kişisel kimlik doğrulama vardır. Bu tür sistemleri mümkün olduğunca gerçek zamanlı çalıştırmak amaçlanmaktadır. Bu sistemlerin birçok farklı çeşidi vardır. Parmak izi tanıma, avuç içi tanıma, yüz tanıma, retina taraması bunlardan yalnızca birkaçıdır. Bu sistemler sürekli bir gelişim ve dönüşüm içerisindedir. Kişi tanıma konusunda farklı özelliklerin biyometrik nitelik taşıyıp taşımadığı hep merak konusu olmuştur. Ayak görüntüleri de insan

#### Abstract

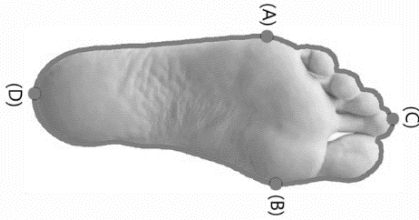
Foot images are an important biological feature of the human body and carry various characteristics of people. The texture in the footprint, shape, length, etc. It may be possible to identify a person by looking at different qualities. Although the hand structure has its own unique shape and skin texture, comparison of these with foot biometrics reveals a complex situation. The main reasons for this include close toes, the absence of typical lines in footprints, and the high noise content of turned footprints. However, although these details are not similar to the hand, they cause differences in foot images for each person. In addition to these, foot images also differ according to age, gender, race, shoes and age of starting to wear shoes. In this study, 6944 data, which are right and left foot images of 100 people, were collected. The features of these collected files were extracted by local phase quantization. For each image file, 1x256 vectors were produced. These processes were performed for all files and images were classified for person, age and gender with many different classification algorithms. While 99.42% accuracy rate was obtained for person recognition, 99.87% success was achieved for gender. Finally, 98.14% classification success was achieved for age. All these results show that recognition from foot images is possible with high success with the method here.

**Keywords:** Foot image, Local phase quantization, Classification

vücudunun önemli bir biyolojik özelliği olup insanların özelliklerini taşır. Ayak izindeki doku, şekil, uzunluk vb. farklı niteliklere bakılarak kişi tanımlamak mümkün olabilir. Bu konuda birçok farklı çalışma vardır [1, 2]. Ayakların görüntülerinin tekil özellik taşımasının yanı sıra ayakların izleri de her kişi için farklılık göstermektedir [3, 4]. Ayak görüntülerinden çeşitli hastalıkların tespiti dahi yapılabilmektedir [5, 6].

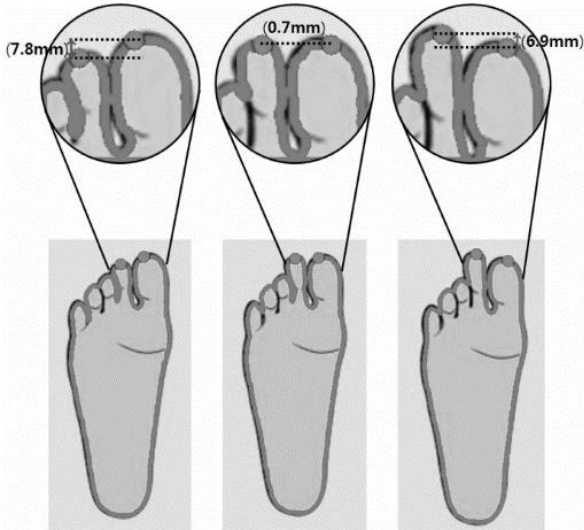
El yapısı kendine özgü şekil ve cilt dokusuna sahip olsa da bunların ayak biyometrisi ile karşılaştırılması karmaşık bir durum ortaya çıkarmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında yakın ayak parmakları, ayak izlerindeki tipik çizgilerin yokluğu ve dönmüş ayak izlerinin yüksek gürültü

içermesi yer almaktadır [7]. Fakat bu ayrıntılar el ile benzerlik göstermese de her kişi için ayak görüntülerinde farklılık oluşmasına neden olmaktadır. Bunların yanı sıra ayak görüntüleri yaş [8], cinsiyet [9], ırk [10], ayakkabılar [11] ve ayakkabı giymeye başlama yaşına [11] göre de farklılık göstermektedir. Ayaklar geniş, standart ve dar olarak ayak uzunluğu ve genişliği ile hesaplanan ayak indeksi ile sınıflandırılabilir. Bir başka sınıflandırmada ise ayaklar; başparmağın ikinci parmakdan 2mm daha uzun olması sonucu mısır tipi, bu farkın 2mm'den daha az olması durumunda kare tipi ve bunların dışındaki durum için yunan tipi olarak sınıflandırılabilir. Bir başka sınıflandırmada ise yüksek kemer, normal kemer ve düz kemer olarak sınıflandırılabilir [12]. Aşağıdaki Şekil 1'de ayak genişliği ve uzunluğu hesaplanırken kullanılan noktalar işaretlenmiştir.



Şekil 1. Ayak genişliği ve uzunluğu hesaplanırken kullanılan noktalar

Başparmak ve yanındaki parmağın uzunluk durumlarına göre yapılan ayak sınıflandırmalarını gösteren görsel aşağıdaki Şekil 2'de verilmiştir. Şeklin daha iyi anlaşılması açısından daha yakın hali de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ayak başparmak ve yanındaki uzunluğuna göre ayak şekilleri

Farklı ayak şekli sınıflandırmaları da mevcuttur. Seong ve ark. [13] tarafından Kore ayak şekli araştırılmış ve

ardından mevcut ayak şekillendirme standardına göre sınıflandırılmıştır. Kore ayak şekilleri için ayak şeklini etkileyen ana faktörler çıkarılmış ve ardından çok değişkenli istatistiksel analizle kategorik olarak gruplandırılmıştır. Yaşları 14 ile 70 arasında değişen erkeklerde ayak şeklini etkileyen başlıca faktörler; ayak genişliği, ayak bileği kalınlığı, birinci parmak şekli, malleol yüksekliği, topuk-ayak uzunluğu, ayak-yan ve ayak uzunluğu arasındaki orantı, topuk tarafı ve beşinci parmak şekli olarak belirlenmiştir. Kadın için ise, yukarıdaki faktörlere ek olarak topuk yüksekliği de eklenmiştir. Çıkarılan faktörlerden Kore ayak şekli erkekler için üç grup ve kadınlar için dört grup olarak kategorize edilmiştir. Bunlar merdiven tipi, ters üçgen tipi ve kare tipidir. Kadınlar için ise bunlara üçgen tipi de eklenmiştir. Bu tür bilgilerin ayakkabı üreticilerine yönelik faydalı bilgiler sağlayacağı düşünülmektedir. Choi ve ark. [14] tarafından 20'li yaşlarda 203 Koreli kadın ayak şekilleri incelenmiş ve ayak şekilleri küme analizi ile beş ayak tipine göre sınıflandırılmıştır: kısa ve ince şekil, düz şekil, hafif çarpık parmaklı kısa ve ince şekil, uzun ve büyük şekil ve kısa ve geniş şekildir. Ayak ölçümleri ayrıca ayak genişliği ve uzunluğu oranı ile analiz edilmiş ve küme analizi ile sınıflandırılan beş ayak tipi ile ayak indeksine göre sınıflandırılan üç ayak tipi karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, küme analizinin tam olarak ayak şekillerini tanımladığını göstermiştir.

Ola [15] ayak parmağına göre ayak şekillerini aşağıdaki gibi açıklamıştır. Açıklanan bu ayakların görselleri Şekil 3'te verilmiştir.

- **Mısır Ayak Şekli:** Mısır ayak şekli uzun bir başparmak ile ayırt edilir, ardından diğeri gelir 45 derecelik bir açıyla sivrilen ayak parmakları vardır. Tüm ayak eğimlidir ve genellikle diğer şekillerden daha uzun ve daha dardır. Bu tip ayaklara sahip kişiler, ekstra şımartılmayı severler ve genellikle çok arkadaş canlısı insanlardır.
- **Yunan Ayak Şekli:** Yunan parmak deseni genellikle alev ayağı veya ateş ayağı olarak da adlandırılır. Bu ayak parmağı tipi, başparmağından daha uzun bir ikinci ayak parmağı ile karakterize edilir. Bu tip parmaklara sahip kişiler lanse edilir ve son derece sportif ve yaratıcıdır, yeni fikirler konusunda heveslidir. Enerjiktirler ve doğal lider özelliklerine sahiptirler, ancak dürtüsel ve biraz stresli olabilirler. Sadece diğer insanların gözleri üzerlerinde olması için kaos yaratmayı severler [16].
- **Roma Ayak Şekli:** Bu ayak şekli, ilk üç parmağın aynı yükseklikte olması, diğer ikisinin azalan sırada olması ile karakterize edilir. Bu parmak tipine sahip kişilerin, dengeli bir vücut şekline sahip olduğu kadar, doğası gereği dışa dönük, enerjik ve aşk maceralarına sahip bir kişiliğe sahip oldukları bilinmektedir.
- **Kelt Ayağı:** Kelt ayağının, ayak başparmağı biraz daha kısa olan Yunan ayağının bir varyasyonu olduğuna inanılıyor. Kesin bir azalan sırayı takip etmeyen farklı parmak uzunluklarına sahiptir. Bir Kelt ayağının üçüncü veya dördüncü parmakları, ayak başparmağıyla yaklaşık olarak aynı uzunlukta olabilir veya üçüncü, dördüncü ve beşinci parmaklar aynı büyüklükte bir

gruplandırmaya sahip olabilir. Bu kategoriye giren insanlar dinamiktir ve aynı anda birçok şeyi yapabilir. Dürtüseldirler ve evlilikte kargaşa yaşayabilirler.

- **Köylü Ayak Şekli:** Köylü Ayağı, tüm ayak parmaklarının neredeyse aynı uzunlukta olmasını sağlar; ayak başparmağı biraz daha uzun olsa da kare şeklinde görünür. Bu tip ayaklara sahip kişiler sabırlı, dürüst ve düşünceli kişilerdir. Karar vermeden önce seçenekleri tartmayı, kararları üzerinde uzun uzun düşünmeyi severler. Kararlarını dikkatlice analiz ederler. Çatışmaları çözmede mükemmel olan barış yapıcıdır.
- **Ekstra Küçük Ayak Şekli:** Ekstra küçük ayak kalıbının şekli Mısır parmağına oldukça benzer. Bu ayak tipinin ayırt edici bir özelliği olarak ekstra küçük pembemsi bir parmağı vardır. Ayak parmaklarının geri kalanı, Mısır ayak parmağı gibi azalan sırada inceler. Bu kategoriye giren insanlar çok ketumdurlar ve eğer bir seçenekleri varsa başkalarıyla tartışmaktan kaçınırlar. Minik parmak yana bakıyorsa, bu kişi oldukça özgür ruhlu ve asi olabilir.
- **Geniş Ayak Şekli:** Gezgin ayağı olarak da adlandırılan geniş ayak deseni, ayak parmakları arasında çok fazla boşluğa sahiptir. Ayak parmakları oldukça uzağa gerilir. Bu parmak şekline sahip kişiler, doğal olarak, beklemekten nefret eden çalışkan kişilerdir. Sürekli hareket halindedirler, seyahat etmeyi ve heyecan verici maceraları severler. Çevrelerinden çıktıklarında daha mutlu olurlar.
- **Gerilmiş Büyük Ayak Şekli:** Bu tür ayak şekli, birbirine sıkıca sarılmış diğer dört ayak parmağından çok uzakta olan ayak başparmağına sahiptir. Bu tip ayak şekline sahip kişiler ketum olma eğilimindedir ve kişisel alanlarını korumayı severler. Doğaları ve aşk argümanları ile şiddetle bağımsızdırlar. Bazı durumlarda şeytanın avukatlığını yapma eğiliminde olabilirler.
- **Savaşçı Ayak Şekli:** Savaşçı ayak şekline sahip insanların uzun bir başparmağı ve nispeten benzer uzunlukta dört parmak daha vardır. Bu kategoriye giren insanlar sosyal olarak kelebek olabilir ve parti yapmayı sever. Yüzleşmeyi severler ve tutkulu oldukları konularda hararetli tartışmalara girme eğilimindedirler.

İnsanların ayaklarının özelliklerini bilmesi onların ayağına iyi oturan, işlevsel ve rahat ayakkabılar temin etmesini sağlayacaktır. Bu şekilde alınan ayakkabılar ile aktif bir hareketli yaşam elde edilebilir ve sürdürülebilir. Özellikle ortopedik yaralanmaları olan, sinir-kas-iskelet sisteminde bir kısım bozukluk sahibi olanlar ile artrit ve diyabetes mellitus gibi ayakları ve bilekleri doğrudan etkileyen hastalıklar için bu durum daha fazla hayati bir bileşen haline gelmektedir [17]. Bununla birlikte yine yüksek performans gerektiren, atletik, ortopedik, terapötik ayakkabıların cinsiyetler için de farklılık göstermesi beklenir. Her iki cinsiyete de hitap eden ayakkabılar genellikle pedal dokularında ağrı ve travmaya neden olan stres ve zorlanmalara neden olur [18, 19].

Vücudun sağ ve sol taraflarında yer alan yapıların

boyutu ve şekli her ne kadar gözle bakıldığında eş görünse de farklılıklar taşımaktadır. İlk bakışta gözle fark edilmeyen her bir ayağın şekli ve boyutu nedeniyle ele alınması gereken başka sorunlar da ortaya çıkabilir. Oliveira ve ark. [20] ayak görüntülerinden sağ ya da sol ayak olup olmadığını sınıflandırmaya çalışmışlardır.



Şekil 3. Şekillerine göre ayaklar

Piksel yoğunluklarına dayalı olarak çalışan algoritma giriş görüntüsündeki ayak bölgesini arayarak başlar. Daha sonra, ayak önceden ölçeklendirilir ve şablon görüntülerine benzer boyutlar vermek için kare bir matriste ortalanır. Bu boyut normalizasyonu, farklı boyutlarda ve farklı basınç sensörü dizileri kullanılarak tanımlanan ayakların çalışmasını sağlar. Bu adımda, önceden ölçeklendirilmiş ve ortalanmış görüntü, sol ayak için şablon görüntü ve ayrıca sağ ayak için şablon görüntü ile hizalanır. Bu iki hizalama, çapraz korelasyonun maksimumuna dayanmaktadır [21]. Daha sonra, hizalanmış iki görüntünün her birinin plantar basınç değerleri, karşılık gelen şablon görüntü ile aynı ortalama basınca sahip olacak şekilde normalleştirilir. Bu normalleştirme adımı, öznenin ağırlığının bir sonraki adımda hesaplanan görüntü farklılığı ölçüsü üzerindeki etkisini ortadan kaldırır. İki hizalanmış ve normalleştirilmiş görüntünün her biri ile karşılık gelen şablon görüntülerinin arasındaki mutlak farkların (SAD) toplamı hesaplanır. Son olarak, giriş görüntüsü bulunan minimum SAD değerine göre sol veya sağ ayak olarak sınıflandırılır.

Ayak morfolojisini belirlemek için ayak mekanizmasının anlaşılması gerekir. Liang ve ark. [22] tarafından yapılan bir çalışmada ise 3D tarama teknolojisi ile yalınayak ve ayakkabılı durum arasındaki ayak morfolojisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayak tarama testine, hem 30'u alışımlı olarak yalınayak hem de 30'u alışımlı olarak ayakkabılı olan 60 denek katılmıştır. Ayak taraması yapmak için 3 boyutlu lazer cihaz kullanılmıştır. Sonuç olarak yalınayak grubun, ayakkabılı gruba göre büyük top çevrelerinin, halluks ile diğer ayak parmakları arasındaki geniş minimum mesafenin

ve daha küçük halluks açısının ayak özelliklerini sergilediği görülmüştür. Yani yalınayak ve ayakkabılı arasındaki ayak morfolojisinin önemli farklılıkları esas olarak ön ayak bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu morfolojik özellikler yalınayak hareketin araştırılması için bazı bilgiler verebilir.

### 1.1 Amaç ve önem

Ayaklar kemik, kas ve bağlar ile birlikte zeminle temas sağlar ve bağlantılı hareketler yapar. Bu nedenle ayak şeklindeki bir problem varsa bu durum yürümeyi doğrudan etkileyecektir. Bu durum ayağın kalıcı olarak zarar görmesine neden olmasının yanı sıra diz ve sırt ile ilgili de problemlerin başlamasına neden olur [23]. Ayak ile ilgili bozuklukların tespiti için gereken ölçümler ya yüksek maliyetli donanımlar ile ya da kullanımı zor olan yöntemler ile yapılabilir. Bunun için basit bir fotoğraf üzerinden makine sistemlerinin yapay zekâ algoritmaları ile analizler yapması kuşkusuz önemli olacaktır. Özellikle uzmanlar arasındaki deformasyonların yorumlanmasındaki öznel farklılıklar oluşabilmektedir. Bu sorun ancak yapay zekâ sistemlerindeki yaşanan gelişmelerden yararlanarak son derece karmaşık verilerin makineler tarafından daha iyi yorumlanması ile mümkün olabilir. Bunun için de öncelikle basit ayak sınıflandırmalarından başlamak gerekir.

İnsan organlarının normal varyasyonları hakkında bilgi sağlamak için şekil özellikleri boyuttan ayrı olarak analiz edilmelidir. Bu şekil farklılıkları bireyler arasında çok büyük oranda aynı iken birey için ise büyük oranda simetrik özellikler taşısa da ufak farklılıklar görülebilmektedir. Bu nedenle yapılan bazı çalışmalarda kişilerin ayak görüntülerinin cinsiyet ve kişi farklılıkları taşıdığı söylenebilir [24, 25]. Buradaki çalışmada da ayak görüntülerinin kişi, yaş ve cinsiyet açısından sınıflandırılması amaçlanmıştır.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Verilerin toplanması

Çalışma içerisinde Irak ülkesinde yaşayan 100 farklı kişiden veri toplanmıştır. Öncelikle çalışma hakkında kişilere bilgi verilmiş ve çalışmaya katılımın gönüllü olduğu anlatılmıştır. Çalışmaya katılmayı kabul eden kişilerden ayakkabılarını ve çoraplarını çıkartmaları istenmiştir. Araştırmacı tarafından tüm deneklerde kullanılacak siyah bir bez parçası belirlenmiştir. Hem deneklerin ayaklarını yere koyarak kirlenmelerini engellemek hem de her denek için farklı bir arka plan oluşmasını engellemek amaçlanmıştır. Her bir deneye ait toplamda en az 40 ve en fazla 100 olacak şekilde farklı açılardan fotoğraf çekimi yapılmıştır. Bu fotoğrafların yarısı sağ ayak için diğer yarısı da sol ayak için çekilmiştir. Böylece deneklerden toplamda 6944 görüntü elde edilmiştir. Kişileri niteleyecek veya tanımlayacak hiçbir bilgi istenmemiştir. Her kişi bir ID numarası ile kodlanmıştır ve yalnızca yaşları ile cinsiyetleri kayıt altına alınmıştır. Çekilen her bir fotoğraf için bir isimlendirme kuralı geliştirilmiştir. Her bölüm alt çizgi “\_” karakteri ile ayrılmıştır. Bölümler sırasıyla aşağıdakileri ifade etmektedir.

1. **Kişi ID:** Fotoğraf çekimi yapılan her bir kişi için tekil olan bir kod değeridir
  2. **Cinsiyet ID:** Fotoğrafi çekilen kişi erkek ise 1 değeri ile kadın ise 2 değeri ifade edilmiştir.
  3. **Yaş:** Kişinin kaç yaşında olduğunu ifade etmek için doğrudan yaşı sayı olarak yazılmıştır.
  4. **Fotoğraf ID:** Her kişiye ait birden fazla fotoğraf çekimi yapılmış olması nedeniyle her fotoğraf 1’den başlayarak sıralı bir şekilde numaralandırılmıştır.
- Kişilerden 40 ID numarasına sahip olanın sağ ve sol ayak görüntüleri aşağıdaki Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Örnek bir kişinin sağ ve sol ayak görüntüsü

Dosyaların isimlendirme kuralına göre isim verilmesi hem karışıklıkları önlemektedir hem de analizlerin yapılması sırasında hangi sınıfa ait olduğunu belirlemeyi kolaylaştırmaktadır. Aşağıdaki Şekil 5’te görüntü dosyalarının bir kısmı klasör içerisinde gösterilmiştir.



Şekil 5. Çekilen fotoğraf dosyalarının klasör görüntüsü

Çalışma içerisinde toplanan verilerin başka araştırmacılar tarafından da kullanılabilmesi için tüm görüntü dosyaları KAGGLE veri seti deposuna yüklenmiştir. [www.kaggle.com/dataset/e19fadfab4e33748e93f9dc9962d68d67ad58c60da219eb85a33134224d875a5](http://www.kaggle.com/dataset/e19fadfab4e33748e93f9dc9962d68d67ad58c60da219eb85a33134224d875a5) web adresinden bu veri seti indirilebilir.

### 2.2 Verilerin analizi

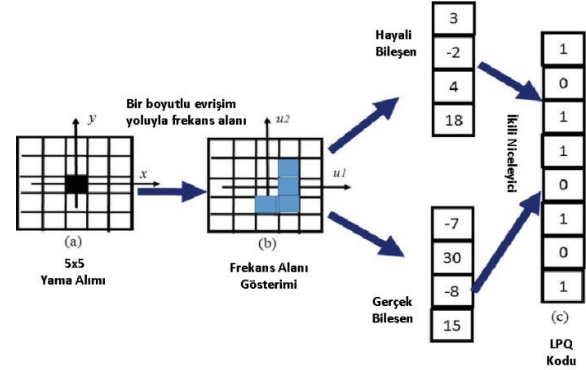
Çalışmada toplanmış olan verilerden basit istatistiksel analizler yapabilmek için öncelikle dosya adları bir excel dosyası içerisine aktarılmıştır. Böylece dosya adlarındaki her bir bölüm parçalanarak sütunlara dönüştürülmüştür. Bu işlemler için Python programı kullanılmıştır. Verilerin analizinde ise bilgisayar olarak Windows işletim sistemine sahip 8GB RAM ve Intel(R) Core(TM) i7-8565U CPU, 1.80GHz 1.99 GHz işlemcili bir bilgisayar kullanılmıştır. Dosya adları üzerinden öncelikle kişi, cinsiyet ve yaş kategorilerine ait basit istatistiksel bulgular elde edilmiştir. Böylece verilerin dağılımı incelenmiştir. Ardından görüntü dosyaları üzerinden öznitelik çıkarımı yapmak için yerel faz

niceleme (LPQ) yöntemi kullanılmıştır. Böylece her bir görüntü dosyası için 1x256 boyutlarında vektör üretilmiştir. Bu işlem tüm dosyalar için yapılmıştır. İlk olarak ayak görüntülerinden kişileri tanımlamak için bu dosyalarda sınıflandırma etiketi olarak kişi ID değerleri yazılmıştır. Ardından bir başka öznelik dosyası daha oluşturulup sınıf etiketi olarak cinsiyet ve bir başka dosya daha oluşturularak sınıf etiketi olarak yaş yazılmıştır. Böylece üç farklı öznelik dosyası elde edilmiştir. Veriler 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak eğitim ve test olarak ayrıştırılmıştır. Ardından bu öznelik dosyaları Python programı içerisindeki 30 farklı sınıflandırma algoritması ile test edilmiştir. En yüksek sınıflandırma başarısı elde edilmeye çalışılmıştır. Sınıflandırma işlemleri için yalnızca bir kere öğrenme ve test işlemi yapılmıştır. Daha yüksek başarı oranı elde etmek için tekrar tekrar denemeler yapılmamıştır. Bulgular başlığında her bir sınıflandırma algoritması ve elde edilen başarı oranı verilmiştir. Kullanılan sınıflandırma algoritmaları aşağıda listelenmiştir.

- discriminant\_analysis
  - ◆ LinearDiscriminantAnalysis
  - ◆ QuadraticDiscriminantAnalysis
- ensemble
  - ◆ AdaBoost
  - ◆ Bagging
  - ◆ extraTrees
  - ◆ GradientBoosting
  - ◆ HistGradientBoostingClassifier
  - ◆ randomForest
  - ◆ Voting
- linear\_model
  - ◆ LogisticRegression
  - ◆ LogisticRegressionCV
  - ◆ PassiveAggressiveClassifier
  - ◆ Perceptron
  - ◆ RidgeClassifier
  - ◆ RidgeClassifierCV
  - ◆ SGDClassifier
- naiveBayes
  - ◆ bernoulliNB
  - ◆ CategoricalNB
  - ◆ complementNB
  - ◆ gaussianNB
  - ◆ multinomialNB
- neighbors
  - ◆ KNN
  - ◆ NearestCentroid
  - ◆ RadiusNeighborsClassifier
- neural\_network
  - ◆ MultiLayerPerceptron
- svm
  - ◆ LinearSVC
  - ◆ NuSVC
  - ◆ SVM
  - ◆ DecisionTree
  - ◆ ExtraTreeClassifier

### 2.3 Yerel faz niceleme (Local Phase Quantization-LPQ) ile öznelik çıkarımı

İlk kez 2008 yılında önerilen yerel faz niceleme tanımlayıcısı doku bulanıklığının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır [26]. Özellikle bulanık yüzlerin tanınmasında başarılı sonuçlar üretir [27]. Bu yöntem Fourier faz spektrumunun bulanık değişmezlik özelliğine dayanır. Görüntünün her piksel için dikdörtgen bir komşuluk üzerinde hesaplanan 2 boyutlu Kısa Vadeli Fourier Dönüşümü (Short-Term Fourier transform-STFT) kullanılır. LPQ'da 2 boyutlu frekanslara karşılık gelen sadece dört karmaşık katsayı dikkate alınır. Gri renkli bir resimdeki her pikselde dört frekans noktası hesaplanır. Ardından hayali ve gerçek bileşenler beyazlatılır ve ilgili piksel için LPQ kodu oluşturulmaya çalışılır. Faz bilgisinin hesaplanması daha sonra ikili bir skaler niceleyici aracılığıyla her katsayının gerçek ve sanal kısmının işaretlerini nicemleyerek gerçekleştirilir. Ardından bu değerler için ikili kodlama gerçekleştirilir ve bu ikilik tabandaki sekiz basamaklı sayı onluk tabana dönüştürülür. Son olarak tüm resim için üretilen bu kodların histogramı alınır ve öznelik vektörü oluşturulur. LPQ operatörü, bulanıklık, dönüş değişkenliği ve türbülans bulanıklığına karşı güçlü bir tanımlayıcıdır. Öznelik çıkarma yaklaşımlarının birleştirilmesi, sınıflandırıcı performansının artırılmasına ve ayırt edici özelliklerin ortaya çıkarılmasına katkı sağlayan bir süreçtir [28]. Bir görüntüden LPQ ile öznelik çıkarımı aşağıdaki Şekil 6'da görsel olarak anlatılmıştır [29].



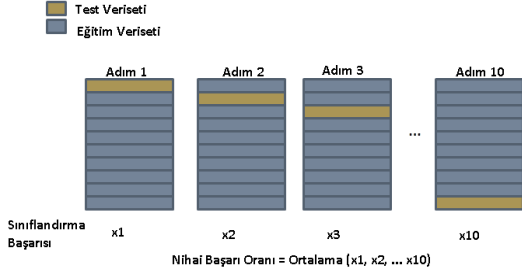
Şekil 6. LPQ kodlaması

### 2.4 Eğitim ve test verilerinin ayrıştırılması

Toplanan veriler sınıflandırma algoritmalarına sunulurken bir kısmı test için bir kısmı da eğitim için ayrıştırılmalıdır. Makine öğrenmesi algoritmalarının tümünde amaç eğitim veri seti üzerinde doğru tahminler yapacak bir model üretmektir. Fakat bu modelin doğruluğu ancak yeni veriler üzerinde kontrol edilebilir. Bu yeni veriler ayrı tutulan test veri setidir. Eğitim ve test verilerinin ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılan çağraz doğrulama yöntemi sistemin gerçek bir değerlendirmesini sağlar. Eğitim ve test verilerinin ayrıştırılmasında kullanılan en basit yöntem yüzdesel olarak verilerin bir kısmının test (örneğin %30) ve kalan kısmının eğitim (örneğin %70) için ayrılmasıdır. Burada her iki grup için de veriler rastgele seçilerek ayrılır. Fakat bu durumda şans faktörü devreye girer ve eğitim grubuna kolay veriler düşerken test grubuna



zor veriler düşebilir. Bu durumu ortadan kaldırmak için çapraz doğrulama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde veriler örneğin 10 parçaya ayrılır ve ilk adımda bu parçalardan biri test için diğerleri eğitim için kullanılır. Bu işlem her seferinde test verisi diğer parçalardan oluşacak şekilde 10 kez tekrarlanır. Son olarak ise her adımdaki sınıflandırma başarılarının ortalaması alınarak nihai başarı hesaplanır. Aşağıdaki Şekil 7’de bu durum görsel olarak anlatılmıştır.



Şekil 7. 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi

### 2.5 Başarı ölçütleri

Makine öğrenmesi algoritmalarının başarısını değerlendirmek için farklı ölçütler kullanılabilir. Fakat yaygın olarak kullanılanlar doğru sınıflandırma oranı ve karışıklık matrisidir. Doğru tahmin sayısının toplam örneklem sayısına bölünmesi algoritmanın doğru sınıflandırma oranını verecektir. Bu ölçüt her sınıfa ait örneklerin eşit olduğu durumda doğru bir yorum getirecektir. Aşağıdaki Denklem 1 ile hesaplanır.

$$\text{Doğru sınıflandırma oranı} = \frac{\text{Doğru sınıflandırılan örnek sayısı}}{\text{Toplam örnek sayısı}} \quad (1)$$

Sınıflandırma başarısının daha detaylı incelenebilmesi için karışıklık matrisi kullanılır. Bu ölçüt modelin tam performansını gösterir. Hata matrisi olarak da andırılabilir. İkili bir sınıflandırma için karışıklık matrisi aşağıdaki Tablo 1’deki gibi olacaktır.

Tablo 1. Karışıklık matrisi

Gerçek Değerler	Tahmin Değerleri	
	TN	FP
	FN	TP

Bu matris içindeki kısaltmalar aşağıdaki şekilde olacaktır.

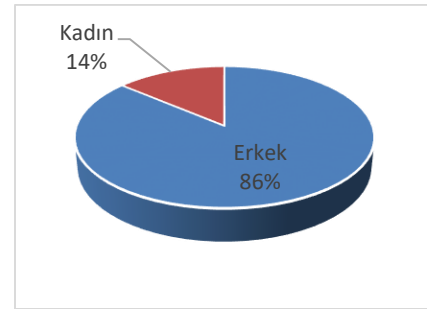
- Gerçek Pozitifler (TP): Bunlar gerçek değeri 1 iken tahmin edilen değer de 1 olduğu örneklerdir. Yani doğru tahmin edilmiştir.
- Gerçek Negatifler (TN): Bunlar gerçek değeri 0 iken tahmin edilen değer de 0 olduğu örneklerdir. Yani doğru tahmin edilmiştir.
- Yanlış Pozitifler (FP): Bunlar gerçek değeri 0 iken tahmin edilen değer 1 olduğu örneklerdir. Yani yanlış tahmin edilmiştir.
- Yanlış Negatifler (FN): Bunlar gerçek değeri 1 iken tahmin edilen değer 0 olduğu örneklerdir. Yani yanlış tahmin edilmiştir.

Bu matris üzerindeki değerlerden birçok farklı başarı ölçütü hesaplanabilir. Burada amaç doğru tahmin edilen çapraz sütündeki değerleri arttırmak ve onun dışındaki azaltmaktır.

## 3 Bulgular

### 3.1 İstatistiksel bulgular

Verilerin kolayca sınıflandırılabilmesi ve veri toplama sürecinin doğru yürütülebilmesi için dosya adlarında isimlendirme kuralı uygulanmıştır. Buradaki cinsiyet değerlerine göre veriler incelendiğinde büyük çoğunluğunun erkeklerden oluştuğu görülmektedir. Tüm örneklem 5983 erkek (%86 oranında) ve 961 kadın (%14 oranında) verisinden oluşmaktadır. Bu durum Şekil 8’de görsel olarak verilmiştir.

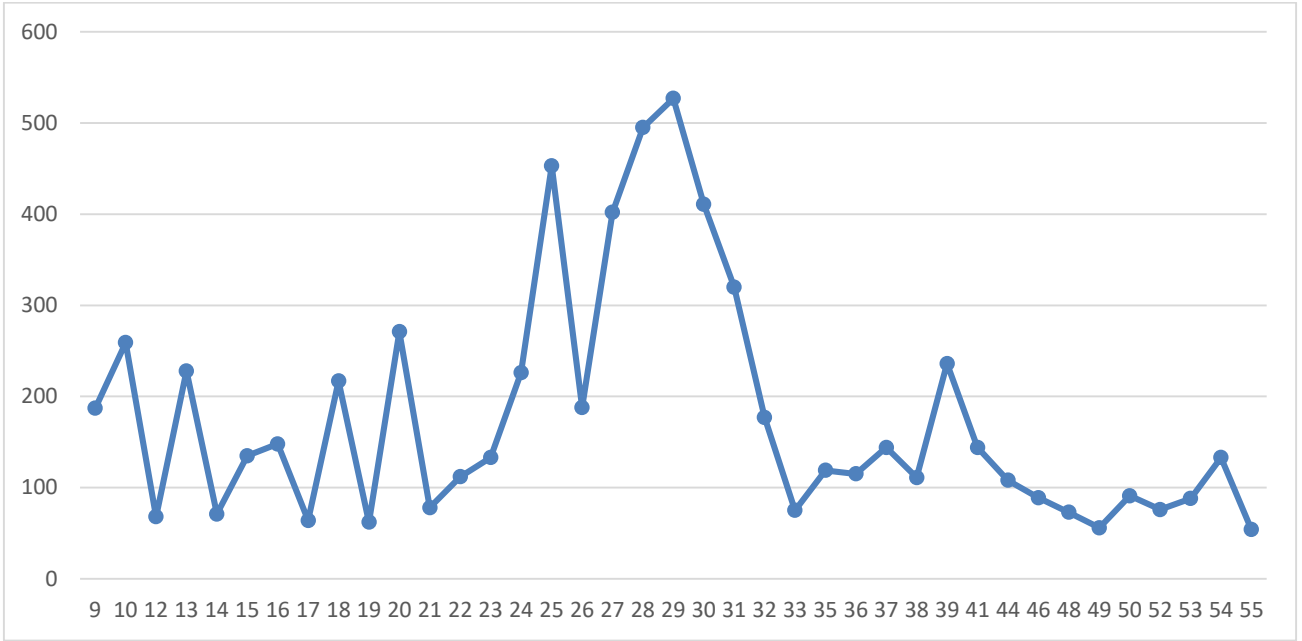


Şekil 8. Verilerin cinsiyete göre dağılımı

Verilerin yaşlara göre dağılımı incelendiğinde 9-55 aralığında farklı sayılardaki kişi bulunduğu ve ağırlıklı olarak 30 yaş civarındakilerinin daha fazla olduğu görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 9’da her bir yaştan kaç kişi olduğunun dağılımı grafik olarak verilmiştir. Burada verilerin özellikle 20-30 yaş aralığında çok olduğu ve yine yoğunluğunun 10-30 yaş aralığında olduğu görülmektedir. Buradaki verilerin kişi sayısı olmadığı, her bir kişiden elde edilen görüntü sayısı olduğuna dikkat edilmelidir.

### 3.2 Kişi sınıflandırma bulguları

Toplam 100 kişiye ait farklı sayılarda görüntü verisi vardır. Tüm bu verilerin LPQ ile öznelikleri çıkarılmıştır. Her bir görüntünün kime ait olduğunu 100 kişi arasından belirlemek için sınıflandırma algoritmalarına sunulmuştur. Elde edilen doğru sınıflandırma oranları ve algoritma bilgileri aşağıdaki Tablo 2’de gösterilmiştir. En yüksek doğru sınıflandırma oranı %99.42 ile doğrusal modellerden (linear model) olan LogisticRegressionCV adlı algoritma ile elde edilmiştir. Bazı algoritmaların %90 üzerinde bazı algoritmaların ise %40 altında bir doğruluk oranı elde ettiği görülmektedir. Buradaki algoritma sayısı diğerlerinin sonuç üretmemesi nedeniyle toplam 14 olmuştur. Algoritmalar her denemede farklı sonuçlar üretmektedir. Fakat buradaki çalışmada her algoritma bir kez çalıştırılmıştır ve yalnızca varsayılan parametreler kullanılmıştır. Buradaki Logistic Regression CV algoritması için cv parametresi için 5 ve random\_state parametresi için 10 değeri kullanılmıştır. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile de farklı sonuçlar üretilebilecektir.



Şekil 9. Her bir yaştan kaç kişi olduğunu gösteren grafik

Tablo 2. Kişi sınıflandırma sonuçları

Algoritma Grubu	Algoritma Adı	Doğruluk Oranı (%)
svm	SVM	98.92005
discriminant_analysis	QuadraticDiscriminantAnalysis	4.004147
ensemble	HistGradientBoostingClassifier	17.81525
	LogisticRegressionCV	<b>99.42388</b>
linear_model	RidgeClassifierCV	96.15417
	PassiveAggressiveClassifier	12.01493
	LogisticRegression	3.802252
	gaussianNB	98.08434
naiveBayes	bernoulliNB	21.20113
	multinomialNB	1.814691
	NearestCentroid	72.93728
neighbors	RadiusNeighborsClassifier	1.310825
neural_network	MultiLayerPerceptron	94.13831
tree	ExtraTreeClassifier	39.07543

Toplam 100 kişi olması nedeniyle burada hata matrisi verilememiştir. Logistic Regression CV algoritması ile 6944

örneklem içinde yalnızca toplam 40 örneklem hatalı sınıflandırılmıştır. Bu durum çok yüksek bir sınıflandırma başarısı elde edildiğini göstermektedir.

### 3.3 Cinsiyet sınıflandırma bulguları

Ayak görüntülerinin erkek ya da kadın olarak sınıflandırmak için 28 farklı algoritma kullanılmıştır. En yüksek doğruluk oranı en yakın komşu algoritması ile %99,87 olarak elde edilmiştir. Diğer algoritmaların da sonuçları incelendiğinde hemen hemen tüm algoritmaların %80 üzerinde ve birçok algoritmanın ise %90 üzerinde doğruluk oranına sahip olduğu görülmektedir. NearestCentroid adlı algoritma ise %69.43 ile en düşük doğruluk oranına sahip algoritma olmuştur. Aşağıdaki Tablo 3'te elde edilen sonuçlar algoritma adları ile birlikte yüzdesel olarak verilmiştir. En yüksek başarı oranı elde edilen satır renkli olarak işaretlenmiştir.

Cinsiyet sınıflandırmasında KNN algoritması ile elde edilen sonuçların hata matrisi aşağıdaki Tablo 4'te verilmiştir. Burada verilerin dağılımının düzgün olmadığı ve erkek verilerde yığılma olduğu görülmektedir. Fakat buna rağmen sınıflandırma algoritması iyi bir öğrenme göstermiş ve yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Toplamda yalnızca dokuz kişiye ait veri yanlış sınıflandırılmıştır. Bunlardan iki tanesi kadın ve yedi tanesi erkektir.

### 3.4 Yaş sınıflandırma bulguları

Kişilerin yaşları farklı sayılarda değişmektedir. Bu değerlerin dağılımı daha önceki başlıklarda verilmiştir. Bu dağılım birbirine yakın sayılarda olmamasına rağmen Python programı içerisindeki algoritmalar yüksek bir öğrenme göstermişlerdir. Ensemble kategorisi altındaki Random Forest algoritması %98.14 oranında başarılı bir sınıflandırma oranı elde etmiştir. Bu değere yakın öğrenme sonucu üreten farklı algoritmalar da olmuştur. 24 farklı

algoritma ile yapılan testlerde sekiz tanesi %70 üzerinde doğruluk oranı elde etmişken 16 farklı algoritma daha düşük doğruluk oranı elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar gruplanmış bir şekilde aşağıdaki **Tablo 5**'te verilmiştir. En yüksek başarı oranı elde edilen satır renkli olarak işaretlenmiştir. Yaş etiket sayısının çok fazla olması nedeniyle hata matrisi burada gösterilememiştir. Toplam yalnızca 129 yaş örneklemini yanlış sınıflandırılmıştır. Kalan 6815 örneklemin tümü doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır.

**Tablo 3.** Cinsiyet sınıflandırma sonuçları

Algoritma Grubu	Algoritma Adı	Doğruluk Oranı (%)
discriminant_analysis	QuadraticDiscriminantAnalysis	93.8788589
	LinearDiscriminantAnalysis	92.0926544
ensemble	HistGradientBoostingClassifier	99.0349346
	Voting	98.1995729
	Bagging	96.9898617
	GradientBoosting	94.7860801
	AdaBoost	92.9567101
	randomForest	92.8850994
	RidgeClassifierCV	91.4161674
linear_model	PassiveAggressiveClassifier	86.7202952
	LogisticRegressionCV	86.1585636
	SGDClassifier	86.1585429
	LogisticRegression	86.1441337
	RidgeClassifier	86.1297867
	Perceptron	73.7510418
	CategoricalNB	86.1588332
naiveBayes	multinomialNB	86.1588124
	bernoulliNB	85.9281612
	complementNB	84.5456845
	gaussianNB	83.3932163
neighbors	KNN	<b>99.8703999</b>
	RadiusNeighborsClassifier	86.1587917
	NearestCentroid	69.4364854
neural_network	MultiLayerPerceptron	94.1380383
svm	SVM	97.0474779
	LinearSVC	86.1300147
tree	DecisionTree	88.0168971
	ExtraTreeClassifier	85.077872

**Tablo 4.** Cinsiyet sınıflandırması için KNN algoritmasını hata matrisi

Gerçek Değerler	Erkek Kadın	Tahmin Değerleri	
		Erkek	Kadın
		5975	7
		2	959

**Tablo 5.** Yaş sınıflandırma sonuçları

Algoritma Grubu	Algoritma Adı	Doğruluk Oranı (%)
discriminant_analysis	LinearDiscriminantAnalysis	85.63989
	QuadraticDiscriminantAnalysis	28.7199
ensemble	randomForest	<b>98.14212</b>
	Bagging	97.99822
	HistGradientBoostingClassifier	97.37879
	GradientBoosting	87.31118
	AdaBoost	9.621359
	RidgeClassifierCV	77.66129
	RidgeClassifier	19.3429
linear_model	SGDClassifier	18.85311
	PassiveAggressiveClassifier	12.15545
naiveBayes	LogisticRegression	10.24052
	gaussianNB	62.16346
	complementNB	26.17071
	bernoulliNB	19.66017
	multinomialNB	8.382788
	CategoricalNB	7.590363
	NearestCentroid	32.14741
neighbors	RadiusNeighborsClassifier	7.590405
neural_network	MultiLayerPerceptron	71.40982
	SVM	97.82518
svm	LinearSVC	26.67454
	ExtraTreeClassifier	37.92258
tree	DecisionTree	18.70949

Yukarıda verilerin sonuçlara göre en yüksek sınıflandırma başarısına sahip yöntemlere ait özgülük, duyarlılık ve F-ölçüsü değerleri aşağıdaki **Tablo 6**'da verilmiştir.

#### 4 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada kişilerin ayak görüntülerinden kim olduğunu, kaç yaşında olduğunu ve hangi cinsiyette olduğunu belirlemek amaçlanmıştır. Bunun için 100 farklı kişiden 6944 adet görüntü toplanmıştır. Bu görüntülerin yerel faz niceleme (LPQ) yöntemi ile öznelikleri çıkarılmış ve Python programı içerisindeki birçok farklı algoritma ile.

**Tablo 6.** En başarılı yöntemlerin diğer başarı ölçütleri

Kategori	Yöntem	Başarı Oranı	Özgüllük	Duyarlılık	F-Ölçüsü
Yaş	ensemble - RandomForest	% 98.14	% % 98.13	% 98.13	% 98.12
Kişi	neighbors - KNN	% 99.87	% 99.86	% 99.85	% 99.86
Cinsiyet	linear_model - LogisticRegressionCV	% 99.42	% 99.42	% 99.43	% 99.41

sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Kişi tanıma için % 99.42 oranında doğruluk oranı elde edilirken, cinsiyet için % 99.87 oranında başarı elde edilmiştir. Son olarak yaş için ise % 98.14 oranında sınıflandırma başarısına ulaşılmıştır. Tüm bu sonuçlar buradaki yöntem ile ayak görüntülerinden tanıma yapmanın yüksek başarı ile mümkün olduğunu göstermektedir.

**Tablo 7.** Farklı çalışmalar ile karşılaştırma tablosu

Reference	Number of subject	Method	Accuracy
Tanapon Keatsaman ve diğ. [30]	13	Evrişimli sinir ağı	%92.69
Wenxia Bao ve diğ. [31]	134	DTCWT, HOG	%88.13
Eryun Liu ve diğ. [4]	60	Derin evrişimli sinir ağı	%83
Wang ve diğ. [32]	320	SVM	%92.80
Yap ve ark. [33]	60	JSI	%94
Chae, Kang ve Noh [34]	96	VGG16, KNN	%92.55

Literatürde yapılan incelemelerde doğrudan buradaki çalışma ile benzerlik gösteren bir kaynağa rastlanmamıştır. Benzer sayılabilecek birkaç çalışma ile karşılaştırmaları Tablo 7’de verilmiştir. Buradaki çalışmanın yüksek başarı oranı yöntemin kaliteli bir görüntü tanıma yaptığını göstermektedir. Bu konuda yapılacak farklı çalışmalar ile ayak görüntülerinden birçok farklı hastalık ya da kişiye özgü durumların tespit edileceği düşünülmektedir. Ayrıca ileride yapılacak çalışmalarda ayak şekillerine göre de sınıflandırma çalışmaları yapılabilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne bağlı İleri Teknolojiler ABD’deki yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %5

#### Kaynaklar

[1] D. Ashlock and J. Davidson, Lexicodes in the space of foot patterns for image classification. in 1998 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation (Cat. No. 98EX165), IEEE, pp. 97-102, 1998.

- [2] K. M. Hashem and F. Ghali, Human identification using foot features. *Int J Eng Manuf*, 6, (4), 22-31, 2016. <https://doi.org/10.5815/ijem.2016.04.03>.
- [3] W. Jia, H.-Y. Cai, J. Gui, R.-X. Hu, Y.-K. Lei, and X.-F. Wang, Newborn footprint recognition using orientation feature. *Neural Computing and Applications*, 21, (8), 1855-1863, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00521-011-0530-9>.
- [4] E. Liu, Infant footprint recognition. in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1653-1660, 2017.
- [5] J. Jaruenpunyasak and R. Duangsoithong, Empirical analysis of feature reduction in deep learning and conventional methods for foot image classification. *IEEE Access*, 9, 53133-53145, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069625>.
- [6] R. Ghotaslou, M. Y. Memar, and N. Alizadeh, Classification, microbiology and treatment of diabetic foot infections. *Journal of wound care*, 27, (7), 434-441, 2018. <https://doi.org/10.12968/jowc.2018.27.7.434>.
- [7] R. Khokher, R. C. Singh, and R. Kumar, Footprint recognition with principal component analysis and independent component analysis. in *Macromolecular symposia*, 347, (1), pp. 16-26, 2015. <https://doi.org/10.1002/masy.201400045>.
- [8] S. F. Stewart, Human gait and the human foot: an ethnological study of flatfoot: Part I. *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)*, 70, 111-123, 1970.
- [9] J. B. Volpon, Footprint analysis during the growth period. *Journal of pediatric orthopedics*, 14, (1), 83-85, 1994. <https://doi.org/10.1097/01241398-199401000-00017>.
- [10] S. Braun, L. Basquin, and C. Mery, The contour of the normal foot. A statistical study. *Revue du Rhumatisme et des Maladies Ostéo-articulaires*, 47, (2), 127-133, 1980.
- [11] U. B. Rao and B. Joseph, The influence of footwear on the prevalence of flat foot. A survey of 2300 children. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 74, (4), 525-527, 1992. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.74b4.1624509>.
- [12] Y. Park, J. Lee, and K. Park, Foot shape classification methods based on image processing for shoe manufacturing. in *2019 International Conference on Information and Communication Technology*

- Convergence (ICTC), IEEE, 1265-1268, 2019; <https://doi.org/10.1109/ICTC46691.2019.8939978>.
- [13] D.-H. Seong, U.-S. Jeong, and Y.-J. Jo, A study on the categorization of korean foot shapes. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, 25, (2), 107-118, 2006. <https://doi.org/10.5143/JESK.2006.25.2.107>.
- [14] S.-H. Choi and J.-S. Chun, The comparison of foot shape classification methods. *The Research Journal of the Costume Culture*, 15, (2), 252-264, 2007.
- [15] A. F. Ola, Personality Identification System based on Human Foot Anatomy. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 9, (2), 490-497, 2018. <https://doi.org/10.21275/ART20201838>.
- [16] R. Robinson. Foot Reading. *Pedi Reviews Foot care expert*. <https://www.pedireviews.co.uk/foot-reading/> (accessed 20.09.2021).
- [17] G. Luo, V. L. Houston, M. Mussman, M. Garbarini, A. C. Beattie, and C. Thongpop, Comparison of male and female foot shape. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 99, (5), 383-390, 2009. <https://doi.org/10.7547%2F0990383>.
- [18] K. A. Reinker and S. Ozburne, A comparison of male and female orthopaedic pathology in basic training. *Military medicine*, 144, (8), 532-536, 1979. <https://doi.org/10.1093/milmed/144.8.532>.
- [19] L. Rosendal, H. Langberg, A. Skov-Jensen, and M. Kjær, Incidence of injury and physical performance adaptations during military training. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 13, (3), 157-163, 2003.
- [20] F. P. Oliveira, A. Sousa, R. Santos, and J. M. R. Tavares, Towards an efficient and robust foot classification from pedobarographic images. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 15, (11), 1181-1188, 2012. <https://doi.org/10.1080/10255842.2011.581239>.
- [21] F. P. Oliveira, T. C. Pataky, and J. M. R. Tavares, Registration of pedobarographic image data in the frequency domain. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 13, (6), 731-740, 2010. <https://doi.org/10.1080/10255840903573020>.
- [22] Z. Q. Liang, Y. Meng, S. Popik, and F. F. Chen, Analysis of foot morphology in habitually barefoot group. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, 41, 1-9, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JBBBE.41.1>.
- [23] T. C. Michaud, Human locomotion: the conservative management of gait-related disorders. *Newton Biomechanics*, 2011.
- [24] Y. Hong, L. Wang, D. Q. Xu, and J. X. Li, Gender differences in foot shape: a study of Chinese young adults. *Sports biomechanics*, 10, (02), 85-97, 2011. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.569567>.
- [25] M. Saghadzadeh, N. Kitano, and T. Okura, Gender differences of foot characteristics in older Japanese adults using a 3D foot scanner. *Journal of foot and ankle research*, 8, (1), 1-7, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13047-015-0087-4>.
- [26] V. Ojansivu and J. Heikkilä, Blur insensitive texture classification using local phase quantization. in *International conference on image and signal processing*: Springer, pp. 236-243, 2008.
- [27] T. Ahonen, E. Rahtu, V. Ojansivu, and J. Heikkilä, Recognition of blurred faces using local phase quantization. in *2008 19th international conference on pattern recognition*: IEEE, pp. 1-4, 2008.
- [28] A. Durmuşoğlu and Y. Kahraman, Face Expression Recognition Using a Combination of Local Binary Patterns and Local Phase Quantization. in *2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCISc)*, 1: IEEE, pp. 1-5, 2021.
- [29] H.-T. Nguyen, Contributions to facial feature extraction for face recognition. *Université de Grenoble*, 2014.
- [30] T. Keatsamarn and C. Pintavirooj, Footprint Identification using Deep Learning. in *2018 11th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*: IEEE, pp. 1-4, 2018.
- [31] W. Bao, Y. Wang, N. Wang, and J. Tang, Optical Footprint Image Recognition Algorithm Based on Metric Learning and SVM. in *2020 International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*: IEEE, pp. 864-868, 2020.
- [32] R. Wang, W. Hong, and N. Yang, The research on footprint recognition method based on wavelet and fuzzy neural network. in *2009 Ninth International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, 3, 428-432, 2009. <https://doi.org/10.1109/HIS.2009.300>.
- [33] M. H. Yap et al., A new mobile application for standardizing diabetic foot images. *Journal of diabetes science and technology*, 12, (1), 169-173, 2018. <https://doi.org/10.1177/1932296817713761>.
- [34] J. Chae, Y.-J. Kang, and Y. Noh, A deep-learning approach for foot-type classification using heterogeneous pressure data. *Sensors*, 20, (16), 4481, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20164481>.





## A high order proximity measure for linear network embedding

### Ağ gömülümü için yüksek boyutlu yakınsaklık ölçüsü

Mustafa Coşkun<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Abdullah Gul University, Computer Engineering Department, 38080, Kayseri Turkey

#### Abstract

Graph representation learning (network embedding) is at the heart of network analytics techniques to reveal and examine the complex dependencies among nodes. Owing its importance, many computational methods have been proposed to solve a large volume of learning tasks on graphs, such as node classification, link prediction and clustering. Among various network embedding techniques, linear Matrix Factorization-based (MF) network embedding approaches have demonstrated to be very effective and efficient as they can be stated as singular value decomposition (SVD) problem, which can be efficiently solved by off-the-shelf eigen-solvers, such as Lanczos method. Despite the effectiveness of these linear methods, they rely on high order proximity measures, i.e., random walk restarts (RWR) and/or Katz, which have their own limitations, such as degree biasness, hyper-parameter dependency. In this paper, to alleviate the RWR and Katz depended high proximity usage in the linear embedding methods, we propose an algorithm that uses label propagation and shift-and-invert approach to resort RWR and Katz related problems. Testing our methods on real-networks for link prediction task, we show that our algorithm drastically improves link prediction performance of network embedding comparing against an embedding approach that uses RWR and Katz high order proximity measures.

**Keywords:** Graph representation learning, Node embedding, Linear embedding

#### 1 Introduction

Networks (graphs) are ubiquitous in the real-world applications to represent the relationships (edges) among entities (nodes), such as social networks are used to represent the social relationship among people and protein-protein interaction networks are formed from genetic or physical associations among genes. To understand and examine the complex dependencies among the nodes, networks' association information might not be enough. Thus, we need to state and encode networks' topological structural information (association information) in a continuous latent space, which could then be used in the off-the-shelf machine learning algorithms as features. There are at least two valid reasons to use the latent representations of a network instead of its plain representation: sparseness of networks and computational complexity of underlying machine learning algorithms.

#### Öz

Ağ gömülümü öğrenme problemi bir çok ağ analizi gerektiren problemin ifade ve çözümlenmesi için çok büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, ağ içerisinde bulunan düğümlerin birbirleri ile olan gizli ilişkilerini açığa çıkarmak için, son yıllarda ağ gömülümü öğrenme problemi çokça çalışılmaktadır. Bu gizli ilişkinin açığa çıkarılması, bağlantı tahminleme, öbekleme ve sınıflandırma gibi öğrenme problemlerinin daha iyi çözümlenmesinde kullanılmaktadır. Ağ gömülümünü öğrenmek için, farklı yaklaşım ve algoritmalar geliştirilmiş olsada, matris ayrışımı bazlı algoritmalar hızlı olmasından dolayı araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmekteler. Matris ayrışım bazlı ağ gömülümü öğrenmede genel anlamı ile yüksek dereceli yakınlık ölçüleri kullanılmaktadır, örneğin random walk with restart (RWR) ve Katz ölçüleri. Ancak, bu ölçülerle yapılan ağ benzerlik ölçüleri matris ayrışımında sıfıra karşılık gelen eigenvectors (özvektörler) üretebilmektedir. Bu ise öğrenilen ağ gömülümün yanlış olmasına sebep olmaktadır. Bu problemi aşmak için, bu makalede shift-and-invert (kaydır ve tersini al) yaklaşımına dayanarak bir yaklaşım önerdik. Bağlantı tahmini baz problemi olarak, geliştirdiğimiz algoritmayı üç gerçek veride kullanık ve sonuçların var olan matris ayrışım bazlı algoritmasını bütün metrik değerlendirmelerinde var olan algoritmanın performansını ciddi miktarda artırdığını gözlemledik.

**Anahtar kelimeler:** Ağ gömülümü, Düğüm gömülümü, Lineer ağ gömülümü

Graph representation learning (network embedding) is an emerging research topic that is used to learn the structural representations of networks. Specifically, the representation learning aims at mapping the topological structure of the networks into a continuous lower-dimension so that off-the-shelf machine learning algorithms can readily be applied on continuous vector representation for various learning tasks, such as node classification and clustering. Here the basic premise behind the graph representation learning is to map a graph into a k-dimensional continuous vector space, such that if two nodes are close in the network, they should be close to each other in the vector representation.

There are a plethora of papers and methods for network embedding, which we can broadly categorize into three groups: Matrix Factorization (MF)-based, random walk-based and neural network-based [1]. Among these categories, random walk-based methods rely on computing

latent representation via random walk restart procedure, such as DeepWalk [2] and LINE [3], while neural network-based methods, such as GAE [4] and DGI [5] require additional attribute information which might not be available for every network. On the other hand, MF-based approaches have been soaring many research attentions due to their easy implementation and low cost computational complexity. As such, one of the well-known MF-based methods, HOPE [6], has been used for many learning tasks [1].

Despite the effectiveness of HOPE network embedding method [6], it computes an embedding using the idea of high order proximity preservation, which relies on personalized random walk (i.e., RWR) or Katz measures. However, these high order proximity measures do not take the ill-conditioning problem into account. More specifically, the very first step of RWR, degree normalization, can cause close-to-zero diagonal entries for low degree nodes which result in wrong matrix inversion, which is known as ill-conditioning problem [7] in computational mathematics.

In this paper, to circumvent the ill-conditioning problem introduced by HOPE method [6] in its high order proximity measure computation, we use the idea of shift-and-invert to take the ill-conditioning problem into account [7]. This way, we eliminate the adversely effects of the low degree nodes and define a new high order proximity measure, HOPE++, for computing network embeddings. To test our proposed method's performance against HOPE method, computed by RWR and Katz measures, we use the link prediction as a benchmark problem on three real-world datasets. Experimental results on these three datasets show that our approach drastically improves performance of HOPE method across all evaluation metrics: Accuracy, Area Under Precision Curve, Area Under ROC Curve and Macro-F1 scores, used in this paper.

## 2 Related work

We can trace back the original idea of network embedding to the early 2000s, including but not limited to Isomap [8] and Locally Linear Embedding [9]. These ideas revolve around the use of a linear system of equation solution and singular value decomposition (SVD) of a matrix, usually graph Laplacian, created by the adjacency matrix of a graph [10]. These methods aim at learning an embedding with the constraint: local manifold structure must be preserved.

More recently, with the advent of the large-scale graphs, a variety of scalable graph representation learning methods, [2,3,5,6,11,12] which rely on random walk procedure to capture the global properties of nodes in the graph have been proposed. While powerful, random walk-based methods suffer from known limitations, such as degree biasness [13,14].

In addition to random walk-based embedding approaches, inspired by the remarkable success of Deep Learning methods in the field of computer vision, neural network based approaches have been utilized for graph embedding [4,5,15]. These methods use both attribute of nodes and graph topology in their propagation step. As using many layers of neural network causes feature mix-matching problem [16], these methods limit their feature propagation

step into 1-hop proximity. Recently, Coskun and Kuyuturk [17] show that usage of 2-hop proximity-based graph convolutional networks can improve performance link prediction. However, all the above methods do not consider the high-order proximity measure in their propagation. There exist high-order proximity-based propagation neural network methods, such as [18] however these methods still rely on random walk procedure.

In this paper, we present a simple yet very effective network embedding method that consider high-order proximity of a graft while it eliminates ill-conditioning problem introduced by random walk procedure. As our proposed method is a linear approach, it is computationally very efficient comparing to neural network-based approaches [4,5,17,18,19,20]. Furthermore, our approach does not require add-on information, such as node attributes as in neural network-based methods [4,5,17,18,19,20]. Last but not the least, our method eliminates adversely effects of low-degree nodes which has not been considered in other linear methods [2,3,6].

## 3 Material and methods

In this section, we first define the link prediction problem [21] in the context of graph representation learning and then we introduce our proposed network embedding approach to solve the link prediction problem.

### 3.1 Link prediction

The problem of link prediction can be loosely defined as follows: given a graph, predict the missing links among the nodes. More formally, given a graph  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , where  $\mathcal{V}$  denotes set of  $n$  nodes in the graph and  $\mathcal{E}$  represents the set of  $m$  edges among  $n$  nodes, the task is to predict some of the missing edges in graph. The link prediction problem has many real-world applications ranging from co-authorship prediction [13] to drug response prediction [14].

Earlier algorithms for solving link prediction problem have focused on local graph topological informations, such as common neighbor, adamic-adar, and etc [21] while recent studies have shown that global graph structural information, which can be seen as topological graph representations and can be more informative to determine the missing links [13]. Very recently, graph representation learning algorithms have been applied to link prediction problem to circumvent the curse of dimensionality problem, high dimensionality problem [13] pronounced in global representations of the underlying graph [2,3,4,5,6].

These embedding techniques first map the graph structural information into a lower dimensional continuous space, such that each node is represented by a  $k$ -dimensional vector. Then, for a given pair of nodes, their corresponding  $k$ -dimensional latent vector are fused to generate a feature vector for learning. To be more specific, the fused networks are used in training with their associated labels (1 if two nodes are connected in the graph and 0 otherwise). Finally, any supervised machine learning algorithm, such as Support Vector Machine (SVM), is used to train and test the existence of links.

### 3.2 Network embedding

Graph representation learning (Network Embedding) aims at learning a lower continuous representation of each node in a given graph. More formally, given a graph  $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ , network embedding maps the graph's structural information into an embedding matrix,  $H \in \mathbb{R}^{n \times d}$ , where  $d \ll n$ , such that if given two nodes  $i$  and  $j$  are "close" to each other in the graph, their representations  $h_i$  and  $h_j$ , respectively, should be "close" to each other.

The abstract term "close" is concreted by the different mean of proximity measures. For example, random walk-based embedding techniques [2,3] rely on random walk-based closeness global measures, such as random walk with restarts (RWR), while neural network-based approaches use more local closeness measures, see e.g., [4,5].

Despite the effectiveness of these methods, random walk-based approaches [2,3] suffer from random-walk related limitations, such as degree biasness [4], and Neural Network-based methods [4,5] are limited to small network as training time of these methods are extremely costly. On the other hand, MF-based approaches, such as singular value decomposition (SVD) and HOPE [6] enjoy efficient algorithms from numerical linear algebra literature, such as Lanczos [7].

Inspired by the effectiveness and efficiency of the MF-based approaches, in this paper, we use HOPE [6] algorithm as our baseline algorithm. In the following subsections, we first define HOPE algorithm [6] in a formal framework and then present our approach to overcome some limitations of HOPE algorithm, rooted in random walk-based closeness measure.

#### 3.2.1 HOPE [6] Algorithm

Ou et. al., [6] has presented HOPE algorithm as one of the MF-based approaches. In essence, they obtain a graph representation,  $H \in \mathbb{R}^{n \times d}$ , by using various form of closeness measures. To be more specific, they define following objective function to obtain the embedding matrix [6]:

$$\min \|S - HH^T\|^2 \quad (1)$$

where  $S$  is a proximity matrix (encodes closeness of two nodes by using various proximity measures) and  $H$  denotes embedding matrix, which best represents  $S$  matrix in the latent space. Here, the most important part of the objective function is that how we construct the proximity matrix from which we learn the representations of nodes. To do so, Ou et. al., [6] use four well-known proximity measures: Common Neighbour (CN), Adamic-Adar (AA), RWR and Katz [8], respectively:

$$S^{CN} = A^2 \quad (2)$$

$$S^{AA} = A D^{-1} A \quad (3)$$

$$S^{RWR} = (1 - \alpha)(I - \alpha P)^{-1} \quad (4)$$

$$S^{Katz} = (I - \beta A)^{-1} \beta A \quad (5)$$

where  $A$  denotes adjacency matrix of the graph,  $D$  denotes diagonal degree matrix,  $I$  denotes the identity matrix,  $P = D^{-1}A$  represents degree normalized adjacency matrix, i.e., transition probability matrix, and  $\alpha$  and  $\beta$  are hyper-parameters.

By using various form of  $S$  matrix, Ou et. al., [6] solve, Equation (1) as singular value decomposition and return the top singular vectors corresponding to the top singular values as embedding matrix. Furthermore, they show that high-order proximity measures presented in Equation (4) and Equation (5) outperform lower-order proximity measures in Equation (2) and Equation (3) on link prediction tasks [6].

#### 3.2.2 Our proposed method

Despite the effectiveness and efficiency of HOPE method [6], they do not take the ill-conditioned problem [7] of high-order proximity measures employed in their algorithm. More specifically, proximity measures in Equation (4) and Equation (5) might be ill-conditioned, which result in 0 singular value corresponding singular values because of "dangling nodes", i.e., nodes that do not have any connected nodes or close-zero values, smaller than the machine epsilon, due to normalization for small degree nodes. To see this, pay attention to inner part of Equation (4),  $(I - \alpha P)$ . When  $\alpha$  is set to a large constant, which is usually preferred to rely on network structural information, inversion of the matrix faces with round-off error [7] which might result in wrong embedding matrix.

In this paper, to alleviate this problem, we regularize the matrix,  $(I - \alpha P)$ , with a sparsity constraint, considering "dangling node" and small degree nodes, to attain a better and more correct embedding matrix. First, we write general assumption of network embedding: if nodes are close to each other in the graph, they must be close in the latent space, that can mathematically be states as follows:

$$\mathcal{J} = \min \sum_{ij} A_{ij} \|h_i - h_j\| \quad (6)$$

where  $h_i$  and  $h_j$  are embedding vectors of nodes  $i$  and  $j$ . It is well-known that Equation (6) can be stated in the matrix form as follows [11]:

$$\mathcal{J} = \min h^T (D - A)h \quad (7)$$

Now, by scaling  $A$  with  $\alpha$  and multiplying with  $D^{-1}$ , we obtain the same equation in Equation (6). However, as aforementioned this matrix does not consider "dangling nodes" and/or small degree nodes. To overcome this limitation, we propose regularize Equation (7) with  $\sigma I$  and rewrite objective function as follows:

$$\mathcal{J}_{ours} = \min h^T (I - \alpha P + \sigma I)h \quad (8)$$

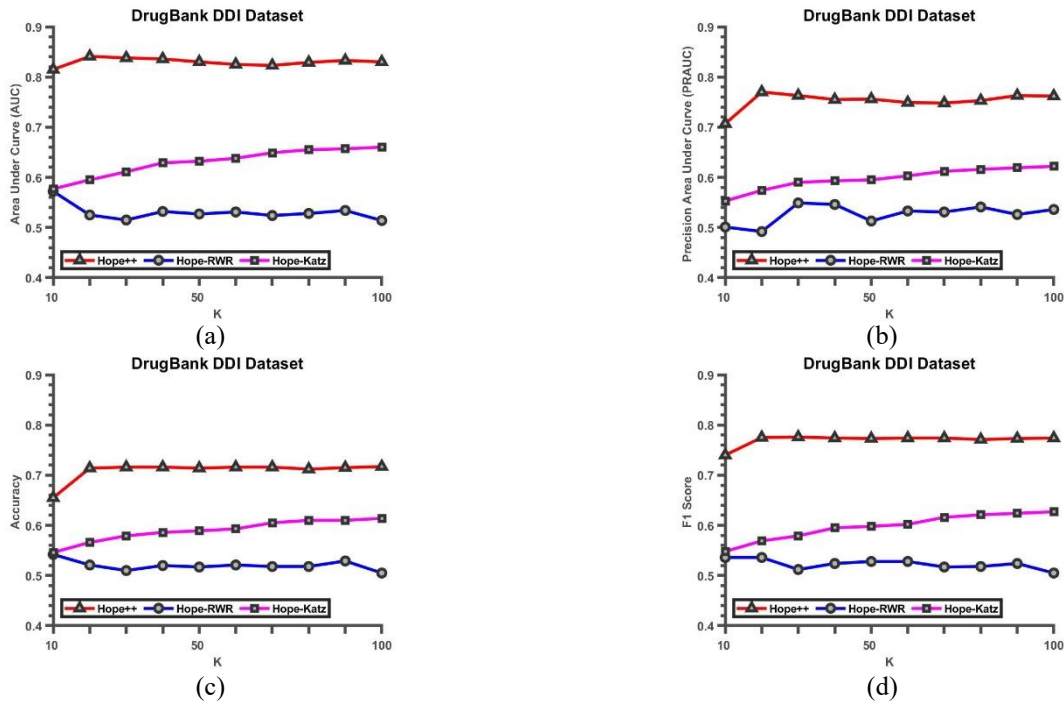
where,  $\sigma = 0.5$  is a hyper-parameter. Finally, we present a new high-order proximity measure in HOPE as follows:

$$S^{ours} = (1 - \alpha)((1 + \sigma)I - \alpha P)^{-1} \quad (9)$$

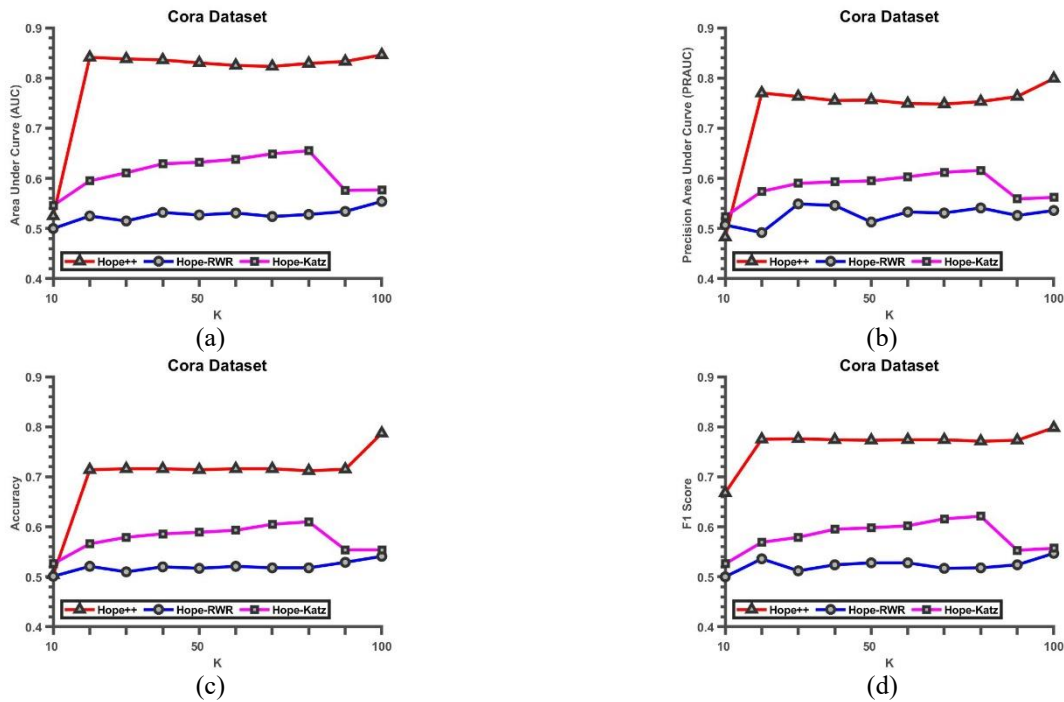


In this paper, with this simple change, we are able to create a better proximity measures which leads significantly better network embedding in link prediction task than that of

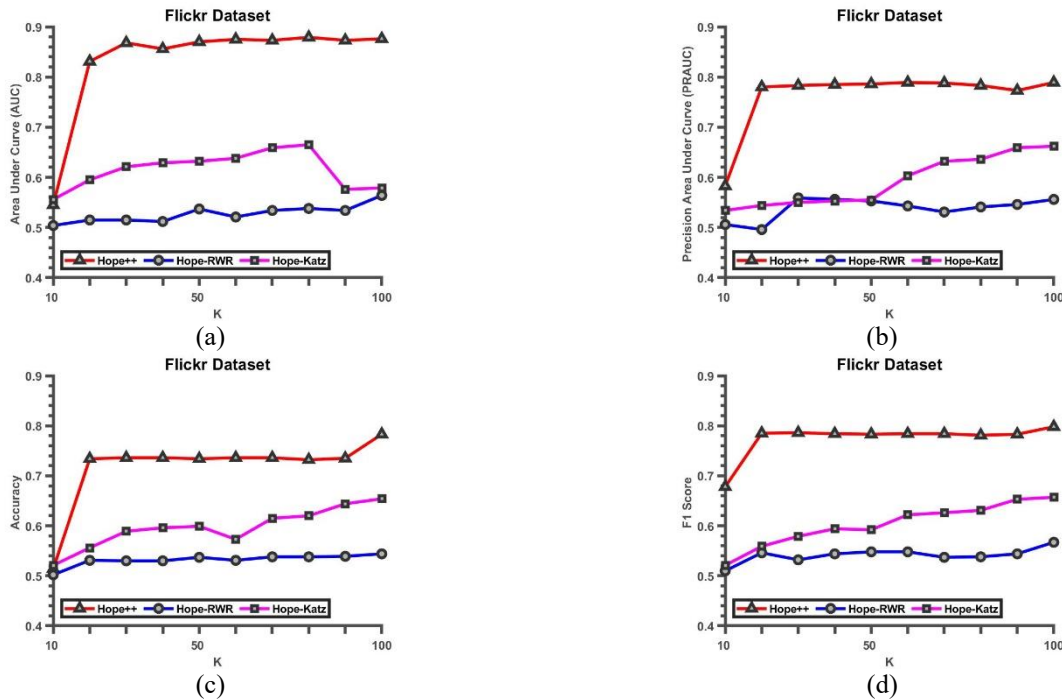
HOPE algorithm offers. Since we are using HOPE algorithm as our baseline method, we named our method as HOPE++.



**Figure 1.** Link prediction performance of our method, HOPE++, and a state-of-the-art method, HOPE with RWR and Katz high-order proximity on Drug Bank DDI dataset (a) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUC score (b) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUCPR score (c) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Accuracy score (d) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Macro-F1 score



**Figure 2.** Link prediction performance of our method, HOPE++, and a state-of-the-art method, HOPE with RWR and Katz high-order proximity on Cora dataset (a) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUC score (b) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUCPR score (c) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Accuracy score (d) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Macro-F1 score



**Figure 3.** Link prediction performance of our method, HOPE++, and a state-of-the-art method, HOPE with RWR and Katz high-order proximity on Flickr dataset (a) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUC score (b) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is AUCPR score (c) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Accuracy score (d) x-axes are varying embedding dimension and y-axes is Macro-F1 score

## 4 Results and discussions

In this section, we systematically evaluate the link prediction performance of our proposed method, HOPE++. Since HOPE++ uses HOPE algorithm [6] as a workhorse method, we compare our method against HOPE algorithm's high order proximity measures, namely RWR and Katz.

We start our discussion by describing the datasets and experimental setup used in this paper. We then give performance evaluation of embeddings attained by our methods and HOPE with RWR and Katz methods on link prediction task as a function embedding dimension. To this end, we use Area Under Curve (AUC), Area Under Precision Curve (AUPR), Accuracy and Macro-F1 scores evaluation metric.

### 4.1 Datasets and experimental setup

We use three publicly available real-world datasets whose static is summarized in Table 1. These datasets are obtained from [1], [4] and [6].

**Table 1.** Descriptive static of networks used in this paper

Datasets	# of Nodes	# of Edges
Drug_Bank_DDI	2.191	240.027
Cora	2.708	10.556
Flickr	7.575	239.738

**Drug Bank Drug-Drug Interaction:** This dataset represents the association/similarity among various drugs, which are the node and associations are edges.

**Cora Dataset:** This dataset represents the citation networks, where nodes are papers and links are citation relationship among the papers.

**Flickr Dataset:** This dataset represents an online community, where people are represented as nodes and their common interests denote edges in the graph.

In our experiments, we use Python code provided [1] and implement HOPE++ on top of this Python code. We evaluate performance of HOPE++ and HOPE algorithm that used RWR and Katz high-order proximity with default hyper-parameters on link prediction task as a function of varying embedding dimension.

### 4.2 Performance evaluation

To assess the performance of the proposed method, HOPE++, and original HOPE algorithm, we use link prediction problem as a benchmark problem. To this end, we first divide the networks into training and testing by 80% and 20% respectively. We use 80% of links for embedding purpose. We then treat 20% links as positive test links. Furthermore, we randomly sample 20% negative links by checking if two nodes are connected in both training and testing networks. Subsequently, we use embedding matrices attained by HOPE++, HOPE-RWR and HOPE-Katz on training networks, and positive and negative pairs' corresponding embeddings are fused by the dot (Hadamard) product so that we obtain a single score for each pair. Finally, we use these single scores and associated labels (1 if we are evaluating positive pairs; 0 otherwise) and feed them to Logistic Regression Classifier with 80% training and 20% testing.

We repeat experimental process for ten times and report means of evaluation metrics for each algorithm. Result of these analyses are depicted in Figures 1, 2 and 3. More specifically, red lines in the figures are our proposed methods, HOPE++, that uses  $S^{ours} = (1 - \alpha)((1 + \sigma)I - \alpha P)^{-1}$  while blue and magenta lines represent HOPE algorithm that uses  $S^{RWR} = (1 - \alpha)(I - \alpha P)^{-1}$  and  $S^{Katz} = (I - \beta A)^{-1} \beta A$ , respectively. As seen in the figures, across all datasets and all evaluation metrics, HOPE++, drastically improve performance of baseline method, HOPE algorithm [6], suggesting that a simple shift-and-invert based approach can drastically boost the performance of exiting linear embedding methods.

From Figures 1, 2 and 3, we can observe that our proposed method can deliver better results than HOPE with small dimension. This observation suggests that leading singular vectors in our method can capture the general connectivity structure better than that of HOPE method [6]. Furthermore, across all figures, we can observe performance oscillation for RWR-based embedding, suggesting wrong singular vector computation due to round-off error. On the other hand, our method delivers a smooth curve performance, hinting the importance of regularization approach we propose in this paper.

## 5 Conclusions

In this paper, we propose an alternative linear MF-based network embedding methods by capitalizing on the shift-and-invert approach. The idea of using shift-and-invert regularization is based on the premise that low degree nodes in a graph can cause round-off error in the inversion of proximity matrices. To eliminate this adversely effects of small degree nodes, we regularize the Graph Laplacian by identity matrix so that we can increase the diagonally dominance. In order to evaluate our proposed approach, we use link prediction task as a benchmark problem on three real-world datasets. Extensive experimental evaluations for the link predict task demonstrate that our approach highly renders to improve MF-based embedding approach that uses well-known high-order proximity measures, such as random walk with restarts and Katz. The future effort in this direction would include incorporation of other learning tasks, such as node classification and their bioinformatics applications.

## Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

**Similarity rate (iThenticate):** 8%

## References

- [1] X. Yue, Z. Wang, J. Huang, S. Parthasarathy, S. Moosavinasab, Y. Huang, S. M. Lin, W. Zhang, P. Zhang and H. Sun, Graph embedding on biomedical networks: methods, applications and evaluations. *Bioinformatics*, 36(4), 1241–1251, 2020. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz718>
- [2] B. Perozzi, R. Al-Rfou and S. Skiena, Deepwalk: online learning of social representations. In *The 20th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 701–710. ACM, New York, NY, 2014.
- [3] J. Tang, M. Qu, M. Wang, M. Zhang, J. Yan and Q. Mei, Line: large-scale information network embedding. In: *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web*, pp. 1067–1077, ACM, Florence, Italy, 2015.
- [4] T. N. Kipf and M. Welling, Semi-supervised classification with graph convolutional networks. *4th International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2016.
- [5] P. Veličković, W. Fedus, W. L. Hamilton, P. Liò, Y. Bengio and R. D. Hjelm, Deep graph infomax. *7th International Conference on Learning Representations (ICLR)*, 2019
- [6] M. Ou, P. Cui, J. Pei, Z. Zhang and W. Zhu, Symmetric transitivity preserving graph embedding. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1105–1114, ACM, San Francisco, CA, 2016.
- [7] Y. Saad, *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. PWS Publishing Co., Boston, 1996.
- [8] M. Balasubramanian, et al., The isomap algorithm and topological stability. *Science* 295.5552, pp. 7–7, 2002. doi: 10.1126/science.295.5552.7a
- [9] L. K. Saul and S. T. Roweis, An introduction to locally linear embedding. In:unpublished. Available at: <http://www.cs.toronto.edu/roweis/lle/publications>, 2000. Accessed 27 May 2022.
- [10] M. Belkin and P. Niyogi, Laplacian eigenmaps for dimensionality reduction and data representation. *Neural Computation*, 15(6), 1373–1396, 2003.
- [11] A. Grover and J. Leskovec, node2vec: Scalable feature learning for networks. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 855–864, ACM, San Francisco, CA, 2016
- [12] L. FR. Ribeiro, P. HP. Saverese and D. R. Figueiredo, struc2vec: Learning node representations from structural identity. In: *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 385–394, 2017.
- [13] M. Coskun and M. Koyutürk, Link prediction in large networks by comparing the global view of nodes in the network. In *2015 IEEE International Conference on Data Mining Workshop (ICDMW)*, pages 485–492. IEEE, NJ, USA, 2015.
- [14] Z. Stanfield, M. Coskun and M. Koyutürk, Drug response prediction problem as link prediction problem. *Scientific Reports*, 7, 40321, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40321>.
- [15] X. Huang, J. Li and X. Hu, Label informed attributed network embedding. In *Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Web Search and Data Mining*. 731–739, 2017.
- [16] L. FR. Ribeiro, P. HP. Saverese and D. R. Figueiredo, struc2vec: Learning node representations from structural identity. In: *Proceedings of the 23rd ACM*

- SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. pp. 385–394, 2017.
- [17] M. Coskun and M. Koyutürk, Node similarity-based graph convolution for link prediction in biological networks. *Bioinformatics*, 37(23), 4501-4508, 2021. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btab464>
- [18] J. Klicpera, A. Bojchevski and S. Günnemann, Predict then propagate: Graph neural networks meet personalized pagerank. *International Conference on Learning Representations*, 2018.
- [19] J. Gilmer, et al., Neural message passing for quantum chemistry. In *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, Volume 70, pages 1263–1272. *JMLR.*, 2017.
- [20] Q. Li, et al., Deeper insights into graph convolutional networks for semi-supervised learning. In *Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence*, April 29, 2018
- [21] D. Liben-Nowell and J. Kleinberg, The link-prediction problem for social networks. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58(7), 1019–1031, 2007. <https://doi.org/10.1002/asi.20591>





# A survey of recent studies on COVID-19 outbreak prediction using statistical and machine learning methods

## İstatistiksel ve makine öğrenme yöntemleri ile COVID-19 salgın tahmini üzerine yapılan güncel çalışmaların incelemesi

Umut Ahmet Çetin<sup>1</sup> , Fatih Abut<sup>2,\*</sup> 

<sup>1,2</sup> Çukurova University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 01330, Adana, Turkey

### Abstract

COVID-19 is an infectious disease first discovered in Wuhan City, China, in December 2019. Ever since, COVID-19 has infected more than 70 million people and caused more than 1 million deaths worldwide. There is a need for models that predict the COVID-19 outbreak as accurately as possible to combat such an infectious and deadly disease. By using the results of the prediction models, governments can make better decisions and control measures about the disease, such as arranging budget and facility planning to combat the disease, deciding on how many medicines and medical equipment should be produced or imported, and how much medical staff is going to be needed. Consequently, various regression and classification models have been proposed for time series or supervised prediction of the COVID-19 outbreak in several countries and continents. This study aims to give an overview of recent studies on predicting the COVID-19 outbreak utilizing statistical and machine learning methods. Particularly, for each study, we outline the utilized ground-truth dataset characteristics, the type of the developed models, the predictor variables, the statistical and machine learning methods, the performance metrics, and finally, the major conclusion. The survey results reveal that machine learning methods are promising tools for making predictions for various needs, such as predicting whether a patient is infected with COVID-19 or not, predicting the trend of COVID-19 outbreaks, or predicting which age groups are most affected by COVID-19.

**Keywords:** Machine learning, Classification, Regression, COVID-19, Coronavirus

### 1 Introduction

COVID-19 is an infectious disease caused by the coronavirus, also known as SARS-CoV-2. COVID-19 is a respiratory pathogen that was first discovered in Wuhan City, China, in December 2019 [1], and ever since, COVID-19 has infected more than 70 million people and caused more than 1 million deaths worldwide [2], which was recognized as a pandemic by WHO since March 11, 2020 [3].

To combat such an infectious and deadly disease, there is a need for models that predict the COVID-19 outbreak as accurately as possible so that governments can make better

### Öz

COVID-19, ilk olarak Aralık 2019'da Çin'in Wuhan şehrinde ortaya çıkan bulaşıcı bir hastalıktır. O zaman beri COVID-19 dünya çapında 70 milyondan fazla insanı enfekte etmiştir ve 1 milyondan fazla ölüme neden olmuştur. Bu denli bulaşıcı ve ölümcül bir hastalıkla mücadele etmek için COVID-19 salgını mümkün olduğunca doğru tahmin eden modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Hükümetler tahmin modellerinin sonuçlarını kullanarak hastalıkla mücadele için bütçe ve tesis planlaması, ne kadar ilaç ve tıbbi ekipmanın üretilmesine veya ithal edileceği ve ne kadar tıbbi personele ihtiyaç duyulacağı hakkında daha iyi kararlar ve kontrol önlemleri alabilir. Sonuç olarak, çeşitli ülke ve kıtalarda COVID-19 salgınının zaman serileri veya denetimli tahmini için çeşitli regresyon ve sınıflandırma modelleri önerilmiştir. Bu makale, istatistiksel ve makine öğrenimi yöntemlerini kullanarak COVID-19 salgını tahmin etmeye yönelik son çalışmalara genel bir bakış sunmayı amaçlamaktadır. Özellikle, her çalışma için, kullanılan veri kümesi özelliklerini, geliştirilen modellerin türünü, tahmin değişkenlerini, istatistiksel ve makine öğrenimi yöntemlerini, performans ölçümlerini ve son olarak ana sonucu ana hatlarıyla özetlenmiştir. Araştırma sonucu, makine öğrenme yöntemlerinin, COVID-19 salgını eğilimini tahmin etmek veya bir hastanın COVID-19 ile enfekte olup olmadığını tespit etmek gibi çeşitli ihtiyaçlar için tahminler yapmak için umut verici araçlar olduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Makine öğrenimi, Sınıflandırma, Regresyon, COVID-19, Koronavirüs

decisions about the disease. Some of such governmental decisions include (a) arranging a budget to combat disease as effectively as possible, (b) checking the sufficiency of facilities before becoming overfilled, (c) deciding on how many medicines and medical equipment should be produced or imported, and finally (d) how much medical staff is going to be needed.

Studies for developing prediction models for other diseases have been conducted in the past decades, such as swine fever, dengue fever, H1N1 flu, and influenza. But due to different characteristics and COVID-19's spread being on

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fabut@cu.edu.tr

Geliş / Received: 17.11.2021 Kabul / Accepted: 22.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1025095

an unprecedented scale, measures were taken that had almost never been done, such as nationwide curfews, nationwide closing of business and public places, being required to wear a mask outside homes, turning public places like stadiums into temporary hospitals, and many similar measures.

There are two types of prediction models currently used to produce COVID-19 outbreak predictions: regression and classification models. Regression models predict a continuous quantity output, for example. In contrast, classification is a process of assigning data to appropriate classes, having either two-class (i.e., binary) or multi-class labels to assign data. The main difference between regression and classification models is that the output variable in the regression is numerical (or continuous) while that for classification is categorical. For regression and classification models, the output variable can be predicted in two different ways. The first way is to find a mapping function  $f$  to map the input variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$  to the continuous output variable  $y$  with  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = y$ . To such types of predictions, we are referring to as the regular prediction of COVID-19 outbreaks. Alternatively, the output variable can also be predicted based on time series data. Particularly, time series prediction is a process of predicting future data values through a sequence of time based on past values of the data. The principle of the time series prediction method is predicting changes in the future, assuming that values will change similar to how they changed in the past. By combining the regular and time series prediction with the regression and classification models, we obtain four types of models: regular regression models, regular classification models, time series-based regression models, and time series-based classification models.

This study aims to outline recent studies on predicting the COVID-19 outbreak utilizing statistical and machine learning methods. Particularly, for each study, we outline the utilized ground-truth dataset characteristics, the type of the developed models, the predictor variables, the statistical and machine learning methods, the performance metrics, and finally, the major conclusion.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 introduces the studies examining Eurasian cases. Section 3 presents the studies examining African cases. Section 4 outlines the studies examining American cases. Section 5 presents the studies examining intercontinental cases. Finally, the paper is concluded along with research gaps.

## 2 Studies examining Eurasian cases

Satrio et al. [4] proposed models to forecast COVID-19 spread in Indonesia. To build the models, Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) and PROPHET algorithms were used. ARIMA is usually written in the notation  $ARIMA(p, d, q)$  to indicate its parameters, where the “p” value means the number of time lags, “d” value means the degree of difference, and “q” means the size of the average window. The dataset used in this study was obtained from the Kaggle website and consists of the serial number, observation date, province/state, country/region, last update, confirmed, recovered, and death columns. It originally had 27.618 rows, but after choosing only Indonesian data, only

81 rows remained. Then, they split the confirmed, recovery, and death into separate data frames because ARIMA only uses univariate data. Then, they checked whether the data is stationary or not because ARIMA performs better when data has a stable or consistent pattern over time. Their finding indicated that the data was not stationary. Then, they used log-scale transformation and time-shifting transformation to convert data into stationary form. In this study, time-series regression models were used where the past confirmed, recovered, and death counts were used as input variables to predict their future values. Coefficient of determination ( $R^2$ ), MSE (Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), and MFE (Mean Forecast Error) have been used as performance metrics. They evaluated a 30-day prediction period for both models from April 22, 2020, to May 21, 2020. It has been concluded that PROPHET generally performed better than ARIMA, but both models become more inaccurate as more days are forecasted.

Althnian et al. [5] conducted a study to forecast the susceptibility of individuals based on demographic data, including age, gender, nationality, and location. The dataset was obtained from the Saudi Ministry of Health. The dataset contains data from 229224 patients in Saudi Arabia between 02.03.2020 to 25.04.2020. The predictor variables are the city, confirmatory result, date of birth, gender, nationality, patient’s subject id, result date, screening result, and test date. Date of birth was substituted by one of the following age groups: 0-9, 10-19, 20-29, 30-39, 40-49, 50-59, 60-69, 70-79, and 80+. The city was replaced by 15 different Saudi regions. Because negative test results were overwhelmingly high, random oversampling was used for the positive class, and as a result, the resulting database included 50% positive and 50% negative test results. In this study, regular classification models were used, and the variables age, gender, nationality, and location were used as predictors of COVID-10 outbreak. In this study, MLP (Multi-Layer Perceptron), SVM (Support Vector Machine), DT (Decision Tree), and RF (Random Forest) methods were preferred. 5-fold cross-validation was used to train and test the models. Accuracy, precision, recall, F1 score, and AUC (Area under the Curve) metrics were used for performance evaluation. It has been concluded that the DT-based model performs best in terms of all performance metrics. It was also concluded that susceptibility could be predicted using only the mentioned predictor variables without any medical variables.

Ceylan [6] conducted a study to estimate the prevalence of COVID-19 in Italy, Spain, and France. The dataset was taken from the WHO website and consisted of data collected between 21.02.2020 and 15.04.2020 from Italy, Spain, and France. In this study, 45 samples were used to create a stable and effective time series ARIMA regression model. Various architectures of the ARIMA model are used, and confirmed cases were used as the predictor variable, whereas the number of total cases was predicted. Root Mean Square Error (RMSE), MAE, and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) were used as performance metrics. It has been concluded that ARIMA (0, 2, 1), ARIMA (1, 2, 0), and ARIMA (0, 2, 1) are the most suitable models for Italy, Spain, and France, respectively.

Fang et al. [7] conducted a study to create a COVID-19 forecasting model to prevent and control COVID-19 outbreaks. The dataset is taken from the John Hopkins University Coronavirus resource center. The dataset contains data between 31.01.2020 and 30.05.2020. In this study, the number of confirmed recovered and death cases in Russia were used as variables. Time series regression models were developed based on the ARIMA forecasting method. To verify the fitting effect of the developed ARIMA model, the MAPE metric is preferred. The forecast model for confirmed cases yielded a MAPE value of 0.60, and it has been concluded that the model has high prediction accuracy and is robust. Forecast models for death and recovery yield MAPE values of 3.90 and 2.40, respectively, and it has also been reported that these models were relatively robust.

Fayyoubi et al. [8] proposed regular classification models to predict possible patients of COVID-19 using machine learning and statistical models. The utilized dataset was obtained by an online survey in which various eligible participants from Jordan participated, and 105 of those participants were selected for the study. For developing the statistical learning models, Logistic Regression (LogReg) is used, and for building the machine learning models, SVM and MLP were preferred. The dataset includes various predictor variables, including positive PCR test, age, gender, smoking, positive X-Ray, fever, breathing, diarrhea or vomiting, lack of smell, nasal congestion, dry cough, aches and pain, and sore throat. All models were tested employing 10-fold cross-validation. This study predicts whether the patient is infected with COVID-19 or not. The performance of the models was evaluated using several metrics, including accuracy, sensitivity, specificity, Geometric Mean (G\_Mean), and precision. As a result, MLP has been chosen to be the best performing model in terms of the used performance metrics.

Gupta et al. [9] proposed a model for predicting the active, death, and cured rate of COVID-19 in India. The dataset contains the active, death, and cured rate for India between 20/01/2020 to 07/05/2020. They used the time series regression model in this study. To build the model, SVM, LinReg (Linear Regression), and prophet forecasting were used. The predictor variables used are active cases, death cases, and cured cases. Active cases, death cases, and cured cases were predicted as the output variables. MAE, MSE, and RMSE have been used as performance metrics. It has been concluded that the prophet forecasting model performed better than SVM and LinReg thanks to its features that are not available on the other two models, such as the seasonal component set. Furthermore, it has been reported that SVM has become the second-best prediction model among those three.

Önder [10] proposed time series regression models that aim to predict the COVID-19 trend. The utilized dataset was collected from the Turkey Ministry of Health as daily confirmed cases. The dataset contains information between March 16, 2020, and March 28, 2020. The models used are Richards Model, Generalized Logistic Growth Model, and the Sub-Exponential growth model. The confirmed case count was used as the predictor variable, whereas the

reproductive number was predicted as the output variable. Adjusted  $R^2$ , RMSE, and AIC (Akaike information criterion) have been used as performance metrics. As a result of this study, the sub-exponential method with a scaling of growth parameter of 0.91 showed the best results among the three.

Pinter et al. [11] proposed a COVID-19 prediction model that utilizes hybrid machine learning methods. The dataset includes COVID-19 cases and death rates in Hungary, which consists of data collected between March 4, 2020, and April 28, 2020, taken from worldometers. For training the model, data collected between March 4, 2020, and April 19, 2020, was utilized, whereas the remaining data was used for validating the predicted results. They used the time series regression model in this study. Total cases and mortality rate were predicted as the target variables. The utilized methods included the Hybrid Multi-Layered Perceptron-Imperialist Competitive Algorithm (MLP-ICA) and Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS). Training is done by using two scenarios, the first one (i.e., scenario 1) is trained using odd-numbered days, and the second (i.e., scenario 2) is trained using even-numbered days. The training of ANFIS is done by using three Membership Functions (MF) types: Triangular, Trapezoidal, and Gaussian. RMSE and MAPE were used for comparing these MF results, and it has been concluded that Gaussian MF has the highest performance. The first scenario provided the lowest RMSE results for ANFIS compared to scenario 2 using selected MF because scenario one is more suitable for COVID-19 prediction. Still, it has also been concluded that scenario 2 gives the highest performance for predicting mortality rate using the selected MF type. Also, according to their results, ten neuron MLP architecture yielded the best results for MLP-ICA using both scenarios. But for MLP-ICA, unlike ANFIS, scenario 2 produces the highest accuracy for predicting COVID-19 cases compared to scenario 1. For the mortality rates, neuron number 14 for scenario one and neuron number 18 for scenario 2 yielded the highest accuracy in integrating by ICA method compared to other architectures. Because of it, scenario 1 concluded as the most suitable scenario for mortality rates for MLP-ICA. Evaluations of models were performed by calculating  $R^2$ , MAPE, RMSE values. As a result, it has been concluded that different scenarios used for training models do not create any results that are too different from each other. Also, though both methods showed promising results, MLP-ICA surpassed ANFIS after 122.608 km<sup>2</sup>. Also, Fars province is split into 36 counties, 93 districts, and 112 cities. The dataset was collected from the Iranian Ministry of Health and Medical Education (IMHME) on April 10, 2020. In this study utilizing data collected from WHO and IMHME, between February 25, 2020, and June 10, 2020, for active cases and from March 2, 2020, to June 10, 2020, for death cases, the growth rate of activity and death cases around the world, Iran, and Fars comparing their results with actual cases.

Pourghasemi et al. [12] examined risk factors of COVID-19 and tested the SVM model for mapping areas that have a high risk of human infection in Fars Province, Iran. Also, the growth trend of COVID-19 in Fars Province was analyzed and compared with the growth rate of Iran and various other

countries. They developed time series classification models in this study. The methods included SVM and ARIMA. SVM was used to create a risk map of the COVID-19 outbreak, and ARIMA models were used to examine the patterns of COVID-19 spread in the province. The predictor variables include MTCM (Minimum Temperature of Coldest Month), MTWM (Maximum Temperature of Warmest Month), PWM (Precipitation of Wettest Month), PDM (Precipitation of Driest Month), distance from roads, distance from mosques, distance from hospitals, distance from fuel stations, distance from bus stations, distance from banks, distance from bakeries, distance from attraction sites, distance from ATM's, human footprints, the density of cities, density of villages. For SVM, accuracy and AUC metric were used, and for ARIMA coefficient, standard error, t-statistics, and probability metrics were calculated. It has been concluded that climate factors have the least influence on COVID-19 risk mapping and, ATMs, distance from; attraction sites, fuel stations, mosques, and roads, MTCM and, the density of villages and cities have moderate influence, but distances from bus stations, distance from bakeries, and distance from hospitals had the strongest influence. As for ARIMA, it showed that COVID-19 is not expected to show any explosive process, but it seems infection will keep its general trend for several months.

Tamhane et al. [13] published a paper about creating a time series regression model that predicts the case number for the next 20 days. The dataset was obtained from John Hopkins University, consisting of dates between January 1, 2020, and May 25, 2020. SVM and Polynomial Regression (PR) machine learning methods are used to build the models, whereas the number of cases has been utilized as the predictor variable. First, the data is divided into train and test sets. MAE and MSE are used as performance metrics. This study demonstrated that machine learning methods are very promising and essential tools to deal with the crisis

### 3 Studies examining African cases

Gebretensae et al. [14] predicted the future trend of COVID-19 in Ethiopia using ARIMA. The dataset used in this study was obtained from the official website of the Ethiopian Public Health Institute and consisted of confirmed, recovered, and death cases in Ethiopia. The dataset contains data from March 13, 2020, to August 31, 2020. Models were built based on ARIMA using the time-series regression. After determining the suitable ARIMA order, the authors tried to find precise estimates of model parameters utilizing least squares as described by Box and Jenkins. Autocorrection Function (ACF) and Partial Autocorrection (PACF) were used in confirmed cases to check if the data is stationary. To predict confirmed and recovered cases, ARIMA (0, 1, 5) and ARIMA (2, 1, 3) were selected, respectively, based on ACF and PACF graphs. RMSE, MAPE, and Bayesian information criteria (BIC) have been used as performance metrics. It has been concluded that both ARIMA (0, 1, 5) and ARIMA (2, 1, 3) are the best models for confirmed and recovered cases, respectively, and the confirmed and recovered cases will increase in Ethiopia in the next 60 days on a daily basis.

Marzouk et al. [15] proposed a study to forecast the COVID-19 outbreak prevalence in Egypt using deep learning algorithms. The dataset was recognized by the Egyptian Ministry of Health and Population and consists of daily confirmed, recovered, and death cases from Egypt. The dataset consists of data collected between February 14, 2020, and June 30, 2021, and spans over 503 days. The data were split into 90% training data and 10% testing data. In this study, time-series regression models were used. Long Short-Term Memory (LSTM), Convolutional neural network (CNN), and MLP were used to build models. The past values of confirmed, recovered, and death counts were used to predict their future values. RMSE and  $R^2$  have been used as performance metrics. It has been concluded that LSTM models performed better than CNN and MLP models for 1 week ahead and 1 month ahead predictions because it can capture nonlinear patterns in the input data over time, and feedback connections characterize the LSTM network to propagate the data in the backward pass.

Ahmed [16] published a study examining the prediction of Ethiopian cases to predict the spread of COVID-19. The dataset is taken from the official GitHub repository of the John Hopkins University Center of System Science and Engineering. Only data concerning Ethiopia was used from this dataset. The dataset contains data recorded since 22.01.2020. The dataset was divided into training and testing sets. For training, 3/4 of the dataset was used, whereas the rest was used for testing. The time series regression model was developed based on SVM and PR. The predictor and output variables are confirmed, recovered, and death cases. MAE and MSE metrics were used for performance evaluation. As a result, it has been concluded that SVM performs better than PR in both confirmed, recovered, and death cases.

Djeddou et al. [17] predicted new COVID-19 cases in Algeria. The utilized dataset was obtained from the public health database of the Algeria health ministry. They build a time series regression model based on the Extreme Learning Machine (ELM) method. Cumulative confirmed COVID-19 cases, calculated COVID-19 new cases, and index day were used as input variables. The model gives the output of COVID-19 new cases as output. MSE, RMSE, MAE, Nash-Sutcliffe Coefficient of efficiency (NSE), the overall index of model performance (OI), and  $R^2$  were preferred as performance metrics. It has been concluded that the ELM architecture is suitable for predicting new COVID-19 cases.

Saba et al. [18] created a model for short-term prediction of COVID-19 to help authorities make better decisions. The dataset was obtained from the Egyptian Ministry of Health and Population and consisted of data collected between March 1, 2020, and May 10, 2020. Time series regression models were developed based on ARIMA and Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks (NARANN) algorithms. Reported and new cases were used as predictor and target variables, respectively. The model's performance was evaluated using the MAE, RMSE,  $R^2$ , coefficient of residual mass (CRM), and deviation ratio (RD) metrics. They concluded that NARANN performs better than ARIMA to predict the new COVID-19 case number.



Takele [19] proposed a time series regression model based on the ARIMA method to predict the prevalence of COVID-19 in East African Countries. The motivation of the study is to provide the public health institutions with reliable day-to-day predictions so that proper intervention strategies can be produced and an immediate and long-term prevalence trajectory of COVID-19 can be provided. The dataset was taken from the official GitHub repository of John Hopkins University and included data gathered between March 13, 2020, and June 30, 2020. The countries examined in this study are Ethiopia, Sudan, Djibouti, and Somalia. Confirmed

cases and total confirmed cases are used both as the predictor and target variables, respectively. AIC, BIC (Bayesian Information Criterion), MAPE, Coefficient, and P-value were used as the model evaluation metrics. ARIMA (1, 2, 1) was chosen as the best model for predicting COVID-19 cases in Ethiopia, ARIMA (2, 1, 1) with drift was chosen as the best model for predicting COVID-19 cases in Djibouti, ARIMA (0, 2, 2) was chosen as the best model for predicting COVID-19 cases in Somalia, and finally, ARIMA (2, 2, 1) was chosen as the best model for predicting COVID-19 cases in Sudan.

**Table 1.** Overview of studies examining Eurasian cases.

Study	Year	Model	Method	Predictor Variables	Metrics	Target Variable
Satrio et al. [4]	2021	Time Series Regression	Prophet Forecasting Model	confirmed, recovered, death	R <sup>2</sup> , MSE, MAE, MFE	confirmed, recovered death
Althnian et al. [5]	2020	Regular Classification	DT, MLP	age, gender, nationality, and location	accuracy, precision, recall, F1 score, AUC	susceptibility
Ceylan [6]	2020	Time Series Regression	ARIMA	confirmed cases	RMSE, MAE, MAPE	total cases
Fang et al. [7]	2020	Time Series Regression	ARIMA	confirmed, recovered, death	MAPE	confirmed, recovered, death
Fayyoumi et al. [8]	2020	Regular Classification	MLP	positive PCR test, age, gender, smoking, positive X-Ray, fever, breathing, diarrhea or vomiting, lack of smell, nasal congestion, dry cough, aches, and pain, sore throat	accuracy, sensitivity, specificity, G_Mean, Precision	positive or negative COVID-19
Gupta et al. [9]	2020	Time Series Regression	Prophet Forecasting Model	confirmed cases, death cases, recovered cases	MAE, MSE, RMSE	confirmed cases, death cases, recovered cases
Önder [10]	2020	Time Series Regression	Sub-Exponential Growth	confirmed cases	Adj. R <sup>2</sup> , RMSE, AIC	reproductive number
Pinter et al. [11]	2020	Time Series Regression	MLP-ICA	daily cases, number of deaths	RMSE, MAPE, R <sup>2</sup>	number of cases, mortality rate
Pourghasemi et.al. [12]	2020	Time Series Classification	SVM, ARIMA	MTCM, MTWM, PWM, PDM, distance from roads, distance from mosques, distance from hospitals, distance from fuel stations, distance from bus stations, distance from banks, distance from bakeries, distance from attraction sites, distance from ATM's, human footprints, the density of cities, the density of villages	accuracy, AUC, coefficient, standard error, t-statistics, probability	high or low-risk area
Tamhane et al. [13]	2020	Time Series Regression	PR, SVM	number of cases	MAE, MSE	number of cases

LSTM: Long Short-Term Memory, MSE: Mean Square Error, MAE: Mean Absolute Error, MFE: Mean Forecast Error, DT: Decision Tree MLP: Multi-Layer Perceptron, AUC: Area under the Curve, ARIMA: Autoregressive Integrated Moving Average, RMSE: Root Mean Square Error, MAPE: Mean Absolute Percentage Error, G\_Mean: Geometric Mean, Adj. R<sup>2</sup>: Adjusted Coefficient of determination, AIC: Akaike information criterion, MLP-ICA: Multi-Layered Perceptron-Imperialist Competitive Algorithm, R<sup>2</sup>: Coefficient of determination, SVM: Support Vector Machines, MTCM: Minimum Temperature of Coldest Month, MTWM: Maximum Temperature of Warmest Month, PWM: Precipitation of Wettest Month, PDM: Precipitation of Driest Month, PR: Polynomial Regression

#### 4 Studies examining American cases

Luo et al. [20] proposed a study to predict the future trend of COVID-19 in the US. The dataset was obtained from the WHO website, and the dataset was in time-series format. Due to the US did not initiate isolation and treatment measures between January and March, new confirmed cases from April 1, 2020, to September 30, 2020, were utilized as 19 or not. Precision, accuracy, recall, and AUC were used as performance metrics. It has been concluded that MLP exhibited the best performance compared to other methods.

Jojoa et al. [22] predicted COVID-19 spread in different countries of America. The dataset was downloaded from the open data repository of the European Union. Time series regression-based prediction models using MLP and SVM were used for building the models. This study uses confirmed COVID-19 cases as the predictor and output variable. As for performance measures, CP (Pearson's Correlation Coefficient), MAE, and Mean Percentage Error (MPE) were used. It has been concluded that MLP performs better when an optimization algorithm determines the hyperparameters, but when MLP does not perform well, it is necessary to use SVM instead. MLP showed better performance than SVM for Chile, Mexico, and the USA. However, SVM performs better than MLP for Brazil, Colombia, and Peru using the same performance metrics.

Moreau [23] conducted a study to predict the evolution of the COVID-19 pandemic. The used dataset stems from "Our World in Data Project". The dataset contains the daily modeling objects. The data were split into 90% training data and 10% testing data. To build models, LSTM and XGBoost were used using the time-series regression. The past values of confirmed cases were used as an input variable to predict the confirmed cases for the next 30 days. MAE, MSE, RMSE, and MAPE have been used as performance metrics. It has been concluded that LSTM performed better than XGBoost as LSTM has a lower MAPE value.

Santana et al. [21] conducted a study to assist the detection of COVID-19 based on early symptoms using machine learning. The dataset was created in Brazilian and includes data from 55.676 patients. This study developed regular classification models based on RF, SVM, MLP, K-Nearest Neighbors (KNN), DT, Gradient Boosting Machine (GBM), and XGBoost. Gender, sore throat, dyspnea, fever, cough, headache, taste disorder, olfactory disorder, and health professional were used as the predictor variable. This study predicts whether the patient is infected with COVID-19 or not. Precision, accuracy, recall, and AUC were used as performance metrics. It has been concluded that MLP exhibited the best performance compared to other methods.

Jojoa et al. [22] predicted COVID-19 spread in different countries of America. The dataset was downloaded from the open data repository of the European Union. Time series regression-based prediction models using MLP and SVM were used for building the models. This study uses confirmed COVID-19 cases as the predictor and output variable. As for performance measures, CP (Pearson's Correlation Coefficient), MAE, and Mean Percentage Error (MPE) were used. It has been concluded that MLP performs

better when an optimization algorithm determines the hyperparameters, but when MLP does not perform well, it is necessary to use SVM instead. MLP showed better performance than SVM for Chile, Mexico, and the USA. However, SVM performs better than MLP for Brazil, Colombia, and Peru using the same performance metrics.

Moreau [23] conducted a study to predict the evolution of the COVID-19 pandemic. The used dataset stems from "Our World in Data Project". The dataset contains the daily and the total number of confirmed cases and deaths. This dataset includes data starting from February 26, 2020, which is the date of the first confirmed case in Brazil. The Weibull Distribution model using time series regression is proposed in this study. Daily confirmed cases and daily deaths were used as predictor variables, whereas the number of daily new cases and daily new deaths were predicted as output variables. A parameter called diagnostic-death lag is used because it has been previously demonstrated that there is a correlation between lethality rate and diagnostic-death lag. This parameter is obtained by the temporal distance between the peak of daily new cases and daily new deaths. In this study, four different scenarios were conducted. These scenarios were based on the daily number of new deaths. The first, second, third, and fourth scenarios consider 1250, 1500, 1750, and 200 daily new deaths, respectively, at the maximum turning point of the curve.  $R^2$  was preferred as the performance evaluation metric. This study concluded that the first scenario produces the most optimistic results, and the fourth scenario gives the most pessimistic results among those four scenarios. Also, the second and third scenarios yielded results similar to each other and fitted the actual data for daily new cases. Still, because of their similar precision, it's impossible to choose any of these scenarios as the most probable. However, it's mentioned that the diagnostic-death lag value points to a prospective scenario that lies between 1750 and 2000 daily new deaths.

Silva et al. [24] conducted a study incorporating the exogenous climatic variables in forecasting models. The datasets for confirmed cases contain cumulative cases in 5 states of the USA and Brazil. The datasets contain data until the date of 28.04.2020. The Brazilian dataset was obtained from an API that collects information about COVID-19 from all Brazilian states. The USA dataset was retrieved from the official repository of Johns Hopkins University, whereas the USA climate database was obtained from the National Centers for Environmental Information (NCEI) from the National Oceanic and Atmospheric Administration. The Brazilian climate database was obtained from Instituto Nacional de Meteorologia. Minimum and maximum temperature and precipitation were used as exogenous climatic inputs for each model. Time series regression models based on Bayesian regression neural network (BRNN), Cubist Regression (CUBIST), KNN, QRF (Quantile Random Forest), SVR, and variational mode decomposition (VMD)-based models were proposed. COVID-19 cases, precipitation, maximum temperature, and minimum temperature were used as predictor variables. The output variable is the number of confirmed cumulative cases.

In the study, they first decomposed output variables into five IMFs by performing VMD. They chose a lag equal to two by the grid search and used it on the IMF, creating four input lags and exogenous inputs. Also, new data is split into training and test sets. In training, they adopted one-out-cross-validation with a time slice. Second, they trained each IMF with mentioned models, generated five prediction outputs, and named them VMD-BRNN, VMD-CUBIST, VMD-KNN, VMD-QRF, and VMD-SVR. They used a recursive strategy to develop multi-days ahead of COVID-19 case prediction. The model is fitted to do one day ahead prediction; the model uses this forecasting result as input and continues until the desired forecasting horizon is reached. Fourth, they used Improvement Percentage (IP), symmetric MAPE (sMAPE), and relative RMSE (RRMSE) as performance evaluation metrics. They ranked each of these models for Brazilian states and USA states. For Brazilian states, ranking was VMD-CUBIST, VMD-BRNN, SVR, CUBIST, VMD-SVR, BRNN, VMD-QRF, QRF, VMD-KNN, and KNN. For USA states ranking were VMD-CUBIST, BRNN, CUBIST, SVR, VMD-BRNN, VMD-SVR, VMD-QRF, QRF, KNN, and VMD-KNN. They also mentioned that six-day-ahead hybrid models were more suitable tools than non-decomposed models and also noted that climatic variables indeed influence the accuracy when predicting COVID-19 cases.

Souza et al. [25] conducted a study to make a prognosis or early identification of COVID-19 patients at increased risk of developing severe symptoms. The dataset is obtained from the Espírito Santo state portal. The dataset was made up of 13690 patients who were tested positive for COVID-19. Only closed cases due to death and recovery were used in this study because the objective of their study was to predict the outcome of the disease. In total, 4826 patient data were used for the training model, and 3617 patient data were used for validation. In this study, regular classification models were developed based on LogReg, Linear Discriminant Analysis, Naïve Bayes, K-Nearest Neighbors, Decision Trees, XGBoost, and SVM. Fever, respiratory distress, cough, runny nose, sore throat, diarrhea, headache, pulmonary disease, cardiac disease, kidney, diabetes, smoking, obesity, hospitalization, and “is patient older than 60” were used as predictor variables. The target variable being predicted indicates whether a patient is died or recovered from COVID-19. Receiver Operating Characteristic (ROC) AUC, Precision-Recall Curve (PR) AUC, precision, recall, and F1 score were used as performance evaluation metrics. Two different experiments were done to evaluate models. As a result of this study, it has been concluded that the best performing model regarding ROC AUC and PR AUC metrics was LogReg, Linear Discriminant Analysis, XGBOOST, and SVM.

Wollenstein-Betech et al. [26] proposed regular classification models to predict the following events: Hospitalization, mortality, need for Intensive Care Unit (ICU), and need for a ventilator. The Mexican government has provided the utilized dataset to the general public. This dataset contains demographic information such as age, nationality, location, the use of an indigenous language, and

pre-existing conditions of patients such as diabetes, chronic obstructive pulmonary disease, immunosuppression, pregnancy, asthma, hypertension, obesity, chronic renal failure, “is using a tobacco” and other prior diseases. The dataset contains data of 91179 patients. 20737 of those patients have positive COVID-19 tests, whereas 15445 of them are waiting for the result of the test. In this study, negative COVID-19 test results were not used for training the models. This study used sparse SVMs, sparse LogReg, Random Forests, and XGBoost models. Accuracy, weighted F1 score, and AUC were used as performance evaluation metrics. It was concluded that according to SVMs and LogReg models, the features that contribute the most to predicting the hospitalization of the patient were age, gender, chronic renal insufficiency, diabetes, immunosuppression, and pregnancy. The other variables have a smaller impact on the prediction model. The most important features for predicting mortality were age, test status, immunosuppression, and pregnancy. Similarly, the most important features for predicting ICU need were the development of pneumonia (if available), cardiovascular disease, asthma, and test results. Finally, the most important features for predicting the need for a ventilator were: ICU and pneumonia (if available), age, gender, cardiovascular disease, obesity, pregnancy, and the test results.

## 5 Studies examining intercontinental cases

Ayoobi et al. [27] proposed models to forecast the COVID-19 outbreak and perform an in-depth comparison of Gated Recurrent Unit (GRU), LSTM, Convolutional Long Short-Term Memory (Conv-LSTM) with their bidirectional extensions. The dataset was obtained from the WHO website and contained columns such as date reported, country code, country, region, cumulative cases, and cumulative deaths. The data from Australia and Iran has been used to develop the models. The data for Australia ranges from January 25, 2020, to August 19, 2020, and the data for Iran is between January 3, 2020, to October 6, 2020. The data were split into approximately 70% training data and %30 testing data. To build models, GRU, LSTM, Conv-LSTM, and bidirectional extensions of these three methods have been applied using the time-series regression. In this study, new cases, cumulative cases, new deaths, and cumulative deaths have been used as predictors, and new cases and new deaths are predicted in one, three, and seven days ahead during the next hundred days. Mean Squared Log Error (MSLE), MAPE, Root Mean Squared Log Error (RMSLE), and Explained Variance (EV) have been used as performance metrics. It has been concluded that most of the time, bidirectional models outperformed their non-bidirectional counterparts. Also, it has been reported that no technique always produces the best predictions, i.e., the best-performing prediction method changes according to one, three, and seven days ahead prediction scenarios.

Bala [28] developed a model that predicts COVID-19 outbreaks in any particular country. The dataset is obtained from the “All our World in Data COVID-19 (OWID)” dataset on confirmed cases and confirmed deaths.

**Table 2.** Overview of studies examining African cases

Study	Year	Model	Method	Predictor Variables	Metrics	Target Variable
Gebretensae et al. [14]	2021	Time Series Regression	ARIMA	confirmed, recovered	RMSE, MAPE, BIC	confirmed, recovered
Marzouk et al. [15]	2021	Time Series Regression	LSTM	confirmed, recovered, death	RMSE, R <sup>2</sup>	confirmed, recovered, death
Ahmed [16]	2020	Time Series Regression	SVM	confirmed, recovered, death	MAE, MSE	confirmed, recovered, death
Djeddou et al. [17]	2020	Time Series Regression	ELM	new COVID-19 cases	MSE, RMSE, MAE, NSE, OI, R <sup>2</sup>	new cases
Saba et al. [18]	2020	Time Series Regression	NARANN	reported cases	MAE, RMSE, R <sup>2</sup> , CRM, RD, AIC, BIC, MAPE, coefficient, P-value	new cases
Takele [19]	2020	Time Series Regression	ARIMA	confirmed cases		total confirmed cases

ARIMA: Autoregressive Integrated Moving Average LSTM: Long Short-Term Memory, SVM: Support Vector Machines, RMSE: Root Mean Square Error, MAPE: Mean Absolute Percentage Error, BIC: Bayesian information criterion, R<sup>2</sup>: Coefficient of determination, MAE: Mean Absolute Error, MSE: Mean Square Error, ELM: Extreme Learning Machines, NSE: Nash–Sutcliffe Coefficient of efficiency, OI: The overall index of model performance, NARANN: Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks, CRM: coefficient of residual mass, RD: deviation ratio, AIC: Akaike information criterion

**Table 3.** Overview of studies examining American cases

Study	Year	Model	Method	Predictor Variables	Metrics	Target Variable
Luo et al. [20]	2021	Time Series Regression	LSTM	confirmed cases	MAE, MSE, RMSE, MAPE	confirmed cases
Santana et al. [21]	2021	Regular Classification	MLP	gender, sore throat, dyspnea, fever, cough, headache, taste disorder, olfactory disorder, health professional	Precision, Accuracy, Recall, AUC	positive or negative COVID-19
Jojoa et al. [22]	2020	Time Series Regression	MLP, SVM	confirmed cases	CP, MAE, MPE	confirmed cases
Moreau [23]	2020	Time Series Regression	Weibull distribution	confirmed new cases, confirmed new deaths	R <sup>2</sup>	daily new cases, daily new deaths
Silva et al. [24]	2020	Time Series Regression	BRNN, CUBIST, KNN, QRF, SVR, VMD-based models	COVID-19 cases, precipitation, maximum temperature, minimum temperature	IP, sMAPE, RRMSE	cumulative confirmed cases
Souza et al. [25]	2020	Regular Classification	LogReg, LDA, XGBoost, SVM	fever, respiratory distress, cough, runny nose, sore throat, diarrhea, headache, pulmonary disease, cardiac disease, kidney, diabetes, smoking, obesity, hospitalization, is patient older than 60 age, pregnant, chronic renal insufficiency, diabetes, immunosuppression, chronic obstructive pulmonary disease, obesity, other, hypertension, tobacco use, cardiovascular disease, asthma, gender, ventilator, ICU, test result	ROC AUC, PR AUC, precision, recall, F1 score	is patient recovered or dead
Wollenstein-Betech et al. [26]	2020	Regular Classification	SVM, LogReg, RF, XGBoost	hospitalization, mortality, ICU need, ventilator need	Accuracy, weighted F1 score, AUC	hospitalization, mortality, ICU need, ventilator need

LSTM: Long Short-Term Memory, MAE: Mean Absolute Error, MSE: Mean Square Error, RMSE: Root Mean Square Error, MAPE: Mean Absolute Percentage Error, MLP: Multi-Layer Perceptron, AUC: Area under Curve, SVM: Support Vector Machines, CP: Pearson’s correlation coefficient, MPE: Mean Percentage Error, R<sup>2</sup>: Coefficient of determination, BRNN: Bayesian regression neural network, CUBIST: Cubist Regression, KNN: k-nearest neighbors, QRF: Quantile Random Forest, SVR: Support Vector Regression, VMD: Variational Mode Decomposition, IP: Improvement Percentage, sMAPE: Symmetric Mean Absolute Percentage Error, RRMSE: Relative Root Mean Square Error, LogReg: Logistic Regression, RF: Random Forest, LDA: Linear Discriminant Analysis, ROC: Receiver Operating Characteristic, PR AUC: Precision-Recall Curve AUC, ICU: Intensive Care Unit

This dataset is updated daily and published by European CDC under Oxford University. Time series regression models were developed to predict the total number of cases using the date and total cases as predictor variables. This database was split into a 70:30 ratio for training and testing. LinReg, SVM, RF, and XGBoost Regression were used to build the models. MAE and RMSE were used as performance evaluation metrics. It has been concluded that the best performing model is based on XGBoost followed by RF, SVM, and LinReg.

Hassan et al. [29] proposed a study to develop a COVID-19 prediction model that predicts COVID-19 outbreak to contribute to humanity getting rid of the COVID-19 pandemic. The dataset was obtained from the GitHub repository of John Hopkins University. It consisted of worldwide daily confirmed, recovered, and death cases data collected between the start of the pandemic and October 4, 2020. The dataset has been divided into two subsets: a training set (220 days) to train models and a testing set (39 days). MLP, SVM, Bayesian Network (BN), PR, and Linear Regression (LinReg) were applied to build models using the time-series regression. The past values of confirmed, recovered, and death counts were used as input variables to predict their future variables. RMSE, MAE, MSE, EV, and  $R^2$  have been used as performance metrics. It has been concluded that, in general, MLP yielded better results in the prediction of confirmed, recovered, and death cases.

Yu et al. [30] created an online artificial intelligence system to analyze the dynamic trend of COVID-19 called COVID-19 Pandemic AI System (CPAIS). Two datasets were utilized: the first one is from Oxford COVID-19 Government Response Tracker (OxCGRT), and the other one is from John Hopkins University Center for Systems Science and Engineering. Oxford dataset contains government responses to COVID-19 based on a variety of parameters ever since January 1, 2020, and includes 20 types of items. Their items can be grouped as containment and closure policies, economic policies, health system policies, and miscellaneous policies. The John Hopkins University dataset contains confirmed, recovered, and death cases containing data for 192 countries ever since January 21, 2020. ARIMA, Feedforward Neural Network (FNN), MLP, and LSTM were used to build models using the time-series regression. The policies used from the OxCGRT dataset with confirmed, recovered, and death cases from John Hopkins were used as predictors, and they used 1-year records from the dataset and used the last 14 days for validation. ME (Mean Error), RMSE, MAE, MPE, and MAPE have been used as performance metrics. It has been concluded that LSTM yielded better results than other methods in most countries with better accuracy. ARIMA, FNN, and MLP were not stable enough and only yielded competitive results in some specific countries.

Ardabili et al. [31] published another study for COVID-19 outbreak prediction using machine learning. They compared several machine learning models using various models for mathematical forecasting to present a comparative analysis of soft computing and machine

learning models to predict the COVID-19 outbreak. The data consisted of population counts collected from Italy, China, Iran, Germany, and the USA over 30 days. They used the time series regression models. Their comparison of ML optimizer GWO (Gray Wolf Optimizer) outperformed other ML optimizer methods with the best accuracy because it had the smallest RMSE and the most significant correlation coefficient. In their comparison of equations, the Logistic model outperformed other models in general in terms of accuracy, which also had the smallest RMSE and largest  $r$ -square value. They predict the total number of cases. The training was done using MLP and ANFIS using different neuron numbers for MLP and other MF (Membership Functions) for ANFIS. After comparison, MLP showed the best accuracy.

Prakash et al. [32] conducted a study to find which age groups were most affected by COVID-19 using machine learning algorithms. Two datasets were used, and both were obtained from the Kaggle. The first dataset contained data obtained from India, and the second one includes global COVID-19 data. The datasets contain age, state, confirmed Indian national cases, confirmed foreign national cases, cured, deaths, confirmed, date, and month. Regular classification models were developed based on DT, MLR (Multi-LinReg), SVM, XGBoost Classifier, RF Classifier, RF Regressor, KNN+NCA, Gaussian Naïve Bayes (GNB) Classifier, and LogReg. The test dataset ratio is 7:3. The performance evaluation metrics are  $R^2$  and accuracy. It has been reported that 20-30, 30-40, and 40-50 age groups are affected most by COVID-19, and the most successful machine learning methods are the RF Regressor and RF Classifier.

Punn et al. [33] predicted the behavior and reachability of COVID-19 by developing time series regression models using various machine learning models. The dataset was retrieved from the official repository of Johns Hopkins University, which includes data collected between January 22, 2020, and April 1, 2020. They used various predictor variables, including province/state, country/region, last update, confirmed, death, and recovered cases. Training and testing are done using real-time data, which uses the number of confirmed, recovered, and death cases as the label for the matching date. They predict the confirmed, recovered, and death cases. To predict the trend of COVID-19, SVR, PR, DNN (Deep Neural Network), and LTSM with worldwide data have been used. The RMSE metric has been preferred to evaluate the performance of the models. As a result, the PR approach has been reported as the best fit to follow the growing trend.

Rustam et al. [34] conducted a study on the future prediction of COVID-19, focusing on the number of new cases, deaths, and recoveries to demonstrate the capability of ML models to predict the upcoming patients affected by COVID-19. The dataset was obtained from the GitHub repository provided by the Center for Systems Science and Engineering, John Hopkins University.

**Table 4.** Overview of studies examining intercontinental cases

Study	Year	Model	Method	Predictor Variables	Metrics	Target Variable
Ayoobi et al. [27]	2021	Time Series Regression	GRU, Bi-GRU, LSTM, Bi-LSTM, Conv-LSTM, Bi-Conv-LSTM	new cases, cumulative cases, new deaths, cumulative deaths	MSLE, MAPE, RMSLE, EV	new cases, new deaths
Bala [28]	2021	Time Series Regression	XGBoost	date, total cases	MAE, RMSE	total cases
Hassan et al. [29]	2021	Time Series Regression	MLP	confirmed, recovered, death	RMSE, MAE, MSE	confirmed, recovered, death
Yu et al. [30]	2021	Time Series Regression	LSTM	government policies, confirmed, recovered, death	ME, RMSE, MAE, MPE, MAPE	number of cases
Ardabili et al. [31]	2020	Time Series Regression	MLP	number of cases	RMSE, R	number of cases
Prakash et al. [32]	2020	Regular Classification	RFC, RFR	Age, cured, date, month, confirmed foreign national, confirmed Indian national, deaths, state	R <sup>2</sup> , Accuracy	most affected age group
Punn et al. [33]	2020	Time Series Regression	PR	confirmed, death, and recovered cases	RMSE	confirmed cases, recovered cases, death cases
Rustam et al. [34]	2020	Time Series Regression	ES	recovery, death, newly confirmed cases	MSE, MAE, RMSE, R <sup>2</sup> Score, R <sup>2</sup> Adjusted	confirmed cases, recovered cases, death cases
Sahin [35]	2020	Time Series Regression	LinReg, GPR, SVM, DT, EL	mobility index, population	MAPE	daily cases
Tuli et al. [36]	2020	Time Series Regression	Robust Weibull Fit	number of cases, mortality rate, new cases	MSE, R <sup>2</sup> , MAPE	number of cases, mortality rate, new cases

GRU: Gated Recurrent Unit, LSTM: Long Short-Term Memory, Conv-LSTM: Convolutional Long Short-Term Memory, MSLE: Mean Squared Log Error, MAPE: Mean Absolute Percentage Error, RMSLE: Root Mean Squared Log Error, EV: Explained Variance MAE. Mean Absolute Error, RMSE: Root Mean Square Error, MSE: Mean Square Error, ME: Mean Error, MPE: Mean Percentage Error, MLP: Multi-Layer Perceptron, R=Coefficient of Correlation, RFC: Random Forest Classifier, RFR: Random Forest Regressor, R<sup>2</sup>: Coefficient of Determination, PR: Polynomial Regression, ES: Exponential Smoothing, SVR: Support Vector Regression, GPR: Gaussian Process Regression, SVM: Support Vector Machines, DT: Decision Tree, EL: Ensemble Learning

The dataset contains confirmed cases, deaths, and recoveries in the past number of days since the pandemic started. After the initial data preprocessing step, the dataset has been divided into two subsets: a training set (56 days) to train models and the testing set (10 days). Several time series regression models were built based on LinReg, Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), SVM, and Exponential Smoothing (ES). To evaluate the performance of the models, R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> Adjusted, MAE, MSE, and RMSE metrics were used. Future predictions of new cases, deaths, and recoveries were made, and as a result, ES has been reported to outperform all other models in both new cases, deaths, and recoveries. Even after bigger datasets were used, ES still outperformed other methods in accuracy, but other methods exhibited significantly improved performance after using bigger datasets.

Sahin [35] created a COVID-19 forecasting model for predicting daily cases of COVID-19 based on mobility data. The dataset of mobility data was taken from Apple Mobility Trends Reports. The training model is based on data collected between 13.01.2020 and 10.05.2020. The testing models are based on data collected between 13.05.2020 and 20.05.2020. Seven countries were analyzed, including Brazil, France, Germany, Italy, Spain, the UK, and the USA. The mobility indices and populations of the countries were

used as inputs. Time series regression models were developed based on LinReg, Gaussian Process Regression, SVM, Decision Tree, and Ensemble Learning. MAPE was preferred to evaluate the model's performance. It has been concluded that it is impossible to predict daily cases in all countries based on mobility index through machine learning methods.

Tuli et al. [36] proposed a real-time, more realistic prediction model that works on a cloud-based computer. The dataset is obtained from "Our World in Data by Hannah Ritchie," "updated daily from WHO situation reports. For this study, three instance single-core Azure B1's virtual machines with 1 GB RAM, SSD Storage, and 64-bit Windows Server 2016 have been used. To do multiple analysis tasks for predicting various metrics, the HealthFog framework leveraging the FogBus was employed. Robust Weibull Fit and Gaussian Fit were employed to develop time series regression models. The number of cases, new cases, and mortality rate are both input and output variables. MSE, R<sup>2</sup>, and MAPE are used as performance evaluation metrics. It has been concluded that the Robust Weibull model works better than the Gaussian Fit model as performance evaluation metrics. It has been concluded that the Robust Weibull model works better than the Gaussian Fit model.

## 6 Conclusion and research gaps

This study outlined recent studies on predicting the COVID-19 outbreak utilizing statistical and machine learning methods. The survey results reveal that many studies have been conducted for various needs in recent years, such as predicting whether a patient is infected with COVID-19 or not, predicting the trend of COVID-19 outbreaks, or predicting which age groups are most affected by COVID-19. A variety of prediction models with different types have been developed that can be categorized into four groups: regular regression models, regular classification models, time series-based regression models, and time series-based classification models.

Representative examples of variables for the prediction of COVID-19 outbreak range from demographical variables, such as age, gender, nationality, and location, to pre-existing condition variables, such as asthma, obesity, hypertension, tobacco smoking, chronic renal insufficiency, diabetes, pregnancy, to case count variables, such as the number of confirmed, recovered, death cases. Also, current health variables, such as fever, breathing, diarrhea or vomiting, lack of smell, nasal congestion, dry cough, headache, or sore throat, play an important role in predicting the COVID-19 infection. The most frequently used performance metrics for regression models are  $R^2$ , MAE, MSE, MAPE, and RMSE; whereas the performance of classification models is evaluated using accuracy, precision, recall, and F1 score. In general, it's not possible to have a ranking between these methods, but, in most models, the MLP method has pretty good results and could be used in new studies. The most used variables are case counts, recovered, and deaths.

A possible future research area is to investigate the effects of COVID-19 mutations on the degree of the outbreak. Furthermore, the survey results show that most studies use a very small timeframe to develop the forecasting models. New studies can be started that consider larger timeframes such as 6- or 9-month long periods to test whether more accurate models can be built. Also, new studies can consider the effects of new vaccines. Finally, much more feature selection-based studies can be undertaken to identify the relevant indicators of the COVID-19 disease.

### Acknowledgment

The authors would like to thank Çukurova University Scientific Research Projects Center for supporting this work under grant no FYL-2021-14257.

### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

**Similarity rate** (iThenticate): 29%

### References

- [1] What is COVID-19, <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/ques-tion-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-COVID-19>, Accessed December 14, 2020.
- [2] Worldometer COVID-19 Count, <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, Accessed December 14, 2020.
- [3] WHO Director-General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 - March 11, 2020, <https://www.who.int/director-general/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-COVID-19---11-march-2020>, Accessed December 14, 2020.
- [4] C. B. A. Satrio, W. Darmawan, B. U. Nadia and N. Hanafiah, Time series analysis and forecasting of coronavirus disease in Indonesia using ARIMA model and PROPHET, *Procedia Computer Science*, 179, 524-532, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.036>
- [5] A. Althnian, A. A. Elwafa, N. Aloboud, H. Alrasheed and H. Kurdi, Prediction of COVID-19 Individual Susceptibility using Demographic Data: A Case Study on Saudi Arabia, *Procedia Computer Science*, 177, 379-386, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.051>
- [6] Z. Ceylan, Estimation of COVID-19 prevalence in Italy, Spain, and France, *Science of The Total Environment*, 729, 138817, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138817>
- [7] L. Fang, D. Wang and G. Pan, Analysis and Estimation of COVID-19 Spreading in Russia Based on ARIMA Model. *SN Compr. Clin. Med.* 2, 2521-2527, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42399-020-00555-y>
- [8] E. Fayyoubi, S. Idwan and H. AboShindi, Machine Learning and Statistical Modelling for Prediction of Novel COVID-19 Patients Case Study: Jordan. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 11(5), 122-126, 2020. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110518>
- [9] A. K. Gupta, V. Singh, P. Mathur and M. C. Travieso-Gonzalez, Prediction of COVID-19 pandemic measuring criteria using support vector machine, prophet and LinReg models in Indian scenario, *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 24(1), 89-108, 2020. [doi:10.1080/09720502.2020.1833458](https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1833458)
- [10] H. Önder, Short-term forecasts of the COVID-19 epidemic in Turkey: March 16-28, *Black Sea Journal of Health Science*, 3(2), 27-30, 2020.
- [11] G. Pinter, I. Felde, A. Mosavi, P. Ghamisi and R. Gloaguen, COVID-19 Pandemic Prediction for Hungary; A Hybrid Machine Learning Approach. *Mathematics*, 8, 890, 2020.
- [12] H. R. Pourghasemi, S. Pouyan, Z. F. N. Sadhasivam, B. Heidari, S. Babaei and J. P. Tiefenbacher, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236238>
- [13] R. Tamhane and S. Mulge, "Prediction of COVID-19 Outbreak using Machine Learning". In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7:5, 2020.
- [14] Y. A. Gebretensae and D. Asmelash, Trend Analysis and Forecasting the Spread of COVID-19 Pandemic in Ethiopia Using Box-Jenkins Modeling Procedure. *Int J Gen Med.* 14, 1485-1498, 2021. <https://doi.org/10.2147/IJGM.S306250>
- [15] M. Marzouk, N. Elshaboury, A. Abdel-Latif and S. Azab, Deep learning model for forecasting COVID-19 outbreak in Egypt, *Process Safety and Environmental*

- Protection, 153, 363-375, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.07.034>
- [16] S. Z. Ahmed “Analysis and forecasting the outbreak of COVID-19 in Ethiopia using Machine learning”. *European Journal of Computer Science and Information Technology*, 8(4), 1-13, 2020.
- [17] M. Djeddou, I. A. Hameed, A. Nejatian and I. Loukam, Predictive Modelling of COVID-19 New Cases in Algeria using An Extreme Learning Machines (ELM) medRxiv 2020.09.28.20203299. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.09.28.20203299>
- [18] A. I. Saba and A. H. Elsheikh, Forecasting the prevalence of COVID-19 outbreak in Egypt using nonlinear autoregressive artificial neural networks, *Process Safety and Environmental Protection*, 141, 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.029>
- [19] R. Takele, Stochastic modelling for predicting COVID-19 prevalence in East Africa Countries, *Infectious Disease Modelling*, 5, 598-607, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.08.005>
- [20] J. Luo, Z. Zhang, Y. Fu, F. Rao, Time series prediction of COVID-19 transmission in America using LSTM and XGBoost algorithms, *Results in Physics*, 27, 104462, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104462>
- [21] V. dos S. Santana et al., A Machine Learning Models for COVID-19 Detection in Brazil Based on Symptoms *JMIR Preprints* 25/01/2021:27293. doi: [10.2196/preprints.27293](https://doi.org/10.2196/preprints.27293)
- [22] M. Jojoa and B. Garcia-Zapirain, Forecasting COVID 19 Confirmed Cases Using Machine Learning: the Case of America. *Preprints* 2020, 2020090228. doi: [10.20944/preprints202009.0228.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202009.0228.v1)
- [23] V. H. Moreau, Forecast predictions for the COVID-19 pandemic in Brazil by statistical modeling using the Weibull distribution for daily new cases and deaths. *Braz J Microbiol*, 51, 1109–1115, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00331-z>
- [24] R. G. da Silva, M. H. D. M. Ribeiro, V. C. Mariani, L. dos S. Coelho, Forecasting Brazilian and American COVID-19 cases based on artificial intelligence coupled with climatic exogenous variables, *Chaos, Solitons & Fractals*, 139, 110027, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110027>
- [25] F. S. H. de Souza, N. S. Hojo-Souza, E. B. dos Santos, C. M. da Silva and D. L. Guidoni, Predicting the disease outcome in COVID-19 positive patients through machine learning: a retrospective cohort study with Brazilian data. medRxiv 2020.06.26.20140764. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.26.20140764>
- [26] S. Wollenstein-Betech, C. G. Cassandras, I. C. Paschalidis, Personalized Predictive Models for Symptomatic COVID-19 Patients Using Basic Preconditions: Hospitalizations, Mortality, and the Need for an ICU or Ventilator. medRxiv 2020.05.03.20089813. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.05.03.20089813>
- [27] N. Ayoobi et al., Time series forecasting of new cases and new deaths rate for COVID-19 using deep learning methods, *Results in Physics*, 27, 104495, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.104495>
- [28] Bala, Sagar, COVID-19 Outbreak Prediction Analysis using Machine Learning. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9, 1-7, 2021. doi: [10.22214/ijraset.2021.32690](https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.32690)
- [29] A. Hassan, A. Qasem, W. Abdalla and O. Elhassan. Visualization, Prediction of COVID-19 Future Outbreak by Using Machine Learning. *International Journal of Information Technology and Computer Science*. 13, 16-32, 2021. doi: [10.5815/ijitcs.2021.03.02](https://doi.org/10.5815/ijitcs.2021.03.02)
- [30] C. Yu, S. Chang, T. Chang, J. Wu, Y. Lin, H. Chien and R. A. Chen, COVID-19 Pandemic Artificial Intelligence–Based System with Deep Learning Forecasting and Automatic Statistical Data Acquisition: Development and Implementation Study *J Med Internet Res*, 23(5), e27806, 2021. <https://www.jmir.org/2021/5/e27806> doi: [10.2196/27806](https://doi.org/10.2196/27806)
- [31] S. F. Ardabili, A. Mosavi, P. Ghamisi, F. Ferdinand, A. R. Varkonyi-Koczy, U. Reuter, T. Rabczuk and P. M. Atkinson, “COVID-19 Outbreak Prediction with Machine Learning”. medRxiv 2020.04.17.20070094. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.17.20070094>
- [32] K. B. Prakash, S. S. Imambi, M. Ismail, T. P. Kumar, Y. N. Pawan, “Analysis, Prediction and Evaluation of COVID-19 Datasets using Machine Learning Algorithms” in *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(5), 2020. doi: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/117852020>
- [33] N. S. Punn, S. K. Sonbhadra and S. Agarwal. “COVID-19 Epidemic Analysis using Machine Learning. and Deep Learning Algorithms”. medRxiv 2020.04.08. 20057679. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.08.20057679>
- [34] F. Rustam, A. A. Reshi, A. Mehmood, S. Ullah, B.-W. On, W. Aslam and G. S. Choi, “COVID-19 Future Forecasting Using Supervised Machine Learning Models”. in *IEEE Access*, 8, 101489-101499, 2020. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2997311](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997311)
- [35] M. Şahin, Forecasting COVID-19 cases based on mobility. *MANAS Journal of Engineering*, 8(2), 144-150, 2020. doi: [10.51354/mjen.769763](https://doi.org/10.51354/mjen.769763)
- [36] S. Tuli, S. Tuli, R. Tuli, and S. S. Gill, “Predicting the Growth and Trend of COVID-19 Pandemic Using Machine Learning and Cloud Computing”. *Internet of Things*, 11, 100222, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100222>







## ESA tabanlı göz durumu tespitinde görüntü ön işleme yöntemlerinin etkisi

### The effect of image preprocessing methods in CNN-based eye state detection

İsmail Kayadibi<sup>1,\*</sup> , Gür Emre Güraksın<sup>2</sup> , Uçman Ergün<sup>3</sup> 

<sup>1,3</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>2</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar, Türkiye

#### Öz

Bu çalışma göz kırpma, göz yorgunluğu, sürücü uyusukluğu gibi temel problemlerin çözümlenmesinde önemli olan göz durumu tespitine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, göz durumu tespiti için görüntü ön işleme yöntemleri ve derin öğrenme tabanlı evrişimsel sinir ağına (ESA) dayanan bir yöntem önerilmiş ve önerilen yöntem ZJU veri seti üzerinde performansı test edilmiştir. Ayrıca, önerilen ESA modelinde farklı havuzlama katmanları değerlendirilmiş ve ZJU veri seti üzerinde elde edilen bulgulara ortalama havuzlama kullanılan önerilen ESA modelinin en iyi performansı elde ettiği görülmüştür. Sonrasında, ZJU veri setine görüntü ön işleme yöntemleri uygulanmış ve işlenmiş ZJU veri seti, önerilen ESA modelinde eğitilerek performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre histogram eşitleme yöntemi kullanılarak eğitimi gerçekleştirilen ESA modelinin ZJU veri setinde %94.32 doğruluk, %94.95 duyarlılık, %92.42 özgüllük, %97.41 kesinlik ve %96.16 F1 skor performans metrikleri ile üstün bir başarı elde ettiği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ZJU veri setinde yapılan önceki çalışmalarda sunulan performans metrikleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin literatür ile karşılaştırıldığında, göz durumu tespitinde güçlü sınıflandırma performansına sahip olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Derin öğrenme, Evrişimsel sinir ağı, Histogram eşitleme, Göz durumu tespiti

#### 1 Giriş

Göz durumu, önemli bir yüz özelliği olmanın yanı sıra fizyolojik ve psikolojik durumların değerlendirilmesi için gerekli kriterlerden biridir. Bu yüzden son zamanlarda göz durumlarının tanımlanması, bilgisayar görme alanında popüler bir araştırma alanı olmuş ve görüntü analizi bakımından en başarılı uygulamalardan biri haline gelmiştir [1]. Ayrıca göz durumunun tespiti, güvenlik uygulamaları, insan-makine etkileşimleri vb. konularda geniş potansiyele sahip bir kullanım alanı oluşturmaktadır.

Göz durumu, göz kırpma tespiti [2] ve göz yorgunluğunun algılanması [3] için geliştirilen bilgisayar görme sistemlerinde kullanılan temel parametrelerden birisi olmuştur. Ancak, göz durumunun tespitinde, aydınlatma vb. çevresel faktörler ve kişinin ten rengi, yüz ifadesi, uzun saçlı olması ve gözlük kullanması gibi kişiye göre değişken durumlar zorluklar yaratabilir [4]. Bu konuda son yirmi yılda

#### Abstract

This research investigates how eye state detection is used to overcome simple problems including blinking, eyestrain, and driving drowsiness. The study utilized the ZJU dataset, and it suggested an eye state recognition approach based on image preprocessing methods and a deep learning-based convolutional neural network (CNN). First, multiple pooling layers were tested in the suggested CNN model, and it was discovered that the average pooling performed the best in the results. The image preprocessing methods applied on the ZJU dataset were then trained on the proposed CNN model and their results have been compared. The CNN model performed exceptionally well on the ZJU dataset, according to a comparison of the results obtained using the histogram equalization method, with 94.32% accuracy, 94.95% sensitivity, 92.42% specificity, 97.41% precision, and 96.16% F1 score performance metrics. The results of this investigation were compared to prior studies on the ZJU dataset, which had provided performance measures. When compared to the literature, it was obtained that the proposed technique has a high classification performance in detecting vision problems.

**Keywords:** Deep learning, Convolutional neural network, Histogram equalization, Eye state detection

çok ilerleme kaydedilmiş ve sayısız yüz tanıma algoritması [5] geliştirilmiştir.

Teknolojideki son gelişmeler doğrultusunda dijital ekranların uzun süre kullanılması, kuru göz ve bilgisayarlı görme sendromunda artışa yol açmıştır. Bu sendromun göz kırpma sayısı ile ilişkili olduğu kanıtlanmış ve bu nedenle son yıllarda göz kırpma tespiti konusu araştırmacıların dikkatini çekmiştir [6-8]. Ek olarak göz kırpmasının algılanması, sürücü uyusukluk sistemlerinin gelişiminde de önemli rol oynamaktadır [9]. Bu kaçınılmaz gerçekler ve gelişmeler doğrultusunda göz durumu tespiti konusunda araştırmacılar, hem insan-bilgisayar etkileşimi tasarımlarının gelişimi hem de yatağa bağımlı engellilerin yaşam kalitesinin artırılmasını amaç edinmiş ve bilgisayarlı görü yöntemlerinin etkin kullanımını içeren birçok çalışma yapmıştır [10-11].

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: i.kayadibi026@gmail.com (İ. Kayadibi)

Geliş / Received: 11.03.2022 Kabul / Accepted: 29.04.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1086414

Sürücü sersemliği (uykusuzluk, yorgunluk, dikkatsizlik vb.) de göz durumuyla doğrudan ilişkili ve ölümler sonucunda araç kazalarının yaygın nedenlerinden biridir. Sürücü sersemliği tespit etmek, gelecekteki otonom sistemlerin ayrılmaz bir parçası olabilir. Sürücü uyuşukluğu fizyolojik, araç temelli ve davranışsal olmak üzere üç kategoride incelenen çeşitli ölçüm yöntemleri kullanılarak tespit edilebilir [3]. Fizyolojik ölçümler, sürücüye yerleştirilen hassas elektrotlardan veya elektronik cihazlardan elde edilen elektrokardiyogram (EKG), elektroensefalogram (EEG) ve elektrookülogram (EOG) gibi fizyolojik sinyalleri içerir. Ancak fizyolojik ölçümler sürücüyü kısıtladığı için yaygın olarak kullanılmamaktadır. Araç kontrol ekipmanlarının (direksiyon simidi, şerit izleme ve fren düzenlemeleri) izlenmesi, sürücü becerilerine ve yol kalitesine aşırı bağımlılık nedeniyle düşük güvenilirliğe sahip, invazif olmayan başka bir uyuşukluk algılama yöntemidir. Davranışsal yöntemler, araçtan çok kişiye odaklandıkları için fizyolojik ve araç temelli yöntemlere göre daha güvenilirdir. Yorgunluğu teşhis etmek için videoya kaydedilmiş görsel özellikleri kullanan ve sürücünün hareketini, yüz ifadesini, göz durumunu ve göz kırpması durumunu analiz eden bilgisayarlı görüş sistemlerine dayanırlar. Davranışsal yöntemler, müdahalesiz ve sürücü odaklı oldukları için son zamanlarda popüler olmuştur [12].

Göz durumunun tespitinde sıklıkla kullanılan özellik tabanlı, görünüm tabanlı ve hareket tabanlı olmak üzere üç tür algılama yöntemi vardır. Özellik tabanlı yöntemler geometrik özellikleri ve gri seviyeli desenleri kullanır. Harekete dayalı yöntemler, göz kapağı hareketinin özelliklerine odaklanır. Görünüme dayalı yöntemler, göz bölgesinin dokusal özelliklerini içerir. Deneysel sonuçlar, görünüme dayalı yöntemlerin diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini belirtmektedir [13].

Son yıllardaki bilgi işlem, depolama ve insan-bilgisayar etkileşimi teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yapay zekâ tekniklerinden özellikle derin öğrenme yöntemi, birçok alanda problemlerin çözümünde üstün performans göstermiş ve farklı (eşsiz) senaryoları etkili bir şekilde tanımlayabilen öğrenme algoritmalarına sahip olduğunu kanıtlamıştır. Derin öğrenme (DL), bir makine öğrenmesi alt dalıdır ve insan beyninin sinir sistemine benzer özellik göstererek, yapısında birden çok katmana sahip sinir ağları içermektedir [14].

DL, karmaşık veri kümelerindeki karmaşık yapıları keşfetmek için geri yayılım algoritmasını kullanır. Bu algoritma, bir makinenin DL katmanında bir önceki katman üzerinden temsilini hesaplamak için dahili parametrelerini nasıl değiştirmesi gerektiğini gösterir. Son zamanlarda DL konuşma tanıma, nesne tanıma ve algılama vb. birçok alanda en son teknolojiyi önemli ölçüde geliştirmiştir [14]. DL modelleri bünyesinde birçok derin katmanlar barındırır. Bu çoklu derin katman eğitimini içeren popüler bir DL yöntemi de ESA'dır [29]. ESA, yapay zekada kullanılan etkili bir yöntemlerden biri olmuştur.

Tipik bir ESA, çok katmanlı ve ileri beslemeli bir sinir ağı olarak da bilinir. İleri beslemeli ağlardan farklı olarak, ESA temel yapısı birkaç evrişim ve alt örnekleme katmanları, tam bağlı katman, softmax katmanı ve

sınıflandırma katmanlarından oluşmaktadır. Bu yapı, görüntüleri veya herhangi bir iki boyutlu veriyi işlemek için modellenmiştir. ESA'lar bu işlemleri gerçekleştirmek için yerel bağlantıları kullanır ve daha az parametre ayarı yapılmasını sağlayarak eğitim sürecini azaltır [30].

DL, ham verilerin temsili özelliklerini çıkardıktan sonra tüm düşük seviyeli özellikleri birleştirerek yüksek seviyeli soyut bir temsili otomatik oluşturabilir. Bu yüzden, son zamandaki gelişmeler ışığında ham verilerden temsili özelliklerin manuel olarak çıkartılmasına gerek yoktur. Ancak göz durumu tanıma göz yorgunluğu için bilgisayarlarda, sürücü uyuşukluğu tespiti için araçlarda ve göz kırpması veya yüz ifadesi tespitlerinde insan bilgisayar etkileşimi içeren cihazlarda olmak üzere birçok ortam ve donanımlarda kullanıldığı için son on yılda insan gözünün durumunun tanımlanmasında çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir.

Dong vd. göz durumu tanımlanması için çeşitli özellik çıkartma yöntemlerinden elde ettiği özellik setlerini rastgele orman, rastgele eğreltiler ve destek vektör makinesi yöntemleri ile sınıflandırmışlardır. Bu sınıflandırmalar sonucunda histogram yönelimli gradyanın sınıflandırma amacıyla gürültü etkisine karşı daha az etkilendiğini ve yaklaşımlarının %93'e varan başarı oranına ulaştığını bildirmişlerdir [12].

Pauly ve Sankar göz kırpması algılamak için düşük çözünürlüklü göz görüntülerini içeren farklı özellikler (ortalama yoğunluk, Fisher yüzleri ve yönlendirilmiş gradyanların histogram (HOG) özelliği) ile destek vektör makinesi (DVM) ve yapay sinir ağı (ANN) gibi sınıflandırıcılar kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan beş farklı yöntemin karşılaştırmalı sonucunda, HOG'dan elde edilen özelliklerin DVM sınıflandırıcı ile kullanımının çalışmada kullanılan diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [15].

Pauly and Sankar web kameralarından elde edilen video karelerinde göz takibi ve göz kırpması tespiti için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem göz takibinde haar-cascade sınıflandırıcıyı ve göz kırpması tespitinde ise DVM sınıflandırıcı ile HOG özelliklerinin bir kombinasyonunu içermektedir. Göz kırpması tespiti için önerilen yöntemleri, iki halka açık veri setinden alınan görüntülerde test etmişler ve ortalama %92.5 doğruluk oranı elde etmişlerdir [16].

Han vd. akıllı telefon platformlarında göz kırpması tespiti veya göz takibi için iki makine öğrenimi tekniğini (DVM ve ESA) birleştiren hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Ayrıca önerilen hibrit yöntem alternatif olarak çok sınıflı DVM kullanmışlar ve hibrit yöntem ile karşılaştırmışlardır. Göz kırpması algılamak için önerilen yöntemlerin karşılaştırmasında LeNet-5 ESA modelinin, çok sınıflı SVM yöntemi ve diğer yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ek olarak, HOG özelliklerine sahip doğrusal SVM sınıflandırıcı ve LeNet-5 ESA modelinin göz kırpması algılamak için mobil ortamlarda verimli ve güvenilir bir şekilde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [17].

Lee vd. yüz ve göz bölgelerini algılamak için hem AdaBoost yüz dedektörü hem de Lucas-Kanade-Tomasi (LKT) yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemler ile

bölgelerin belirlenmesinin ardından göz bölgelerinin genişlik ve yükseklik özelliklerini, DVM sınıflandırıcısında gözün açık veya kapalı olarak belirlenmesinde kullanarak özellik tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir [18].

Zhao vd. göz durumunun tanımlanması için göz bölgesindeki yararlı bilgilere göre sınıflandırmaya dayanan derin entegre sinir ağı önermişlerdir. Bu entegre sinir ağında eğitim tiplerini değiştirerek birçok kombinasyon denemişler ve transfer öğrenme ve veri artırımına ile, küçük veri kümelerinde sınıflandırma yeteneğinin artırılmasına imkân sağlayarak yüksek başarıma ulaştıklarını raporlamışlardır [13].

Wu vd. sürücü uyuşukluğunu algılamak için Local Binary Pattern (LBP) yöntemini kullanarak özellik tabanlı DVM sınıflandırıcı yöntemini önermişlerdir. Deneysel sonuçların değerlendirilmesinde bu yöntemin göz durumu tanıma ve sürücü uyuşukluğunun etkili bir şekilde tespit etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir [19].

Göz durumu tespiti, birçok alanda etkinliği olduğundan çeşitli gerçek dünya ortamlarıyla karşılaşmaktadır. Bu ortamların görüntü kalitesi değişken olabilmesinden dolayı, göz durumunun tespiti zorlaşabilmektedir [15]. Yapay zekâ destekli sistemlerde, görüntülerin kalitesi sistemin doğruluğuna etki edebilmektedir. Bu yüzden, göz durumu tespitinde, geliştirilen sistemlerin her ortama uygunluğunun sağlanabilmesi için görüntü işleme yöntemlerinin kullanılması önemlidir.

Görüntü önileme yöntemleri, görüntünün elde edilmesi sırasında maruz kalınan gürültü veya donanımdan kaynaklanan gürültüleri gidermek veya iyileştirmek için kullanılmaktadır. Son zamanlarda, farklı bilim alanlarında görüntülerin iyileştirilmesi ve tıbbi görüntü işleme alanında daha iyi yorumlamalar yapmak için görüntü önilemleri kullanılmaktadır [21]. Medikal, uydu görüntüleri vb. analiz gerektiren tüm alanlarda görüntü iyileştirme kullanılmaktadır. Görüntü iyileştirme aslında bir görüntünün bir başka görüntüye dönüşümüdür.

Birçok uygulamada renkli görüntülerin gri seviyeye dönüştürülmesi önemli adımlardan birisidir. Görüntünün gri seviyeye dönüşümü monokrom baskıda, tek kanallı görüntü işleme ve stilizasyonda yaygın olarak kullanılan bir görüntü önileme uygulamasıdır [22]. Renkli bir görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesinde kırmızı, mavi ve yeşil kanallarının ağırlıklı toplamı alınarak dönüşüm sağlanır.

Son zamanlarda yapay zekanın gelişimi, derin öğrenme yöntemlerinin ortaya çıkışı ve gelişmelerin artması görüntü sınıflandırılmasında yeni yöntemlerin gelişmesine ve fikirlerin oluşmasına olanak sağlamıştır. Makine öğrenmesi alt dallarından biri olan derin öğrenme, özellikle ESA'nın görüntü sınıflandırma üzerindeki üstün performansı, görüntü tabanlı birçok uygulama alanında önemli bir etki yaratmıştır [14]. ESA, geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinden farklı olarak çok katmanlı yapısında, ham verilerden kendisi temsili öğrenme sağladığı için dikkatli mühendislik ve uzmanlık gerektirmez. Bu sebeple ESA'lar yüksek boyutta kapasiteye sahip görüntü ve özellik vektörleri içeren ham verilerde, özellikle görüntü tanıma ve konuşma tanımda üstün başarılar elde etmiştir. Bu yüzden göz durumu tanımda önceki çalışmalarda kullanılan el yapımı

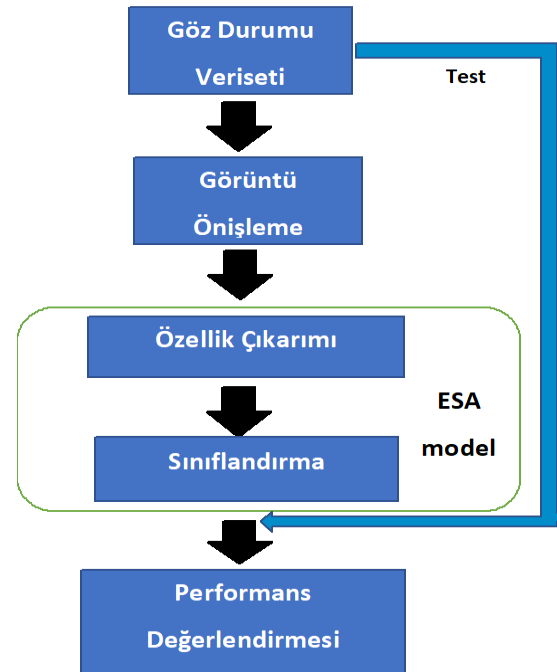
özellik çıkartma yöntemleri yerine ESA yönteminin kullanılması, özellik çıkarımında ve sınıflandırılmasında hem hız hem de kullanım kolaylığı açısından farkındalık yaratmaktadır.

Bu çalışmada göz durumu tespitinde görünüme dayalı yöntem esas alınmıştır. Bu amaçla göz durumu tespiti için derin öğrenmeye dayanan bir ESA modeli önerilmiştir. Bu model, ZJU veri setinde eğitilerek performansı değerlendirilmiş ve yapısında değişiklikler yapılarak en başarılı model elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen ESA modeli üzerinde veri setine farklı görüntü önileme yöntemleri uygulayarak model üzerinde önileme etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada, performans değerlendirilmesi için kullanılan veri setinde en başarılı model önerilmiş ve bu veri seti üzerinde en yüksek performansa sahip önileme yöntemi belirlenmiştir.

Makalenin organizasyonu şu şekilde yapılandırılmıştır: ilk olarak materyal ve metod başlığı altında çalışmanın akış diyagramı, görüntü önileme yöntemleri, önerilen ESA modeli ve halka açık göz kırpması veri seti tanıtılmıştır. Ardından deneysel bulgular ve tartışma başlığında önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için gerçekleştirilen deneysel sonuçlardan bahsedilmiştir. Son olarak da sonuçlar bölümünde deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

Bu çalışmada, göz durumu tespiti için görüntü ön işleme ve ESA modeline dayanan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Akış diyagramı

Önerilen yöntem, bir göz durumu veri seti üzerinde değerlendirilmiştir. Bu yüzden öncelikle göz durumu veri setine önileme aşamaları uygulandıktan sonra önerilen ESA

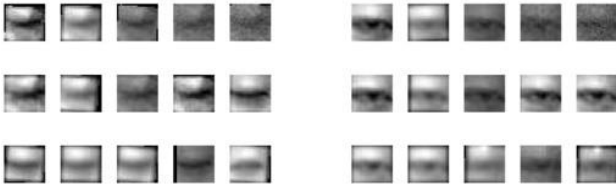
modelinin eğitimi (özellik çıkarımı ve sınıflandırma) gerçekleştirilerek görüntü önışlem yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Son olarak ise, görüntü önışlem ile elde edilen ESA modellerinin performans değerlendirmeleri yapılarak en yüksek performansa sahip ESA modeli belirlenmiştir.

### 2.1 Göz durumu veri seti

Bu çalışmada, göz durumu veri seti olarak ZJU [20] göz kırpma veritabanı kullanılmıştır. ZJU veri setinde bulunan açık ve kapalı göz durumları, aydınlatma ve çözünürlük açısından gerçek dünya koşulları altında alınmıştır. Bu veri seti, eğitim ve test olarak iki gruba ayrılmış ve iki kategoriden (açık ve kapalı) oluşmaktadır. Tablo 1’de ZJU veri setinin detayları verilmiştir. ZJU veri setindeki açık ve kapalı örnek göz görüntüleri, Şekil 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** ZJU veri seti detayları

Sınıf	Eğitim	Test
Açık (open) göz	5770	1230
Kapalı (close) göz	1574	410



**Şekil 2.** ZJU veri setindeki açık ve kapalı örnek göz görüntüleri

### 2.2 Görüntü önışlem yöntemleri

Bu çalışmada göz durumu tespitinde görüntülerin iyileştirilmesi için kontrast iyileştirme ve filtreleme teknikleri kullanılmıştır.

Görüntü iyileştirme uygulamalarından kullanılan önemli kavramlardan birisi de histogramdır. Bir görüntünün yoğunluk seviyesi  $[0, L-1]$  aralığındadır ve  $L$  yoğunluk

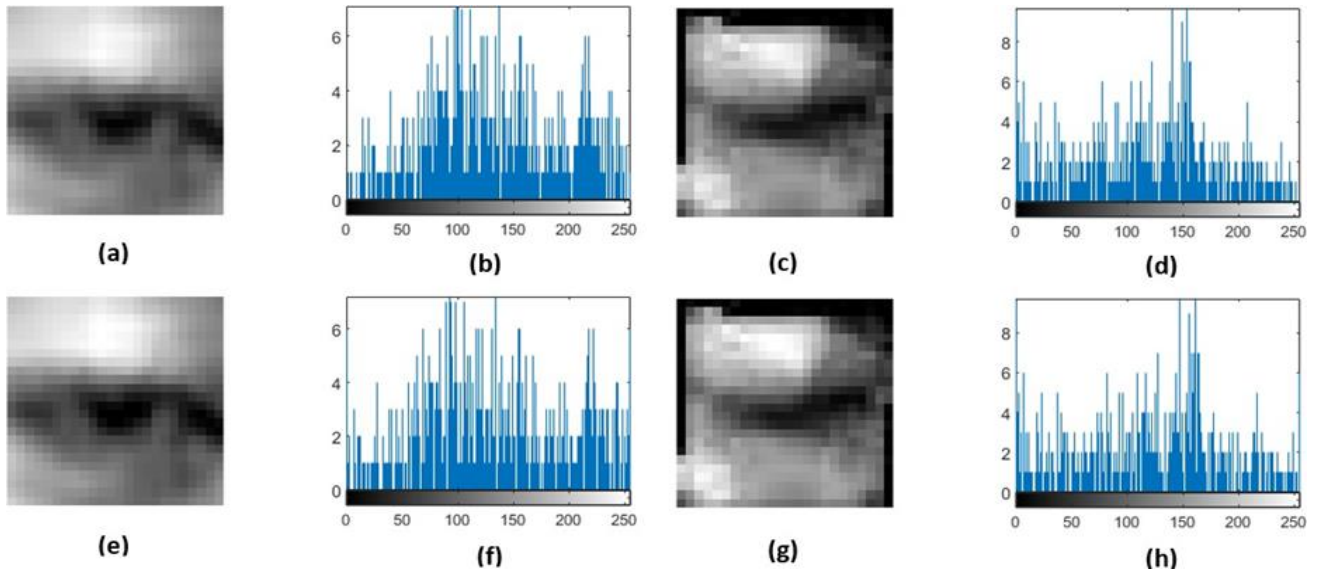
seviyelerine sahip bir görüntünün histogramı, Denklem 1’de tanımlanmıştır.

$$H(r_k) = n_k \quad (1)$$

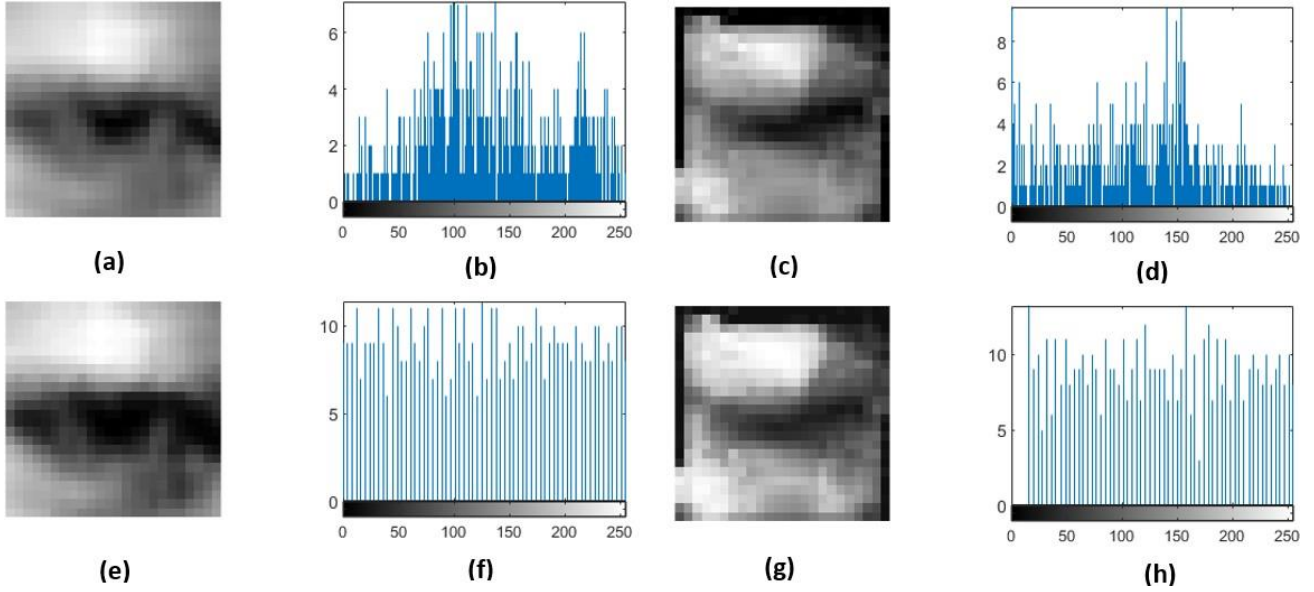
Burada,  $r_k$   $k$  pikselinin yoğunluk seviyesidir ve  $n_k$ , yoğunluk seviyesi  $r_k$  olan görüntüdeki piksel sayısıdır. Bir başka konu normalleştirilmiş histogramlardır. Bu histogramlar, tüm öğeleri görüntüdeki toplam piksel sayısına bölerek elde edilebilir.  $M \times N$  boyutundaki bir görüntü normalleştirilirse, elde edilecek histogram Denklem 2’de verilmiştir.

$$P(r_k) = \frac{n_k}{M \times N}, k = 0, 1, \dots, [L - 1] \quad (2)$$

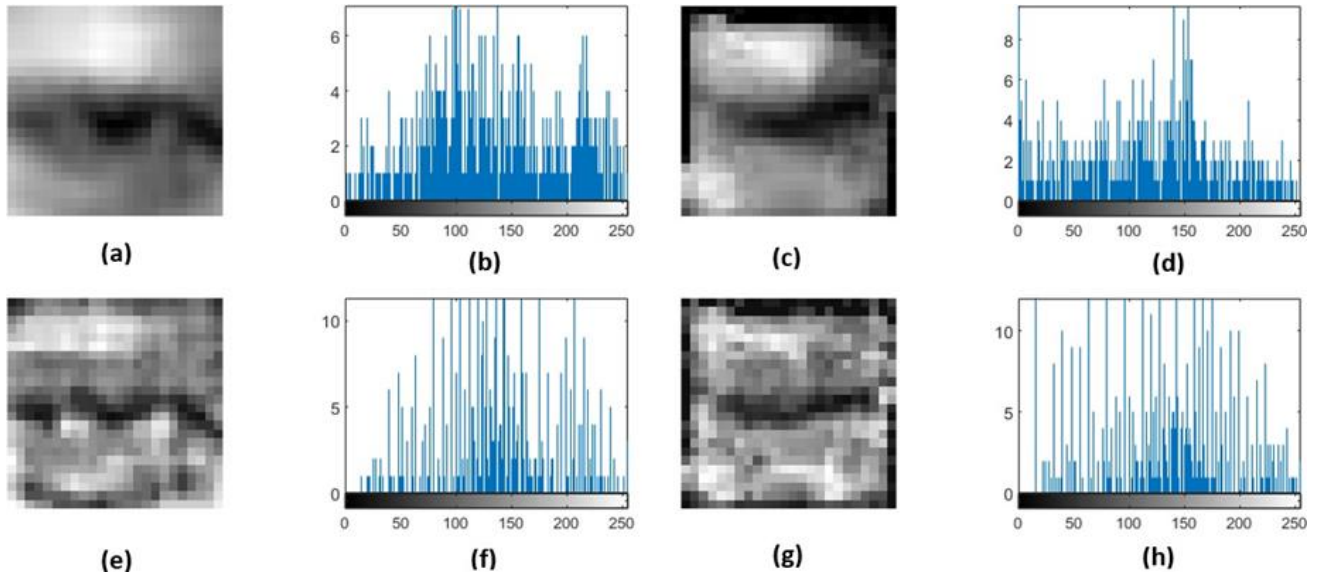
Şekil 2’de görüldüğü gibi ZJU veri setinde bulunan açık ve kapalı göz durumu görüntüleri, farklı fiziksel özelliklere sahip ortamlar üzerinde toplanmıştır. Toplanan bu görüntülerde, ortamların fiziksel özelliklerine göre görüntünün aşırı karanlık olabilmesi ya da aydınlık seviyesinin fazlalığından dolayı göz hatlarının belirgin olmayışı, göz durumu tespitinde kullanılan bilgisayarlı görüşmelerinde problem yaratmaktadır. Bu yüzden göz durumu görüntülerinde, zayıf veya aşırı ışıklandırma nedeniyle oluşan kontrast farklılığı kontrast önışlemleri ile iyileştirilebilir. Bir başka açıdan görüntü histogramı kullanarak da düzenli piksel dağılımını sağlayan kontrast ayarı yapılabilmektedir. Ayrıca göz durumu görüntülerinde göz bölgesinin belirgin olmaması durumunda, görüntüdeki gürültüler giderilerek veya kontrastın ayarlanması ile görüntüde iyileştirme gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, ZJU göz durumu veri setindeki görüntülere görüntü kontrast iyileştirme ve filtreleme önışlem teknikleri uygulanmıştır. Önışlem uygulanan görüntüler, önışlem etkilerinin karşılaştırması için önerilen ESA modeli üzerinde performansı değerlendirilmiştir.



**Şekil 3.** Örnek göz görüntüsüne KG uygulaması: (a-c) önişlemsiz, (b-d) önişlemsiz histogram grafiği, (e-g) önişlem uygulanmış hali ve (f-h) önişlemli histogram grafiği



Şekil 4. Örnek göz görüntüsüne HE uygulaması: (a-c) önişlemsiz, (b-d) önişlemsiz histogram grafiği, (e-g) önişlem uygulanmış hali ve (f-h) önişlemlili histogram grafiği



Şekil 5. Örnek göz görüntüsüne UHE uygulaması: (a-c) önişlemsiz, (b-d) önişlemsiz histogram grafiği, (e-g) önişlem uygulanmış hali ve (f-h) önişlemlili histogram grafiği

ZJU veri setine ilk olarak zayıf ışıklandırılmadan dolayı oluşan düşük kontrastlı görüntüleri iyileştirmek için görüntü önişlem yöntemlerinden kontrast germe kullanılmıştır. Kontrast germe (KG), histogramda alt ve üst sınırları tanımlamak ve bu aralığı genişletmek için dönüşümlerin uygulanmasını içeren, yaygın olarak birçok alanda kullanılan bir görüntü iyileştirme yöntemidir [23]. Bir görüntünün kontrastında ayarlama yapmak, görüntüdeki aydınlatma dağılımını stabilize etmek için önemlidir. Göz görüntülerinde gözün bölümü genellikle aydınlığın az olduğu bölgedir. Bu bağlamda göz görüntülerinin analizinin iyileştirilmesi için ZJU veri setine KG önişlemi uygulanmıştır. ZJU veri setinden örnek açık ve kapalı durumunu belirten göz görüntülerine KG uygulanmış hali ve

bu işlemde elde edilen histogram grafiklerine bir örnek Şekil 3’de gösterilmiştir.

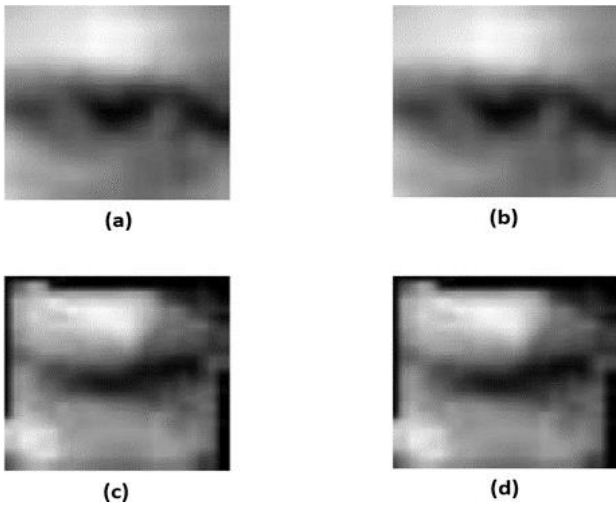
Kontrast iyileştirme önişlemlerinden biri de histogram eşitlemedir. Histogram eşitleme (HE), ZJU veri setinde zayıf aydınlık ışıklandırma veya yoğun histogram dağılımı içeren görüntülerin daha düzenli kontrast dağılımını sağlamak için kullanılmıştır. HE, kullanımı daha kolay ve diğer yöntemlere göre daha verimli olduğu için tüm görüntü türleri için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. HE, girdi gri seviyeli görüntünün olasılık dağılımını hesaplayarak yeni bir dağılım oluşturur [24]. ZJU veri setinden örnek açık ve kapalı durumunu belirten göz görüntülerine HE uygulanmış hali ve bu işlemde elde edilen histogram grafikleri Şekil 4’de gösterilmiştir.

Kontrast iyileştirme yöntemlerinden bir diğeri Uyarlamalı Histogram Eşitleme (UHE) ise, ZJU veri setinde çoğunlukla zayıf ışıklandırma ortamında elde edilen görüntülerin kontrastını arttırmak için kullanılmıştır. Bu yöntem görüntü iyileştirmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak görüntünün homojen bölgelerinde hızın düşmesine ve gürültünün artmasına neden olabilir [25]. ZJU veri setinden örnek açık ve kapalı durumunu belirten göz görüntülerine UHE uygulanmış hali ve elde edilen histogram grafiklerine bir örnek Şekil 5’de gösterilmiştir.

Görüntü ön işlemede filtreleme teknikleri görüntüyü yumuşatmak ya da kenarları belirginleştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. ZJU veri setinde göz bölgelerinin daha belirgin olması ve veri seti toplanırken cihazdan kaynaklı oluşan gürültüleri yumuşatmak için Gauss Filtresi (GF) kullanılmıştır. GF, bazı yönlerden gürültü bastırma için ideal filtre olarak kabul edilir ve bu nedenle görüntü işleme ve bilgisayarla görmede yaygın olarak kullanılır. Ancak, GF gürültüyü bastırır ama aynı zamanda sinyali bozma ihtimali de bulunmaktadır [26]. GF, görüntü iyileştirmede iki boyutlu operatör kullanır ve görüntüleri bulanıklaştırarak gürültüleri ortadan kaldırmaktadır. GF’de kullanılan iki boyutlu gauss denklemi Denklem 3’de verilmiştir.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

ZJU veri setinden örnek açık ve kapalı durumunu belirten göz görüntülerine GF uygulanmış hali, Şekil 6’de gösterilmiştir.



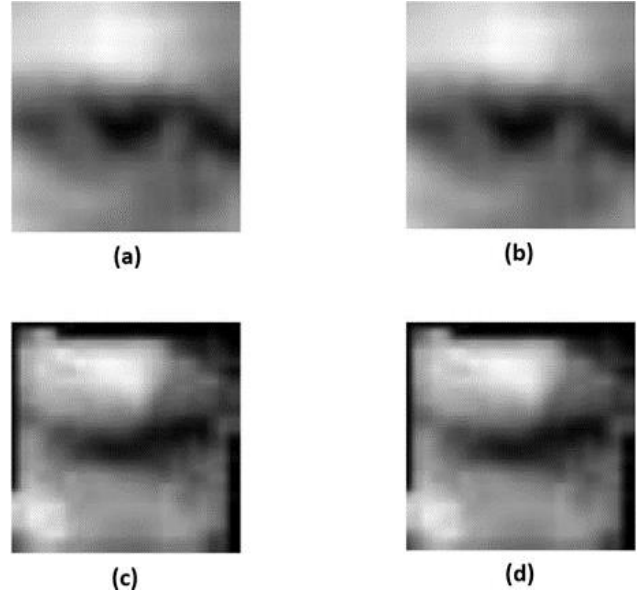
Şekil 6. Örnek göz görüntüsüne Gaussian filtresi uygulaması: (a-c) önişlemsiz ve (b-d) önişlem uygulanmış hali

Görüntü önişlem yöntemlerinde kullanılan bir diğere filtre de medyan filtredir. Medyan Filtre (MF), bir görüntünün kalitesini iyileştirmek ve gürültünün giderilmesi için kullanılır. Bu çalışmada da ZJU veri setindeki göz görüntülerinin, görüntü kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılmıştır. Doğrusal filtrelemeden daha üstün olan MF, doğrusal olmayan bir filtreleme yöntemidir [27]. Bir  $x_{ij}$ ,

$(i, j) \in Z^2$  görüntüsü için A filtre boyutunda MF, Denklem 4’deki gibi tanımlanır [28].

$$y_{ij} = \frac{\text{Median}x_{ij}}{A} = \text{Median}[x_{i+r, j+s}(r, s) \in A], (i, j) \in Z^2 \quad (4)$$

ZJU veri setinden örnek açık ve kapalı durumunu belirten göz görüntülerine MF uygulanmış haline bir örnek Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Örnek göz görüntüsüne medyan filtresi uygulaması: (a-c) önişlemsiz ve (b-d) önişlem uygulanmış hali

### 2.3 Derin öğrenme

DL, verilen bir veri seti üzerinden öğrenimler elde eden ve birden fazla katmandan oluşan bir makine öğrenmesidir. Son zamanlarda DL yöntemleri arasında ESA’nın görüntü sınıflandırma üzerindeki üstün başarısı, görüntü içeren sınıflandırma problemlerinde ESA’nın kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Bu çalışmada, göz durumu tespiti için bir ESA modeli önerilmiştir. Önerilen ESA modelinde, görüntü giriş, evrişim, toplu normalleştirme ve ortalama havuzlama, tam bağlı, softmax ve sınıflandırma katmanları kullanılmıştır. Önerilen ESA modelinin tipik katman yapısı Şekil 8’de verilmiştir.

Tipik ESA’larda genellikle ardışık evrişim katmanları arasına bir havuzlama katmanı eklenir. Havuzlamanın temel amacı, filtre çıktılarını toplamak ve temsili özellikleri kaldırmaktır. Ardından Rektifiye Lineer Birim (ReLU) aktivasyon fonksiyonu, filtre çıktılarının aktivasyonu için kullanılır. Normalleştirme katmanı, ESA’nın eğitimini hızlandırmak ve ağ başlatma durumuna duyarlılığı azaltmak için doğrusal olmayan katmanlar (evrişim ve ReLU) arasına yerleştirilir.

Havuzlama katmanı da genellikle ReLU katmanından sonra yerleştirilir. Bu katmanda gerçekleştirilen işleme “alt örnekleme” denir. Bu katmanın asıl iki amacı sonraki

katmanlar için daha az hesaplama yükü yaratmak ve modelin ezberlemesini engellemektir. En yaygın kullanılan havuzlama katmanı maksimum ve ortalamadır. Maksimum havuzlama hesaplaması **Denklem 5** ve ortalama havuzlama hesaplaması da **Denklem 6**'da verilmiştir.

$$Z_f = \max \{s\} = \max \{s_1, s_2 \dots s_n\} \quad (5)$$

$$Z_f = \text{ave} \{s\} = \text{ave} \{s_1, s_2 \dots s_n\} \quad (6)$$

**Denklem 5**'te, S filtre boyutunda maksimum değer seçilerek diğer değerler indirgenir ve işleme devam edilir. **Denklem 6**'da S filtre boyutundaki değerlerin toplamı alınarak ortalaması alınarak diğerleri indirgenir ve işlem devam ettirilir. ESA'nın evrişim filtrelerinden çıkarttığı özellikler, tam bağlı katmanda birleşir ve sınıflandırma katmanına doğru iletilir. Sınıflandırma katmanı ise, softmax aktivasyonunu kullanarak olasılık hesaplamasının ardından sınıflandırma yapmaktadır.

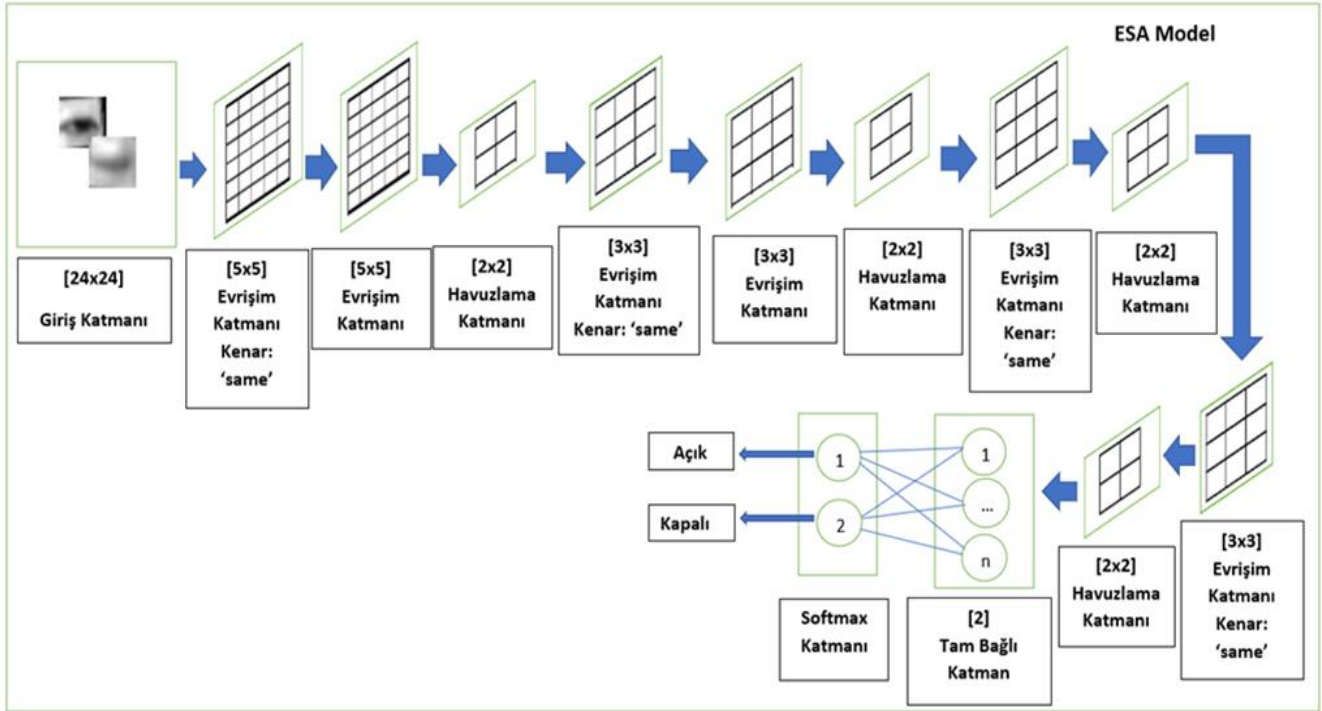
Önerilen ESA modelinin görüntü giriş katmanı (GGK), sırasıyla görüntünün yüksekliğini, genişliğini ve renk katmanını gösteren 24 x 24 x 1'e karşılık gelen görüntü boyutunu belirtir. GGK, veri normalizasyonu veya dönüşümü ile ilgili verilerin rastgeleleştirilmesine veya çıkarılmasına izin verir. Veri değerlendirmeleri, aşırı kullanımı önlemek için genellikle eğitimin başında otomatik olarak gerçekleştirilir. Önerilen ESA modeli altı evrişim katmanına sahiptir. Birinci, ikinci ve üçüncü evrişim katmanları 32 özellik haritası ve dördüncü, beşinci ve altıncı evrişim katmanları 64 özellik haritası çıkarmak için ayarlanmıştır. 1, 3, 5 ve 6'ncı evrişim katmanlarında kenar

özelliklerin kullanılması için "same" özelliği kullanılmıştır. Her evrişim katmanında sonra sırasıyla mini toplu normalleştirme ve ReLU katmanı kullanılmıştır. Bu katmanların ardından, ağın parametre sayısını ve geliştirilmesini azaltmak için havuzlama katmanı kullanılmıştır. Önerilen ESA modelinde, havuzlama katmanının etkisini incelemek için, ortalama ve maksimum havuzlama katmanı bir de havuzlama katmanı olmadan eğitim gerçekleştirilerek sistem performansı değerlendirilmiştir. Bu çalışmadaki kullanılan havuzlamalar 2x2 bir pencere üzerinde gerçekleştirilmiştir.

ESA modelinin evrişim katmanlarını ve alt örnekleme bölümlerinin ardından tüm ilgili özellikleri birleştirerek göz durumunun açık veya kapalı olmasını temsil eden 2 çıkışa sahip tam bağlantılı katman kullanılmıştır. Tam bağlantılı katman tüm çıkartılan özellikleri toplar ve modeli sınıflandırma için hazırlar. Sınıflandırma için, tam bağlantılı katmandan sonra softmax aktivasyon işlevi kullanılmıştır. Son olarak, sınıflandırma katmanı Softmax'ın aktivasyonundan elde edilen olasılıkları kullanarak sınıflandırma gerçekleştirmiştir.

ESA'ların eğitimi için hiperparametre seçimi önemli noktalardan biridir. ESA için belirlenmesi gerekli hiperparametreler kayıp fonksiyonu, optimizasyon yöntemi, öğrenme oranı, parti boyutu (batch size) ve periyot (epoch) sayısıdır.

Önerilen ESA modelinin hiperparametreleri kayıp fonksiyonu olarak çapraz entropi, optimizasyon yöntemi olarak momentumlu stokastik gradyan inişi (sgdm), öğrenme oranı 0.0001, parti boyutu 64 ve epoch sayısı da 100 olarak ayarlanmış ve bu hiperparametre ayarı ile önerilen ESA'nın eğitimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8. Önerilen ESA modeli

### 3 Bulgular ve tartışma

Önerilen ESA modeli üzerinde yapılan deneyler, yaygın kullanılan karışıklık matrisi performans metrikleri olan doğruluk (Denklem 7), özgüllük (Denklem 8), duyarlılık (Denklem 9), kesinlik (Denklem 10), ve F1 skor (Denklem 11) kullanılarak değerlendirilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (7)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (8)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

$$F_1 \text{ skor} = 2 \times \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (11)$$

Doğru pozitif (TP), göz durumunun gerçekte açık olup sınıflandırma tahmini sonucunda da açık olarak sınıflandırılmasıdır. Doğru negatif (TN), göz durumunun gerçekte kapalı olup sınıflandırma tahmini sonucunda da kapalı olarak sınıflandırılmasıdır. Yanlış pozitif (FP), gözün kapalı olup açık olarak sınıflandırılmasıdır. Yanlış negatif (FN) ise gözün açık olup kapalı olarak sınıflandırılmasıdır.

Önerilen ESA modeli ilk olarak, havuzlama katmanı etkisi incelemek için ZJU veri seti gri seviyeye dönüştürülmüştür. Sonrasında, bu veri seti üzerinde önerilen ESA modeli havuzlama katmanı olmadan, sadece ortalama havuzlama ve maksimum havuzlama katmanı kullanılarak 3 farklı şekilde eğitimi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Matlab R2020a ve i5-6200U, 2,40 GHz CPU, 12 GB RAM NVIDIA Ge Force 1050 Ti GPU ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Eğitim tamamlanmasından sonra modeller, ZJU veri setinin test kümesinde test edilmiş ve performans metrikleri karşılaştırma için hesaplanmıştır. Önerilen modelin 3 farklı havuzlama katmanı tipine ilişkin yapılan eğitimin değerlendirme sonucuna ilişkin performans karşılaştırması **Tablo 2**'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Havuzlama katmanı performans değerlendirmesi

Havuzlama Tipi	Kapalı	Açık
-	0.8976	0.9171
Maksimum	0.9171	0.9260
Ortalama	<b>0.9244</b>	<b>0.9488</b>

**Tablo 2**'de yapılan karşılaştırmalar sonucunda, önerilen ESA modelinde ortalama havuzlama katmanı diğer havuzlama katmanlarına göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Ortalama havuzlama katmanı, önerilen ESA modeli için en uygun havuzlama olarak belirlenmiş ve çalışmanın devamında bu katman referans alınarak devam edilmiştir.

Bir sonraki adımda, önerilen ESA modeli üzerinde görüntü önileme etkisi değerlendirilmesi için ZJU veri setine ayrı ayrı KG, HE, UHE, GF ve MF önilemleri uygulanmıştır. Görüntü önileme uygulanan ZJU verisetleri önerilen ESA modeli üzerinde eğitilmiş ve ZJU'nun test kümesinde performansı ölçülmüştür. İşlenmiş ZJU verisetlerinin önerilen ESA modelinde test edilmesi sonucu elde edilen performans sonuçları **Tablo 3**'de verilmiştir.

UHE ve HE, önerilen ESA modelinin performansını iyileştirirken KG, MF, GF performansı iyileştirememiştir. HE, performansını iyileştirmede AHE'den daha iyi performans göstermiştir. GF ve MF gibi filtreleme önilemlerinin uygulanması, önerilen ESA modeli üzerinde olumlu bir etki yaratmamıştır.

Bu çalışmada filtreleme tekniklerinden sonra kontrast iyileştirme yöntemleri (HE, UHE ve KG) kullanılarak önerilen ESA modeli üzerindeki performans etkileri analiz edilmiştir. ZJU veri setine MF uygulandıktan sonra HE, UHE ve KG'nin uygulanması sonucu eğitilen ESA modellerinin performansları analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar **Tablo 4**'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Önerilen ESA modelinin ZJU veri seti üzerinde önileme değerlendirilmesi

Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 skor
-	0.9366	0.9479	0.9024	0.9668	0.9572
UHE	0.9414	<b>0.9650</b>	0.8707	0.9572	0.9610
HE	<b>0.9432</b>	0.9495	<b>0.9243</b>	<b>0.9741</b>	<b>0.9616</b>
KG	0.9268	0.9447	0.8731	0.9571	0.9509
MF	0.9231	0.9243	0.9195	0.9717	0.9474
GF	0.8853	0.8731	0.9219	0.9710	0.9194

**Tablo 4.** ZJU veri setinde medyan filtre ve kontrast artırma yöntemlerinin etkisi

Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 skor
MF+HE	0.8798	0.8617	<b>0.9341</b>	0.9751	0.9148
MF+UHE	0.9298	<b>0.9512</b>	0.8658	0.9551	0.9531
MF+KG	<b>0.9317</b>	0.9308	<b>0.9341</b>	<b>0.9769</b>	<b>0.9532</b>

**Tablo 5.** ZJU veri setinde Gaussian filtre ve kontrast artırma yöntemlerinin etkisi

Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 skor
GF+HE	<b>0.9317</b>	<b>0.9423</b>	0.9000	0.96580	<b>0.9539</b>
GF+UHE	0.9085	0.9073	0.9121	0.96875	0.9370
GF+KG	0.8914	0.8837	<b>0.9146</b>	<b>0.96880</b>	0.9242

ZJU veri setinde MF ve KG birlikte uygulanması, UHE ve HE kullanımına göre daha iyi performans göstermiştir. Ancak elde edilen bulgular, önilemsiz ZJU veri setinden elde edilen performanstan iyi değildir (**Tablo 3**). Bir başka değerlendirme ise GF sonrası, HE, UHE ve KG uygulanmasıdır. ZJU veri seti üzerinde uygulanan GF sonrası HE, UHE ve KG önilemleri sonrası önerilen ESA modelde eğitimler yapılmış ve yapılan performans değerlendirmesi **Tablo 5**'de verilmiştir.



**Tablo 6.** Önerilen ESA modelinin ZJU veri setinde önceki yapılan çalışmalar ile performans karşılaştırması

Çalışma	Yöntem	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Kesinlik	F1 skor
Dong vd. [12]	Haar+DVM	92.74	-	-	-	-
Pauly vd. [15]	HOG+DVM	85.5	<b>95.52</b>	79.26	74.75	-
Pauly vd. [16]	HOG+DVM	85.0	-	-	-	-
Han vd. [17]	DVM+ESA	-	89.7	-	94.4	-
Lee vd. [18]	DVM	<b>95.14</b>	91.7	-	94.4	-
Önerilen Yöntem	HE+ESA	94.32	94.95	<b>92.43</b>	<b>97.41</b>	<b>96.16</b>

ZJU veri setine uygulanan GF ve HE önışlemleri, önerilen ESA modelinde uygulanan diğer önışlemlere göre en iyi performansı göstermiştir. Ancak bu elde edilen performans, ham ZJU veri setinden elde edilen performanstan daha iyi değildir.

Elde edilen bulgular ve yapılan karşılaştırmalar sonucunda ZJU veri setinin HE uygulanmış hali önerilen ESA modelinde en üstün performansı göstermiştir. Önerilen ESA modelinin HE önışlemi ile eğitilmesiyle elde edilen en yüksek performansın, ZJU veri setindeki önceki yapılan çalışmalarla karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6'da yapılan karşılaştırmalar sonucunda, önerilen yöntemimiz özgüllük, kesinlik ve F1 skor performans metriğinde en üstün performans göstermiştir. Ancak doğruluk ve duyarlılık performans metriğinde karşılaştırmada ikinci sırada yer almıştır. Lee vd. [18] çalışması doğruluk metriğinde en üstün performans gösterirken duyarlılık metriğinde önerilen yöntemimizin gerisinde kalmıştır. Pauly vd. [15] çalışması duyarlılık metriğinde en üstün performans göstermişken doğruluk metriğinde önerilen yöntemimizin gerisinde kalmıştır. Diğer çalışmalara bakıldığında özgüllük ve F1 skor metriği çok tercih edilmemiştir. Önerilen ESA modelinin çalışmada kullanılan performans metriklerinde performans değerlendirilmesi Tablo 6'da sunulmuş ve ZJU veri setinde önceki yapılan çalışmalar ile karşılaştırmasında, göz durumu tespiti etkili ve güvenilir sınıflandırma kabiliyeti olduğunu göstermiştir. Göz bölgesinin aydınlatma gibi çevresel faktörlerden etkilendiği açıktır. Bu bağlamda, bu çalışmada görüntü işleme yöntemlerinin önerilen ESA modelinde etkisi incelenerek HE önışleminin performans arttırımana etkisi ortaya çıkartılmıştır. Bir başka açıdan önerilen yöntemde derin öğrenme tabanlı ESA kullanılması, literatürde göz durumu tespitinde son teknoloji yöntemlerin gelişmesine de katkıda bulunacaktır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada göz durumu tespiti için görüntü ön işleme ve derin öğrenmeye dayanan ESA modeli önerilmiş ve ZJU veri setinde test edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda öncelikle ESA modelinde en başarılı havuzlama katmanı değerlendirmesi yapılmış ve ortalama havuzlama en başarılı katmanlardan birisi olmuştur. Göz bölgesinde oluşan aydınlatma problemini ortadan kaldırmak ve görüntü önışlemlerin ESA modelinde etkisini incelemek için ZJU veri setine çeşitli görüntü önışlem yöntemleri uygulanmıştır. ZJU veri setine uygulanan çeşitli önışlem kombinasyonlarının ESA modelinde test edilmesiyle HE en yüksek performansı elde eden önışlem olmuştur. Kontrast iyileştirme yöntemi olan HE'nin önerilen ESA modelinde

etkisini göstermesi, göz durumu tespiti sınıflandırma problemlerinde etkin kullanılabileceğini göstermiştir. Bir sonraki çalışmada, göz durumu veri setinin çeşitlendirilip yeni ESA modellerin oluşturularak performans arttırımının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Göz durumu tespiti üzerine yapılacak çalışmalarda, gözün açık ve kapalı durumlarını içeren çeşitli gerçek dünya senaryolarından görüntüler toplayıp yeni bir veri seti üretilebilir. Bu veri seti üzerinde de yeni geliştirilen metotların doğrulaması gerçekleştirilebilir. Halihazırda ulaşılabilir olan göz durumu veri setleri ile birleştirilerek önerilen yöntemin kapsamlı bir değerlendirmesi yapılabilir. Gerçek dünya senaryosundan alınmış bir video veya bir gerçek zamanlı uygulama üzerinden de göz durumu tespitinin değerlendirilmesi yapılabilir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları tartışılarak literatüre daha etkili ve güvenilir bir yöntem ile katkı sağlanabilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

#### Kaynaklar

- [1] M. H. Yang, D. J. Kriegman and N. Ahuja, Detecting faces in images: A survey. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 24(1), 34-58, 2002. <https://doi.org/10.1109/34.982883>
- [2] T. Soukupova and J. Cech, Eye blink detection using facial landmarks. In 21st computer vision winter workshop, Rimske Toplice, Slovenia, 3-5 February 2006.
- [3] R. Huang, Y. Wang and L. Guo, P-FDCN based eye state analysis for fatigue detection. In 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), pp. 1174-1178, Chongqing, China, 8-11 October 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2018.8599947>
- [4] D. M. Joshi, N.K. Rana and V. Misra, Classification of brain cancer using artificial neural network. In 2010 2nd international conference on electronic computer technology, pp. 112-116, 19-21 March 2010. <https://doi.org/10.1109/ICECTECH.2010.5479975M>
- [5] W. Zhao, R. Chellappa, P.J. Phillips and A. Rosenfeld, Face recognition: A literature survey. ACM computing surveys (CSUR), 35(4), 399-458, 2003. <https://doi.org/10.1145/954339.954342>
- [6] M. Divjak and H. Bischof, Eye Blink Based Fatigue Detection for Prevention of Computer Vision Syndrome. In MVA, pp. 350-353, 2009.

- [7] C. L. Chou, Y. H. Huang and S. C. Ho, Blink Detection Using Facial Landmark Blink Detector and Multi-Layer Perceptron. In NCS 2019, pp. 542-545, 2019.
- [8] M. Lalonde, D. Byrns, L. Gagnon, N. Teasdale and D. Laurendeau, Real-time eye blink detection with GPU-based SIFT tracking. In Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'07), Montreal, Quebec, Canada, pp. 481-487, Montreal, Quebec, Canada, 28-30 May 2007. <https://doi.org/10.1109/CRV.2007.54>
- [9] J. He, W. Choi, Y. Yang, J. Lu, X. Wu and K. Peng, Detection of driver drowsiness using wearable devices: A feasibility study of the proximity sensor. *Applied ergonomics*, 65, 473-480, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.016>
- [10] M. Su, C. Yeh, S. Lin, P. Wang and S. Hou, An implementation of an eye-blink-based communication aid for people with severe disabilities. In 2008 International Conference on Audio, Language and Image Processing, pp. 351-356, Shanghai, China, 7-9 July, 2008. <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2008.4590090>
- [11] S. Soltani and A. Mahnam, A practical efficient human computer interface based on saccadic eye movements for people with disabilities. *Computers in biology and medicine*, 70, 163-173, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2016.01.012>
- [12] Y. Dong, Y. Zhang, J. Yue and Z. Hu, Comparison of random forest, random ferns and support vector machine for eye state classification. *Multimedia Tools and Applications*, 75(19), 11763-11783, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2635-0>
- [13] L. Zhao, Z. Wang, G. Zhang, Y. Qi and X. Wang, Eye state recognition based on deep integrated neural network and transfer learning. *Multimedia Tools and Applications*, 77(15), 19415-19438, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-5380-8>
- [14] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- [15] L. Pauly and D. Sankar, Non intrusive eye blink detection from low resolution images using HOG-SVM classifier. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 8(10), 11, 2016. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2016.10.02>
- [16] L. Pauly and D. Sankar, A novel method for eye tracking and blink detection in video frames. In 2015 IEEE International Conference on Computer Graphics, Vision and Information Security (CGVIS), pp. 252-257, Bhubaneswar, India, 2-3 November 2015. <https://doi.org/10.1109/CGVIS.2015.7449931>
- [17] Y. J. Han, W. Kim and J. S. Park, Efficient eye-blinking detection on smartphones: A hybrid approach based on deep learning. *Mobile Information Systems*, 2018, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6929762>
- [18] W. O. Lee, E. C. Lee and K. R. Park, Blink detection robust to various facial poses. *Journal of neuroscience methods*, 193(2), 356-372, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.08.034>
- [19] Y. S. Wu, T. W. Lee, Q. Z. Wu and H. S. Liu, An eye state recognition method for drowsiness detection. In 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, pp. 1-5, Taipei, Taiwan, 16-19 May 2010. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2010.5493951>
- [20] B. Wu and R. Nevatia, Cluster boosted tree classifier for multi-view, multi-pose object detection. In 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, pp. 1-8, Rio de Janeiro, Brazil, 14-21 October 2007. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2007.4409006>
- [21] L. Cadena, A. Zotin, F. Cadena, A. Korneeva, A. Legalov and B. Morales, Noise reduction techniques for processing of medical images. In Proceedings of the World Congress on Engineering Vol. 1, pp. 5-9, London, U.K., 5-7 July, 2017.
- [22] C. Saravanan, Color image to grayscale image conversion. In 2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications Vol. 2, pp. 196-199, Bali Island, 19-21 March 2010. <https://doi.org/10.1109/ICCEA.2010.192>
- [23] C. Munteanu and V. Lazarescu, Evolutionary contrast stretching and detail enhancement of satellite images. In Proc. Mendel Vol. 99, pp. 94-99, 1999.
- [24] M. Abdullah-Al-Wadud, M. H. Kabir, M. A. A. Dewan and O. Chae, A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 53(2), 593-600, 2007.
- [25] S. M. Pizer, E. P. Amburn, J. D. Austin, R. Cromartie, A. Geselowitz, T. Greer and K. Zuiderveld, Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer vision, graphics, and image processing*, 39(3), 355-368, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
- [26] G. Deng and L. W. Cahill, An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection. In 1993 IEEE conference record nuclear science symposium and medical imaging conference, pp. 1615-1619, San Francisco, CA, USA, 31 Oct-6 Nov 1993. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.1993.373563>
- [27] T. Chen, K. K. Ma and L. H. Chen, Tri-state median filter for image denoising. *IEEE Transactions on Image processing*, 8(12), 1834-1838, 1999.
- [28] Y. Guo, Y. Liu, A. Oerlemans, S. Lao, S. Wu and M.S. Lew, Deep learning for visual understanding: A review. *Neurocomputing*, 187, 27-48, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.09.116>
- [29] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville, Deep learning. MIT press, London, England, 2016.
- [30] V. Suárez-Paniagua and I. Segura-Bedmar, Evaluation of pooling operations in convolutional architectures for drug-drug interaction extraction. *BMC bioinformatics*, 19(8), 39-47, 2018. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2195-1>





# İmar uygulamalarında dağıtımın veri madenciliği yöntemi kullanılarak yapılması

## Distribution in zoning practices using data mining method

İbrahim Karaaslan<sup>1</sup> , Nuh Azgınoğlu<sup>2\*</sup> , Murat Taşyürek<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Kayseri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hesaplamalı Bilimler ve Mühendislik Anabilim Dalı, Kayseri, Türkiye

<sup>2,3</sup> Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

### Öz

Şehirlerin plansız büyümeleri zamanla çarpık şehirleşme sorununu da beraberinde getirmiştir. Düzenli bir şehir modeli oluşturmak için belediyelerce, mevcut haliyle düzensiz kadastro parselleri bulunan alanların düzenli parseller haline getirilmesi gerekmektedir, bu ise imar düzenlemeleriyle mümkün olmaktadır. Şehirleşmelerde insanlar daha büyük topluluklar haline gelmeye başladığında ortaya çıkan sosyal yaşantı alanlarının oluşturulması problemi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi 3194 Sayılı İmar Kanunu'nun 18. Maddesi uygulamasıdır. Bu uygulama daha düzenli şehirleşmeye geçmek için belediyeler tarafından resen yapılmakta olup, dağıtım işleminde kadastro parselinin hangi imar parseline verileceği manuel olarak yapılmaktadır. Bu durum hem uygulamanın yapılma süresini uzatmakta hem de yeni verilen parsellerde ortak sayısının optimumdan uzak gerçekleşmesine yol açmaktadır. Çalışma kapsamında ele alınan ve karakteristik olarak bir kümeleme problemi olan dağıtım problemine mekânsal veri madenciliği kapsamında kümeleme yöntemlerinden olan K-means ve Adaptif K-means algoritmalarıyla çözüm aranmış, 12 adet kadastro parsel alanının 6 adet imar parseline dağıtım gerçekleştirilmiştir. Deneysel değerlendirmeler sonucunda Klasik K-means yönteminde parsellerde dağıtılamayan minimum alan 435 km<sup>2</sup> iken Adaptif K-means yönteminde bu oran 23 km<sup>2</sup>'ye kadar düşmüş olup, genel değerlendirmede de yine Adaptif K-means yöntemi öne çıkmıştır.

**Anahtar kelimeler:** K-means, Adaptif K-means, İmar uygulamaları, Düzenleme Ortaklık Payı (DOP)

### 1 Giriş

Yerleşik hayata geçilmesiyle birlikte insanların şehirleşme ve barınma ihtiyaçları giderek artmıştır. Geçen zaman içerisinde arsa ve konut üzerine olan problemler de gün geçtikçe büyümeye devam etmiştir. Düzenli bir şehir modeli oluşturmak için, belediyelerce vatandaşların düzensiz yapılaşma yapmadan önce tedbir alarak düzenli parseller oluşturması gerekmektedir. Kentlerdeki hızlı nüfus artışından dolayı çarpık yapılaşma önlenememektedir. Belediyeler yetkilerinde olan uygulama sahalarındaki kamu hizmetlerine ayrılan yol, park, cami, okul vb. sosyal alanları

### Abstract

The unplanned growth of cities has brought about unplanned urbanization over time. To generate a regular city model, municipalities need to transform the areas with irregular cadastral parcels into standard parcels, which is possible with zoning regulations. One of the methods used to generate social life areas that arise when people start to become larger communities in urbanization is the application of Article 18 of the Zoning Law No. 3194. The municipalities make this application ex officio to switch to more regular urbanization. The zoning parcels the cadastral parcel will be given in the distribution process is done manually. This situation prolongs the implementation period and causes the number of partners to be far from the optimum in the newly assigned parcels. A solution has been sought for the distribution problem, clustering problem characteristically, which is considered within the scope of the study, with K-means and Adaptive K-means Algorithms, which are clustering method within the scope of spatial data mining. Twelve cadastral parcel areas were distributed to 6 zoning parcels. As a result of the experimental evaluations, it was seen that the Adaptive K-means algorithm was more successful. As a result of the experimental assessment, while the minimum area that cannot be distributed in the parcels was 435 km<sup>2</sup> in the Classical K-means method, this ratio decreased to 23 km<sup>2</sup> in the Adaptive K-means method, and the Adaptive K-means method came to the fore in the general evaluation.

**Keywords:** K-means, Adaptif K-means, Zoning practices, Development readjustment share

vatandaşların kullanımına kazandırmak, mevcut haliyle düzensiz kadastro parselleri bulunan bu alanları düzenli parseller haline getirebilmek için imar düzenlemeleri yapmak zorundadır.

Şehirleşmelerde insanlar daha büyük topluluklar haline gelmeye başladığında ortaya çıkan sosyal yaşantı alanlarının oluşturulması problemi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi olan 3194 Sayılı İmar Kanunu'nun 18. Maddesi uygulaması (metnin sonraki kısımlarında 18. Madde uygulaması olarak geçecektir) daha düzenli şehirleşmeye geçmek için belediyeler tarafından resen yapılan bir uygulamadır.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nuhazginoglu@kayseri.edu.tr (N. Azgınoğlu)  
Geliş / Received: 12.03.2022 Kabul / Accepted: 18.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1086170

18. Madde uygulaması yapılırken uygulamaya giren parsellerden eşit miktarda kesinti yapılmaktadır ve bu kesinti Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) olarak ifade edilmektedir. DOP kesintisi uygulama yapılan bölgedeki kamunun hizmetlerine ayrılan sosyal alanları ortaya çıkartmak için kullanılmaktadır [1]. İmar düzenlemelerinin uzun ve meşakkatli bir işlem olması, belediyelerdeki maddi imkânsızlıklar ve yetersiz personel sayısı gibi konular sebebiyle bu konuda halen sorunlar yaşanmaktadır [2]. Yaşanan bu problemler belediyelerin imar düzenlemesi yapması önünde engel teşkil etmekte ve kamulaştırmasız el atma davalarını tetiklemektedir [3].

Belediyelerin imar düzenlemelerini daha hızlı ve daha az maliyetle yapabilmesi durumunda ise mevcut problemler azalacaktır. Bu kapsamda Güngör ve arkadaşları 18. Madde uygulamasında dağıtım işlemini değerlendirme yöntemi kullanarak yapmışlardır [4]. Atasoy ve arkadaşları 18. Maddesi uygulamasının hukuka yansıyan kısmına odaklanmışlar ve mahkemeler tarafından iptal sürecini incelemişlerdir [5]. Alifendioğlu ve Duman çevreyollarının 18. Madde uygulamasıyla açılması konusunu üzerine çalışmışlardır [6]. Alp 18. Madde uygulamasında Van örneği ile karşılaşılan sorunları tartışmıştır [7]. Dolayısıyla 18. Madde uygulamasının geçmişten bu yana tartışılan ve çözülemeyen kısımlarının olduğunu söyleyebiliriz.

18. Madde uygulaması kapsamında karşılaşılan problemlerden bir tanesi de dağıtım sırasında ortaya çıkmaktadır. Sıklıkla karşılaşılan mevcut kadaströ parsellerinin yeni oluşacak imar parsellerinden hangisinin içerisinde yer alacağı problemi karakteristik olarak incelendiğinde, bu problemin bir kümeleme problemi olduğunu söyleyebiliriz. Bu kapsamda literatürdeki kümeleme problemlerine çözüm bulmak amacıyla sunulan çalışma ve yöntemler incelenmiştir. Anderson, trafik kazalarının daha fazla olduğu yerlerin belirlenmesi sağlamak için coğrafi bilgi sistemlerini ve veri madenciliği tabanlı K-means algoritmasını kullanmıştır [8]. Selvi ve arkadaşları çok değişkenli haritalama yapabilmek için K-means algoritmalarının yararlanmışlardır [9]. Niu ve arkadaşları adalardaki elektrik enerjisi problemini çözmek için hiyerarşik kümeleme ve K-means kümeleme algoritmasından yararlanmışlardır [10]. Doroshenko İtalyada'daki Covid-19 vakalarının sınıflandırılmasında hiyerarşik kümeleme ve K-means algoritmasını kullanmıştır [11]. Li ve Xing canlı hayvanları insansız hava aracı ile izlemek için K-means algoritmasından yararlanmışlardır [12].

Bu çalışma kapsamında mevcut kadaströ parsellerinin yeni oluşacak imar parsellerinden hangisinin içerisinde yer alacağını tespiti problemine, yaptığımız araştırma ve ön çalışmalar neticesinde, problemin karakteristiğine uygun yöntemlerden olan veri madenciliği tabanlı K-means [13] ve Adaptif K-means kümeleme yöntemleri ile çözüm aranmıştır. Çalışma kapsamında mevcut literatürde klasik yöntem olarak manuel çözümlenen probleme daha hızlı ve başarılı olan otomatize yöntemler üretilmiştir. Çalışma bu yönüyle literatüre katkıda bulunmaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar Adaptif K-means yönteminin daha etkin bir çözüm ürettiğini göstermiştir.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Problem

3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. Maddesi uyarınca, arsa ve arazi düzenlemesi, ilgili yönetmeliklerde yer verilen esaslara göre yapılmaktadır. Bu uygulamadaki asıl amaç çarpık kentleşme sonucu oluşan düzensiz parselleri ve bu parseller üzerine yapılan eski yapıları daha düzenli hale getirip yeni yapılar için düzenli imar parselleri oluşturmaktır. 18. Madde uygulaması yapılabilmesi için öncelikle düzenleme sınırının belirlenmesi gerekmektedir. Düzenleme sınırı belirlenirken düzenleme sınırı içerisindeki kadaströ parsellerinden kesilecek DOP oranının %45 oranını geçmemesi gerekmektedir.

18. madde uygulaması gereği, dağıtım yapılacak kadaströ parsellerinin ne kadarlık bir alanın dağıtımında kullanılacağını tespit edilmesi gerekir. Dağıtımda kullanılacak kadaströ parselleri alanının tespit edilebilmesi için önce kamuya ayrılan alan (KAA) hesaplanır. KAA, düzenleme sınırı içerisindeki kadaströ parsellerinin alanları toplamının, düzenleme sınırı içerisindeki imar parsellerinin alanları toplamından çıkarılması ile bulunur. Kamuya ayrılan alanın, kadaströ parselleri alanına bölünmesiyle düzenleme sınırı içerisindeki DOP oranı hesaplanmış olur. DOP hesaplaması neticesinde uygulamaya giren bütün kadaströ parsellerinden hesaplanan oranda kesinti yapılır. Sonraki aşamada kadaströ parsellerinin yeni oluşacak imar parsellerine dağıtım işlemi gerçekleştirilir. Dağıtım işleminde öncelik kadaströ parsellerinin bastığı yer veya bu yerin en yakınıdır.

Dağıtım işleminin manuel olarak yapılması ve uygulamayı gerçekleştiren kişiye göre farklılık göstermesi sürecin yavaşlamasına ve aksamasına neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı dağıtımın hesaplama tabanlı otomatize edilmiş bir süreç içerisinde çözülmesi gerekmektedir. Böylelikle hem ideale yakın adaletli bir çözüm sunulabilirken hem de zamanlama maliyeti de düşürülecektir. Bu durum göz önünde bulundurularak çalışma kapsamında dağıtım işleminin, veri madenciliği tabanlı K-means ve Adaptif K-means yöntemleri ile hızlı ve en az ortaklık şeklinde çözülmesi planlanmıştır.

### 2.2 Veri ve ön işlem

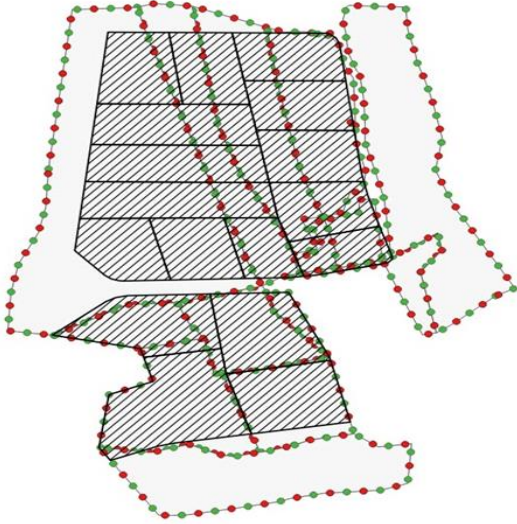
Bu çalışma kapsamında Kayseri İli, Melikgazi İlçesi, Erenköy Mahallesi'nde bulunan kadaströ ve imar parsellerinin verileri kullanılmıştır. Belirtilen bölgede 18 adet kadaströ parseli ve 18 adet imar parseli bulunmaktadır. Kadaströ parsellerinden 3 tanesi imar adasına basan kısımları olmak üzere kısmen kullanılmıştır. Uygulama yapılan bölgenin uydu görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir.

Uygulamada ilk olarak uygulamaya dâhil olan kadaströ parselleri alanları toplamı (K) hesaplanmıştır. Alanlar hesaplanırken uygulamaya kısmen dâhil olan kadaströ parsellerinin uygulamaya giren kısımlarının toplam alanları alınmıştır. Belediye ve yoldan ihdas edilen alanların bağışlanan kısımları çıkartılarak bulunan alan toplamı 36.652,69 m<sup>2</sup>'dir. İmar parselleri alanları toplamı ise 28.685,62 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Uygulama yapılan bölgenin uydu görüntüsü

Kamuya ayrılan alan (KAA) miktarı ise toplam kadastro parsel alanının, toplam imar parsel alanından farkı alınarak tespit edilmiştir. Hesaplanan KAA miktarı  $7.967,07 \text{ m}^2$ 'dir. Düzenleme ortaklık payı oranını (DOPO), KAA miktarının toplam kadastro parsel alanına bölünmesiyle  $0,217366$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Uygulama yapılan bölgedeki kadastro ve imar parsellerinin durumu

DOPO değeri hesaplandıktan sonra bu oran ile uygulamaya giren kadastro parsellerinin alanları çarpılarak yapılacak olan kesinti miktarları belirlenmiştir. Böylelikle kesinti sonrasında mevcut imar parsellerine dağıtılacak olan kadastro parsellerinin alanları hesaplanmış olur. Kesinti sonrasında imar parsellerine dağıtılacak olan kadastro parseli alanlarının hesabı için öncelikle DOPO değerinin 1'den farkı alınmış ( $1-0.217366$ ) ardından elde edilen  $0.7826334$  değeri, kadastro parsel alanları ile çarpılmıştır. Veriler bu haliyle ön

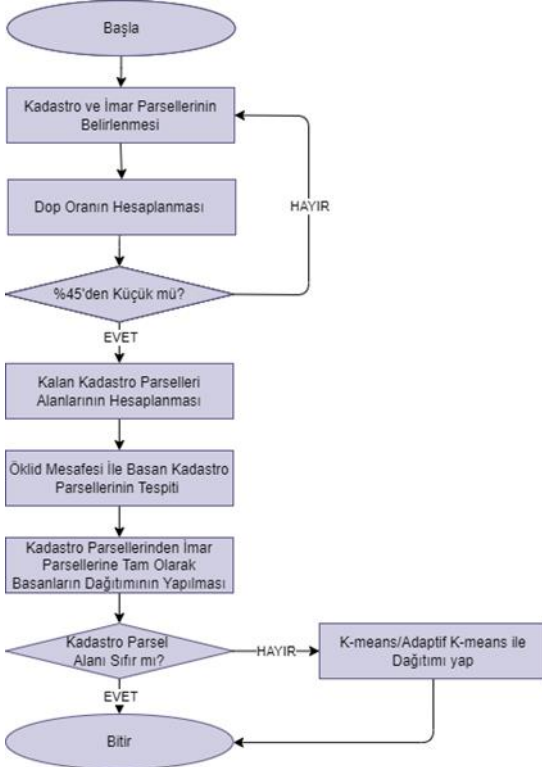
işlemden geçirilmiş olup veri madenciliği tabanlı kümeleme algoritması olan K-means yöntemlerinde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Şekil 2'de kadastro ve imar parsellerinin durumları gösterilmektedir.

### 2.3 Yöntemler

Kadastro parsellerinden DOP kesintisi yapıldıktan sonra kalan alanların imar parsellerine dağıtımının, arsa ve arazi düzenlemeleri hakkındaki yönetmelikte belirtilen kurallar çerçevesinde yapılması için öncelikle, kadastro parsellerinin üzerinde buldukları imar parsellerinin tespiti K-means algoritması kullanılarak tespit edilmiştir. Bu işlem sırasında kadastro parsellerinin üzerinde buldukları imar parselleri Öklid mesafesi [14] kullanılarak hesaplanmıştır. Bir sonraki aşamada imar parseline tek bir kadastro parseli basan parseller, bastıkları imar parselinin alanlarını tamamen kapatacak şekilde dâhil edilmiştir. Tam olarak basmayanlar da ise kadastro parsellerinin kalan alanlarını imar parsellerinden kalan alanların hiç boşta alan kalmayana dek, en yakın imar parseline ve en az ortaklık şeklinde dağıtılması için K-means ve Adaptif K-means algoritmaları kullanılmıştır. Her iki yöntem için de kullanılmış olan akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.

#### 2.3.1 K-means algoritması

K-means kümeleme algoritması  $n$  adet veri içeren veri grubundan, benzer özelliklere sahip verileri aynı gruba dâhil ederek  $k$  adet kümeyi oluşturan kümeleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır [15]. Bu yöntemde etiketleri belli olmayan verilerin hangi sınıfa dâhil olacağı, küme içi benzerliğin maksimum, kümeler arası benzerliğin ise minimum olacak şekilde kümelemesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemde temel olarak benzer özellik gösteren veriler kendi aralarında gruplara ayrılmış olur [16]. K-means yönteminde küme sayısı araştırmacının önbilgisine ve tecrübesine bağlı olarak belirlenmektedir [17].



Şekil 3. Uygulama işlem adımları

Bu yöntemde öncelikle küme merkezleri rastgele seçilir. Ardından veri kümesinde bulunan bütün veriler için küme merkezlerine olan uzaklık hesaplanır ve belirli bir mesafe değeri kullanılarak her bir iterasyon için güncellenir. Küme merkezleri sabit kalana dek bu işlem devam eder [18]. Klasik K-means algoritması Öklid mesafesini kullanmaktadır. Klasik K-means algoritmasında mesafe kadastro parseli ile imar parselinin birbirine en yakın olan iki nokta arasındaki mesafe olarak belirlenmiştir. K-means kümeleme algoritmasının işlem adımlarını içeren sözde kodu **Algoritma 1**'de verilmiştir [19].

### 2.3.2 Adaptif K-means

K-means algoritması, kümeleme işlemlerinde genel olarak başarılı bir algoritma olması ve bu algoritmanın geniş bir kullanım yelpazesi olmasına rağmen özel durumlar içeren veri kümelerinde zaman zaman yeterince başarılı sonuçlar üretmediği görülmüştür. Bu sorunun üstesinden gelmek ve veri kümesinde gruplama işleminde farklı özelliklerin dikkate alınması için Adaptif K-means algoritmaları geliştirilmiştir. Problem türlerine özel farklı Adaptif K-means algoritması mevcut iken, bu çalışmada Sahu ve diğerleri [20] tarafından önerilen parametre tabanlı Adaptif K-means yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, klasik K-means yönteminde olduğu gibi veri kümesinde bulunan veriler daha önceden belirlenmiş olan  $k$  adet küme oluşturur ve veriler arasındaki benzerlik oranı mesafeye göre hesaplanmaktadır. Ancak buradaki mesafe veriye göre değişebildiğinden dolayı adaptiflik özelliği kazanmıştır. Adaptif K-means yöntemindeki mesafe hesabı veri kümesine

bağlı olarak değişmekte, dolayısıyla veri kümesine göre özel mesafe ayarlanması gerekmektedir.

#### Giriler:

$k$ : küme sayısı

$D = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ :  $n$  sayıda ögesi olan bir veri grubu

#### Algoritma:

Adım 1:  $D$  veri grubundan başlangıçta belirtilen kümeler için başlangıç ortalama değerlerini  $m_1, m_2, \dots, m_k$  olarak tanımla.

Adım 2: Her bir  $t_i$  ögesini en yakın olduğu  $m_j$ 'ni kümesine ata.

Adım 3: Kümelere ait  $m$  değerlerini yeniden hesapla.

Adım 4: EĞER  $m$  değerlerinde değişiklik var ise

Adım 1'e git

Yok ise

Algoritmayı durdur

#### Algoritma 1. K-means algoritma sözde kodu

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen 18. madde uygulaması kapsamındaki yönetmelikler gereği, dağıtım işleminde mesafe hesabının belirli kurallara göre yapılması gerekmektedir. Bu nedenle Adaptif K-means algoritması parsel dağıtım problemine uygulandığında mesafe hesabı için aşağıda sunulan özelliklerin sağlanması gerekmektedir.

- Bir kadastro parselinin imar parselinin tamamını kapsamaması durumunda ilgili kadastro parseli imar parseline ortak olmalıdır. Bu nedenle K-means algoritmasında bu iki nesnenin arasındaki mesafe sıfır olarak alınmaktadır. Bu işlem sayesinde kümeleme işleminde aynı kümede bulunması sağlanacaktır.
- Bir kadastro parseli imar parselinin içerisinde ise (imar parseli kadastro parselini kapsıyor ise) ilgili kadastro parseli, imar parseline kesinlikle ortak olacaktır. Bu nedenle imar parseli ile kadastro parseli arasındaki mesafe kadastro parsel alanının imar parsel alanına oranı olmalıdır. Bu işlem sayesinde kümeleme işleminde imar parseli ile kadastro parseli aynı kümede yer alacaktır.
- İmar parseli ile kadastro parseli arasında mekânsal bir etkileşim (ortak alanların bulunması) durumunda kadastro parselinin imar parseline ortak olması tercih edilmektedir. Bu nedenle imar parseli ile kadastro parseli arasındaki mesafe iki parsel arasındaki mesafenin farkı alınarak tespit edilir. Bu işlem sayesinde mesafe yakın olduğundan imar parseli ve kadastro parselinin aynı kümede bulunma ihtimali artırılmaktadır.
- İmar parseli ve kadastro parseli arasında herhangi bir ilişki yok ise bu durumda parsellerin dağıtım esnasında en yakın imar parseline ortak olması gerekmektedir. Bu nedenle imar parsel ve kadastro parseli arasındaki mesafe ağırlık merkezlerinin birbirine olan uzaklığı seçilmiştir. Bu işlem

sayesinde K-means algoritmasında kadastro parseli en yakın imar parseline ortak olacaktır.

Yukarıda sunulan maddeler incelendiğinde Adaptif K-means yönteminde klasik K-means yönteminden farklı olarak (K-means yönteminde tek bir mesafe dikkate alınmaktaydı) imar parseli ve kadastro parseli arasında dört farklı mesafe hesabı çıkmaktadır. Adaptif K-means yönteminde kullanılan parametre sayısının daha fazla olmasının başarı oranına etkisini ölçmek amacıyla çalışmaya bu yöntem de dâhil edilmiştir.

### 3 Bulgular

Bu çalışma kullanılan gerçek veri kümesinde yapılan ön işlemler sonucunda 12 adet kadastro parseli ve 6 adet imar parseli kullanılmıştır. K-means algoritmasında küme sayısı daha önce de açıklandığı üzere başlangıçta belirlenmelidir. Çalışma kapsamında alanları eksik kalan ve dağıtım yapılması gereken 6 adet imar parseli olduğu için her iki yöntem için de küme sayısı 6 olarak belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle mevcut 12 adet kadastro parsel alanının hiç boşluk kalmayacak şekilde 6 adet imar parseline dağıtım planlanmıştır. İmar parsellerinin mevcut durumları ve kadastro parsellerinin DOP kesintisinden sonraki ve dağıtımdan önceki durumları Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere toplam imar parseli alanı, toplam kadastro parsel alanına eşit olup her ikisinin değeri 4210 m<sup>2</sup>’dir.

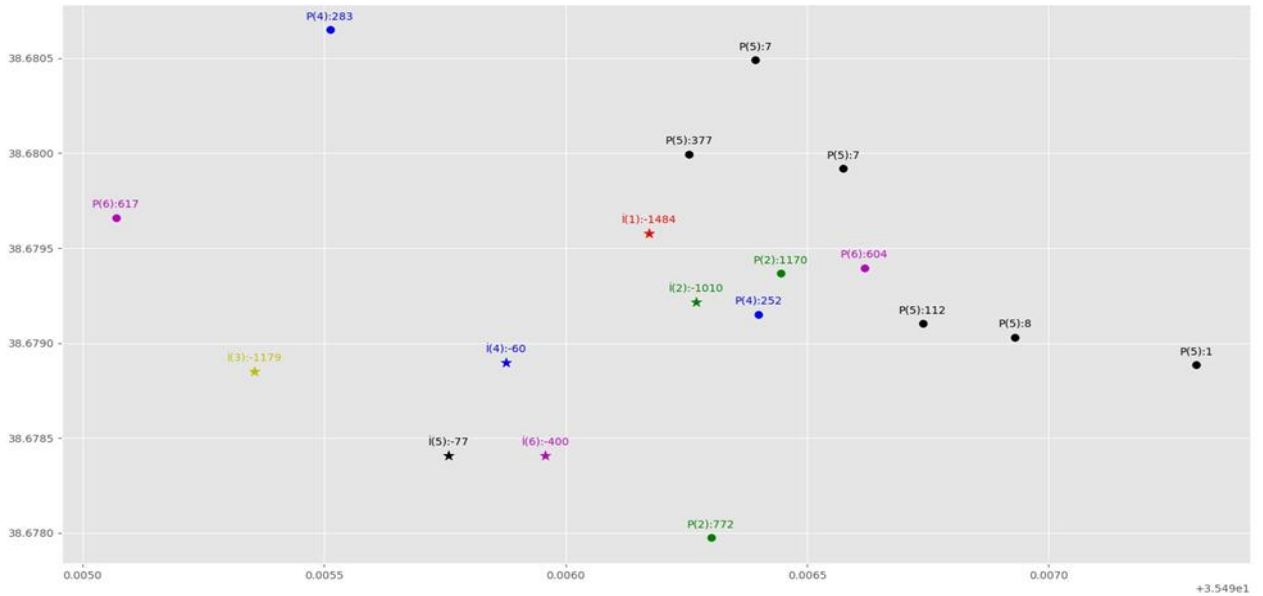
Deneyisel değerlendirmelerde yöntemlerin başarımlarını değerlendirmek üzere küme içerisinde kalan imar parseli ve kadastro parsellerinin alanlarının örtüşmesi irdelenmiştir.

**Tablo 1.** Kadastro ve imar parselleri alanları

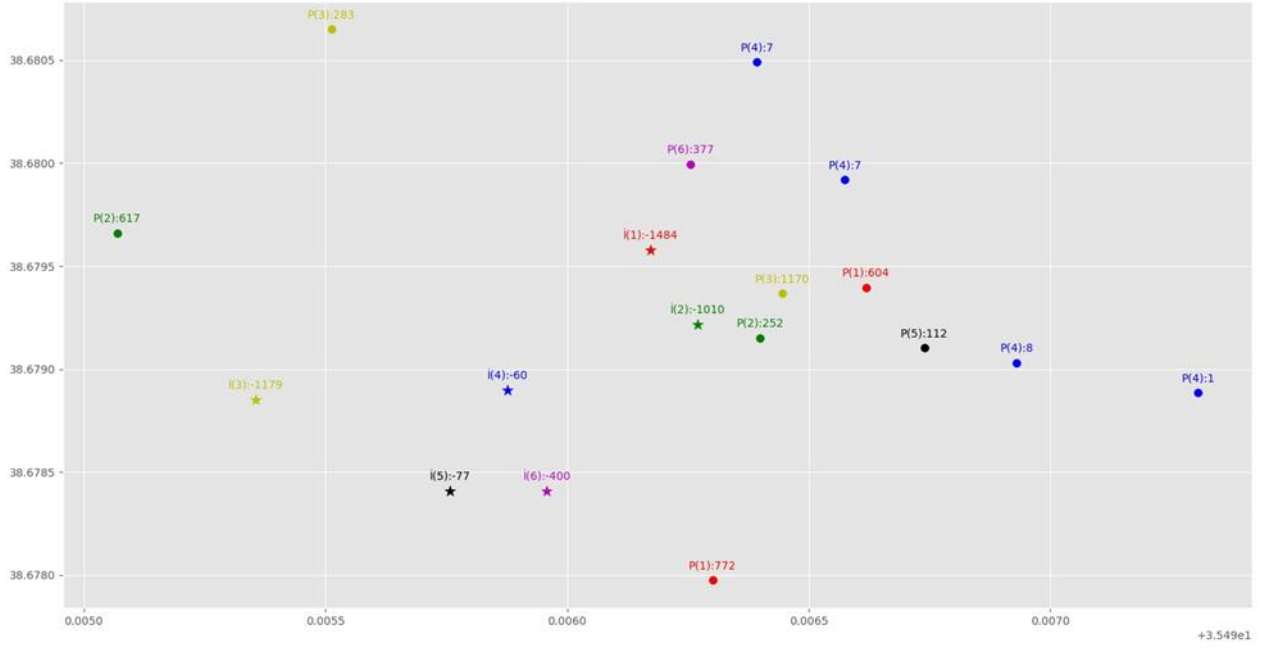
Veri ID	Parsel ID	Parsel Türü	Parsel Alanı (m <sup>2</sup> )
1	6	İmar Parseli	1484
2	7	İmar Parseli	1010
3	14	İmar Parseli	1179
4	15	İmar Parseli	60
5	16	İmar Parseli	77
6	17	İmar Parseli	400
7	20	Kadaastro Parseli	377
8	40	Kadaastro Parseli	252
9	50	Kadaastro Parseli	283
10	60	Kadaastro Parseli	7
11	70	Kadaastro Parseli	617
12	90	Kadaastro Parseli	604
13	100	Kadaastro Parseli	112
14	120	Kadaastro Parseli	1170
15	130	Kadaastro Parseli	7
16	150	Kadaastro Parseli	772
17	160	Kadaastro Parseli	8
18	170	Kadaastro Parseli	1

K-means ve Adaptif K-means algoritması ile parsel dağıtım işlemi sonucunda her kümede bulunan imar parselinin ve kadastro parselin alanlarının farkı alındığında sonucun sıfır olması amaçlanmaktadır.

K-means ve Adaptif K-means yöntemlerinin oluşturduğu küme dağılımı sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5’te sunulmuştur. İlgili şekillerde X-ekseni çalışma alanının boylam bilgisini, Y-ekseni ise enlem bilgisini sunmaktadır. Verilen şekillerde küme merkezleri “★” ile ifade edilirken, kümeler renklendirilmiş ve numaralandırılmıştır. Aynı kümede olan noktalar aynı renklere sahiptir ve aynı kümede olan noktaların küme numarası da aynıdır. Şekilde sunulan görüntüde Kadaastro parseli “P” ile İmar parseli “İ” ile ifade



**Şekil 4.** K-means ile kümeleme sonuçları



Şekil 5. Adaptif K-means ile kümeleme sonuçları

edilmiştir. Şekilde “:” ifadesinden sonra gelen değerler ise parselin alanını göstermektedir. Eksi değerler ise dağıtım yapılması gereken alanı ifade etmektedir.

Şekil 4 ve Şekil 5'te kümeleme sonuçları sunulan yöntemlerin başarımları sonuçları Tablo 2 ve Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 2'de görülen pozitif değerler ilgili kümede dağıtılması gereken fazlalığı, negatif değerler ise kümedeki boş alanları ifade etmektedir. Sonuçlarda ölçü birimi olarak  $\text{km}^2$  kullanılmıştır. Fazlalığa sahip olan kümeler, boş alanı kalan kümelere dağıtılmalıdır. Tablolardan görüldüğü üzere K-means ile yapılan dağıtım işleminde dağıtılmayan alan miktarları Adaptif K-means ile yapılan dağıtım işlemine göre oldukça fazladır. Tablolar, Adaptif K-means ile yapılan dağıtım işleminin daha başarılı olduğunu sayısal olarak ortaya koymuş olup Şekil 6'da yöntemlerin başarımlarının görsel yansıması da görülmektedir.

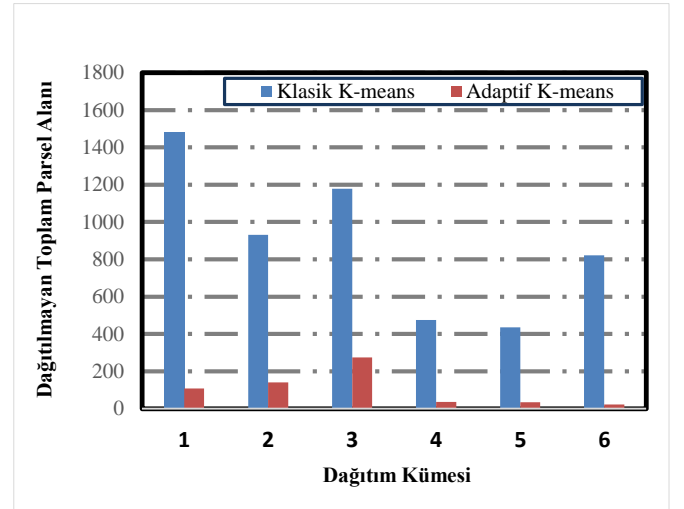
Tablo 2. Kümeleme işlemi sonucunda kalan parsel alanları

Küme ID	Klasik K-means	Adaptif K-means
1	-1484	-108
2	932	-141
3	-1179	274
4	475	-37
5	435	35
6	821	-23
Toplam	0	0

#### 4 Tartışma ve sonuç

Bu çalışma kapsamında 3194 Sayılı İmar Kanunu'nun 18. Maddesi uygulaması kapsamında kadaströ parsellerinin yeni oluşacak imar parsellerinden hangisinin içerisinde yer alacağını tespiti problemine çözüm aranmıştır. Yapılan çalışmada bir kadaströ parseli aynı anda iki imar parseline basıyorsa sadece birine dâhil edilmektedir. Bunun yerine kadaströ parseli bölünmesi gereken parçaya bölünerek olması gereken imar parsellerine dağıtılmalıdır. Karakteristik olarak bir kümeleme problemi olan bu problem

çözümünde daha önce kullanılmamış olan veri madenciliği tabanlı K-means ve Adaptif K-means yöntemleri denenmiştir.



Şekil 6. Dağıtılamayan Parsel Alanları

Kayseri İli, Melikgazi İlçesi, Erenköy Mahallesi'nde bulunan kadaströ ve imar parsellerinin bulunduğu veri kümesinin kullandığı bu çalışmada, elde kalan dağıtılamamış kadaströ parsellerinin altı adet imar parseline dağıtım sonucunda kalan alan miktarları K-means kümeleme yönteminde Adaptif K-means kümeleme yöntemine göre daha fazla alan kalmış ve dolayısıyla deneysel değerlendirmelerde Adaptif K-means yöntemi klasik K-means yöntemine göre daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Çalışma daha önce manuel olarak çözümlenmeye çalışılan ve insan faktöründen etkilenen bu probleme, klasik yöntemlere göre daha başarılı olan otomatize bir yöntem



önermekte ve bu özelliğiyle özgünlük taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda bir imar parselin ortaklık dağılımı için farklı veri madenciliği yöntemleri ile beraber optimizasyon algoritmaları kullanılarak minimum ortak sayısının bulunması planlanmaktadır.

#### Teşekkür

İlçe sınırları içerisinde bulunan parsel ve imar planı verilerini paylaştığı için Melikgazi Belediyesi'ne teşekkürü bir borç biliriz.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %11

#### Kaynaklar

- [1] M. Yılmaz, İmar kanunu'nun 18. maddesi çerçevesinde düzenleme ortaklık payı kavramı ve uygulamaları. Marmara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuk Araştırmaları Dergisi, 16 (3-4), 37-83, 2010.
- [2] S. Erdoğan, ve C. Ergen, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uygulamalarının yasal dayanakları yönünden incelenmesi, Mevzuat Dergisi, 8-93, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000031](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000031)
- [3] A. Uysal, Kamulaştırmaz el atma halinde açılabilir davalar, Taraf Ehliyetleri ve Nitelikleri. İstanbul Medipol Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi, 2(1), 199-216, 2015.
- [4] R. Güngör ve İ. Şaban, İmar uygulamalarında farklı dağıtım metodlarının karşılaştırılması. Geomatik, 4(3), 254-263, 2019. <https://doi.org/10.29128/geomatik.548592>
- [5] M. Atasoy, O. Demir, B. Uzun, ve R. Nişancı, İmar uygulamalarının iptal nedenleri ve öneriler. Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, sayfa 184-192, Konya, Türkiye, 16-18 Ekim 2002.
- [6] Y. Aliefendioğlu, ve İ. Duman, Çevre yollarının 3194 sayılı imar kanununun 18. madde uygulamaları ile açılmasının teorik ilkeler ve uygulama yönlerinden tartışılması: Van ili örneği. Türkiye Sosyal Araştırmalar Dergisi, 25(2), 407-424, 2021.
- [7] E. Alp, 3194 Sayılı İmar Kanunu 18. Madde İmar Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar: Van Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [8] T. K. Anderson, Kernel density estimation and k-means clustering to profile road accident hotspots. Accident Analysis & Prevention, 41(3), 359-364, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.12.014>
- [9] H. Z. Selvi ve B. Çağlar, Çok değişkenli haritalama için kümeleme yöntemlerinin kullanılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(2), 415-429, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341267>
- [10] G. Niu, Y. Ji, Z. Zhang, W. Wang, J. Chen, and P. Yu, Clustering analysis of typical scenarios of island power supply system by using cohesive hierarchical clustering based k-means clustering method. Energy Reports, 7, 250-256, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.049>
- [11] A. Doroshenko, Analysis of the distribution of COVID-19 in Italy using clustering algorithms. In 2020 IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing, pp. 325-328, Lviv, Ukraine, 2020. <https://doi.org/10.1109/DSMP47368.2020.9204202>
- [12] X. Li, and L. Xing, Use of unmanned aerial vehicles for livestock monitoring based on streaming k-means clustering. Ifac-Papersonline, 52(30), 324-329, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.560>
- [13] A. Likas, N. Vlassis, and J. J. Verbeek, The global k-means clustering algorithm. Pattern Recognition, 36(2), 451-461, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(02)00060-2)
- [14] M. Takaoğlu ve F. Takaoğlu, K-means ve hiyerarşik kümeleme algoritmanın weka ve matlab platformlarında karşılaştırılması. İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi, 11(3), 303-317, 2019.
- [15] K. P. Sinaga and M. S. Yang, Unsupervised K-means clustering algorithm. IEEE Access, 8, 80716-80727, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988796>
- [16] B. Çolak, Z. Durdağ ve P. Edoğmuş, K-means algoritması ile otomatik kümeleme. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2), 2016. <https://doi.org/10.31202/ecjse.264195>
- [17] K. Tian, J. Li, J. Zeng, A. Evans and L. Zhang, Segmentation of tomato leaf images based on adaptive clustering number of k-means algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 165, 104962, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104962>
- [18] M. A. Syakur, B. K. Khotimah, E. M. S. Rochman and B. D. Satoto, Integration K-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 336, No. 1, p. 012017). IOP Publishing. (2018, April). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/336/1/012017>
- [19] J. Han, J. G. Lee and M. Kamber, An overview of clustering methods in geographic data analysis. geographic data mining and knowledge discovery, 2, 149-170, Taylor and Francis, Abingdon, 2009.
- [20] M. Sahu, K. Parvathi, and M. V. Krishna, Parametric comparison of k-means and adaptive k-means clustering performance on different images. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 7(2), 810, 2017.





# SURF ve MSER kombinasyonu ile kopya taşı sahteciliği algılama

## Copy move forgery detection with SURF and MSER combination

Yıldız Aydın<sup>1</sup> , Funda Akar<sup>2\*</sup> 

<sup>1,2</sup> Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 24100, Erzincan, Türkiye

### Abstract

Because digital images may contain a variety of data, they are regarded as an important source for information sharing. Also, images are widely used as evidence in a variety of real-life cases. The rapid rise in popularity of digital photographs is due to the improvement of technologies. Several software programs have been developed in recent years to modify digital images, such as Photoshop and Corel Photo, however these programs are now being used extensively for forgery. Because of technological advancements, it is difficult for people to recognize faked images with their naked eyes. Therefore, in this study, the features used in forgery detection problems are combined to ensure accurate labeling of even forgery images that are difficult to detect. Stronger feature is obtained by combining Speeded-Up Robust Features (SURF) and Maximally Stable Extremal Regions (MSER). Considering the experimental results; it has been observed that the use of the proposed method, which is obtained as a result of combining the two methods in copy-move forgery detection problems, is more successful than using the SURF and MSER features separately.

**Keywords:** Copy-move forgery detection, SURF, MSER, Image forensics

### 1 Introduction

Technological developments and the increase in digital image editing tools in recent years have resulted in more frequent use of digital images in various fields. As a result of these developments, forgery operations on images have also become easier. This situation increases the number of manipulated images day by day and focuses researchers on the detection of image forgery [1]. Image forgery causes numerous problems in many areas such as military investigations, medical research, and forensic and judicial processes. For this reason, the verification of digital images and the detection of image forgery are of great importance in many areas.

Image forgery is the deliberate falsification of an image to change the information it carries off. The trick may be to add, remove, or change any of the image properties or content without leaving any hint as to the applied change. Falsification of images has become easier and more difficult to detect with so many free image editing tools and software available. So, this causes less confidence in the reality and completeness of the image. Therefore, the need for robust

### Öz

Sayısal görüntüler çeşitli veriler içerebildiğinden bilgi paylaşımı için önemli bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, görüntüler gerçek hayatta birçok vakada kanıt olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Dijital fotoğrafların popüleritesindeki hızlı artış, teknolojilerin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. Dijital görüntüleri değiştirmek için Photoshop ve Corel Photo gibi son yıllarda çeşitli yazılım programları geliştirilmiştir, bu programlar sahtecilik için de yaygın olarak kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler nedeniyle, insanların sahte görüntüleri çıplak gözle tanınması zordur. Bu nedenle, bu çalışmada, tespit edilmesi zor olan sahte görüntülerin doğru etiketlenmesini sağlamak için sahtecilik tespit problemlerinde sık kullanılan öznelikler birleştirilmiştir. Hızlandırılmış Sağlam Öznelikler (SURF) ve Maksimum Kararlı Ekstremal Bölgeler (MSER) birleştirilerek daha güçlü öznelik elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında; kopyala-taşı sahtecilik tespit problemlerinde iki yöntemin birleştirilmesi sonucu elde edilen önerilen yöntemin kullanılmasının SURF ve MSER özneliklerinin ayrı ayrı kullanılması durumuna göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kopyala-taşı Sahtecilik tespiti, SURF, MSER, Görüntü sahteciliği

algorithms for automatic forgery detection is increasing day by day and this is one of the important investigative problems in image processing [2]. In addition to forgery detection, some precautions can also be taken, such as picture encryption, which prevents forgery in pictures [3].

### 2 Related work

There are two kinds of techniques as active technique and passive technique in digital image forgery detection (Figure 1). In active techniques involving digital signature and watermarking, some information is embedded in the image during creation or before publication [4], [5]. However, the scope of this technique is limited due to the deficiency of information about the watermark in most cases. In addition, active techniques have some constraints as they need specially equipped cameras or human intervention [5], [6]. Passive techniques have been proposed to overcome this problem. The blind or passive forgery detection technique uses the image only to determine its reality or completeness, without the watermark or signature of the original image from the sender. This technique accepts that even though

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fakar@erzincan.edu.tr (F. Akar)

Geliş / Received: 18.02.2022 Kabul / Accepted: 17.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1075784

digital forgeries may leave no visual traces of having been tampered with image, they may probably extremely disrupt the basic statistics feature or image consistency of a natural image. Thus, it presents new artifacts outcoming in different forms of mismatches. These mismatches can be used to detect the forgery. Because of it does not require any prior information about image, passive technique is popular. Using localization of tampered region, current techniques, define diverse traces of tampering and detect them one by one [7-9].

The most widespread types of image forgery are copy-move forgery, also called cloning, and splicing. A part of an image is copied then pasted into another part of the same image in copy-move forgery. The primary purpose of this forgery category is to secrete unwanted objects, copy some parts of the image or increase the visual effect of the image. Copied areas can be of any dimension and form and can be pasted several times in varied locations within the same image [9]. As seen Figure 1, copy-move forgery detection (CMFD) can be done by both methods as block-based and key-based. The purpose of block-based methods is separating the image into overlapping/nonoverlapping blocks then calculating feature vector for each block. After that alike feature vectors are defined and for finding forged regions they are matched. In key-point based methods, image is screened for key-points and feature vector is computed for each key-points. In this method, feature vectors are matched to discover repeated regions and the image is not sub-divided into blocks [10, 11]. Usually, image segments are chosen for this purpose, which easily merge with the background so that they do not leave any questionable artifacts in the manipulated areas. The fact that the source and target images are the same, will cause the features of the fake regions such as texture, color palette, noise, dynamic range to be harmony with the rest of that image, thus making forgery detection difficult [12]

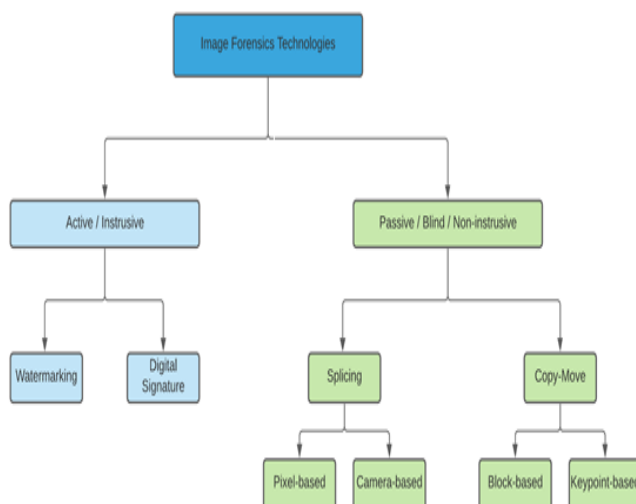


Figure 1. Classification of CMFD methods [13, 14]

First step of CMFD methods is pre-processing (Figure 2). Many methods have been used in the literature for this purpose, as examples:

- Choosing dyadic wavelet transform (DyWT) or Wiener filter for noise elimination,
- Transforming RGB color space into YCrCb color space, grayscale space, HSV space or color local binary pattern (LBP),
- Applying Gaussian pyramid or discrete wavelet transform (DWT) decomposition for size reduction of the image [13].

The key-point approach for feature extraction is most suitable due to their low computation time and well performance. The other benefit of this method is that key-points are very precision to recurrent image content and low-contrast regions [15]. For this reason, the key-point based MSER method was used in this study.

Second step is feature extraction process for CMFD. Fourier-Mellin transform, discrete cosine transform (DCT), polar harmonic transform (PHT), 2D-Fourier transform, LBP, singular value decomposition (SVD), Hu moment, Zernike moment, speeded up robust features (SURF), scale-invariant feature transform (SIFT), maximal stable extremal region (MSER), Harris corner features, FAST, ORB, BRISK and DAISY were used in literature [13].

Third step, feature matching, is the operation of detecting alike feature vectors. Euclidean distance and Manhattan distance are among the methods for finding similarity between feature vectors. The last steps are localization and post-processing. For correcting the detection regions some methods used such as filtering, morphologic operations or random sample consensus (RANSAC) algorithm [16].

In general, there are three classes of feature detectors such as affine invariant, single-scale or multi-scale detectors. Single-scale detectors are invariant for image transformations (translation, rotation, noise addition, illumination changes, etc.). But they fall short of the scaling issue. If there are two images that same scene with a scale modify, it is desired to define whether the same points of interest can be specified. That's why, it is essential to construct multi-scale detectors that can reliably extract distinguished features in case of scale changes. Single and multi-scale detectors partially address the difficult affine invariance problem. Therefore, affine invariant detectors can be used, which is a robust detector against perspective transformations. It can also be said that an affine invariant detector is a generalized model of a scale invariant detector [17].

Examples of single-scale detectors could be Harris, Moravec's, FAST, SUSAN, Hessian detector. As an example of multi-scale detectors; Hessian-Laplace, Harris-Laplace, Difference of Gaussian (DoG), Laplacian of Gaussian (LoG), and Gabor wavelet detector can be given. And finally examples of affine detectors could be Hessian-Affine, Harris-Affine, EBR (edge-based region), IBR (intensity extrema-based region), MSER [18].

In the literature, for each color channel in color images and descriptors for which invariants can be calculated across channels have been shown to be more successful than gray level descriptors [19, 20].

The ORB algorithm utilizes the advanced FAST algorithm to define feature points. If a pixel is significantly dissimilar from the neighborhood pixels this method claims

that it is more probably to be a corner point. First it extracts the Oriented FAST feature points, then applies the improved BRIEF algorithm to compute the descriptors for every point [21].

SIFT and SURF are shape matching based methods, while MSER is based on region analysis. In SURF and SIFT methods, feature vectors are extracted by focusing on prominent regions in the image. The MSER algorithm finds related ellipses in the image. Each MSER consists of ellipses defined as composite points around specified pixels [22]–[25]. SIFT and SURF methods have been extensive used in literature, but the number of studies with MSER is not too much.

In the literature, some studies have been done with the use of SURF and MSER features [26]–[28]. The authors in [26], [27] separate the input images into blocks, then implement CMFD using SURF or MSER features on the blocks that are related to each other. The authors in [28] firstly divide images to nonoverlapping blocks. After the key-points were detected using MSER, they extracted SURF descriptor at these MSER key-point locations and used them in the matching step. The proposed method is different from early studies in that it is not block-based and uses a combination of SURF and MSER features.

### 3 Material and method

#### 3.1 Proposed method

In pre-processing step, the image is converted to gray level. The SURF and MSER features are extracted from the gray level image separately and then these features are combined to have stronger feature in feature extraction step. The combination of features has been used in various fields in the literature [29], [30] and it has been observed that the rate of true positive rate is higher, and the rate of false positive rate is less than the applications performed with this combined feature compared to the applications performed with the use of these features separately. Therefore, the combination features are used in the proposed method. Thus, it is ensured that images that are fake but not labeled as fake are detected correctly. Flowchart of the proposed method is given in Figure 3.

The suggested CMF identification technique used a key-point based technique, which is thought being more reliable and quicker than block-based CMF recognition approaches. After transforming the original tampering image to gray

level, SURF and MSER descriptors are combined in the feature extraction step of the suggested CMF detecting approach.

SURF and MSER were combined for efficient and effective feature use in the matching step, so that the proposed CMFD approach was able to correctly label even the attacked images.

The algorithms used in the proposed method are detailed below.

#### 3.1.1 Extracting MSER (Maximally stable extremal regions) key-points:

MSER is the dependent ingredient of a properly thresholded image. The notion of Maximally Stable Extremal Regions is suggested by Matas et al, in 2004. MSERs indicate a set of prominent regions determined in a grayscale image. Whole regions are described by an extreme property of the density function in the region and its external border. MSERs have features that make up their outstanding performance as a stable local detector. The sequence of MSERs is off in continual geometric transformations and is invariant with affine density changes. In addition, MSERs are defined at distinct scales [24]. MSER has linear complicity and is fast to determine an affine invariant stable subset of extreme regions.

#### 3.1.2 SURF (Speeded Up Robust Feature) key-points:

The SURF descriptor is both fast and durable to translation and affine transformation also in the presence of noise [31]. Even if after post-processing attacks such as rotation, blur, contrast adjustment, color reduction, SURF features enable detection of fake regions. There are two main steps in SURF, points of interest (POI) detection and POI identification. The detector and descriptor of SURF is both faster, and its detector is more reiterationable, and its descriptor is more distinguishable. SURF converts the original image to the integral image. The total of whole pixels in the input image  $I$  inside of the rectangular region created by the origin and  $x$ , have shown by the input of an integral image  $I_{\Sigma}(x)$  at an  $x=(x,y)^T$  [32]:

$$I_{\Sigma}(x) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i,j) \quad (1)$$



Figure 2. Copy-move forgery detection process

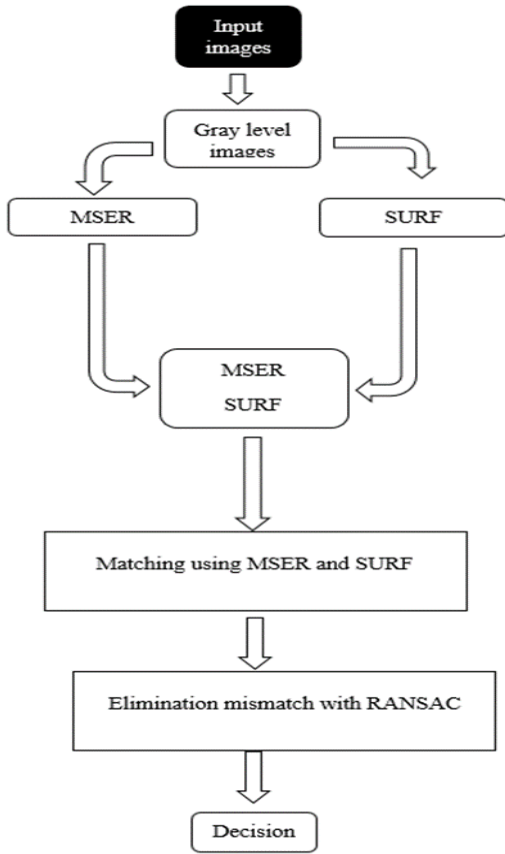


Figure 3. Flowchart of the proposed method

By using the Hessian matrix determinant as a criterion, information about the changes between regions is obtained.  $H(x, \sigma)$  Hessian matrix with  $\sigma$  scale for a point  $x=(x, y)$  in the  $I$  image given with:

$$H = \begin{bmatrix} L_{xx}(x, \sigma) & L_{xy}(x, \sigma) \\ L_{xy}(x, \sigma) & L_{yy}(x, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2)$$

In Equation 2  $L_{xx}(x, \sigma)$  is obtained as a result of the convolution of the  $I$  image at  $x$  and the second-order derivative of the gaussian filter.  $L_{xy}(x, \sigma)$  and  $L_{yy}(x, \sigma)$  are obtained similarly [23], [32].

$$L_{xx}(x, \sigma) = I(x) * \frac{d^2}{dx^2} g(\sigma) \quad (3)$$

### 3.1.3 SURF and MSER (SURF + MSER)

After the image is converted to gray level, firstly, SURF features are extracted from the image. Then, all 64-dimensional feature vectors obtained after extracting the MSER feature from the gray-level image are combined. For example, let the 25x64 size SURF features and 35x64 size MSER features are extracted from the image. In this case, the features are combined in the matching step so 60x64 sized features are used (Figure 4).



Figure 4. Process steps to obtain the MSER+SURF identifier

### 3.2 Matching

In the feature matching step, first, the scalar product of each feature descriptor with the other feature descriptors is calculated. The inverse cosine components of the scalar products calculated for all the features are obtained and these values are ordered in ascending order. If the ratio between consecutive neighbors is above the predetermined threshold, this feature pair is labeled as matched.

### 3.3 Mismatch elimination using RANSAC

It's easy to find erroneous matches, as illustrated in Figure 4. This is why the proposed model was evaluated using Fischler's RANSAC [33] to keep inliers (correct matches) and eliminate outliers. The proposed model has the most correct matches after a specific amount of repetitions. Following the RANSAC algorithm, the false match elimination result can be shown in Figure 5.

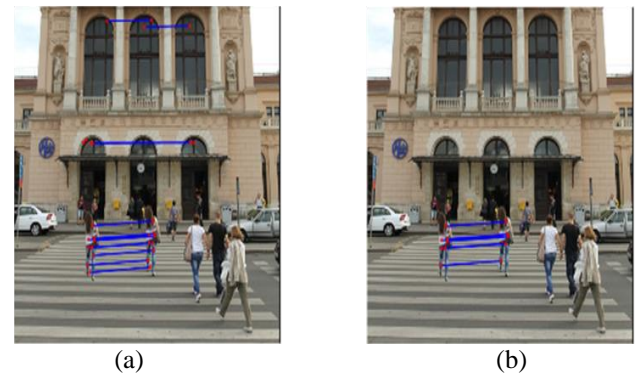


Figure 5. CMFD results a) without RANSAC b) with RANSAC

## 4 Results and discussion

### 4.1 Dataset

To evaluate the efficiency of the algorithm, CoMoFoD dataset consisting of 400 images in PNG format (200 tampered images, 200 original images with a resolution of 512x512 pixels) was used in this study. Five categories were formed as a result of geometric transformations (rotation, translation, scaling, deformity and combining two or more transformations) applied to whole images. 40 images are in every class and every class has also six subclasses based on six types of post-processing (noise addition, JPEG compression, brightness changing, image blurring, contrast adjustments and color reducing) that can be applied on an

image. Due to all operations, the CoMoFoD dataset consists of 10400 images in total [34].

#### 4.2 Metrics

The achievement rating of the proposed method was made over three comparison parameters, which are used extensively in the literature: Precision (P) and Recall (R) and F1 scores (Equation 4). TP (true positive) refers that a forged image is detected as fake, TN (true negative) refers that the original image is detected as original, FP (false positive) refers to an image which is not forged but reported as forged, FN (false negative) refers to an image which is not reported as forged even though it is forged. F1 is also a metric that combines Precision and Recall with a single rate [16], [35].

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad F_1 = 2 * \frac{P * R}{P + R} \quad (4)$$

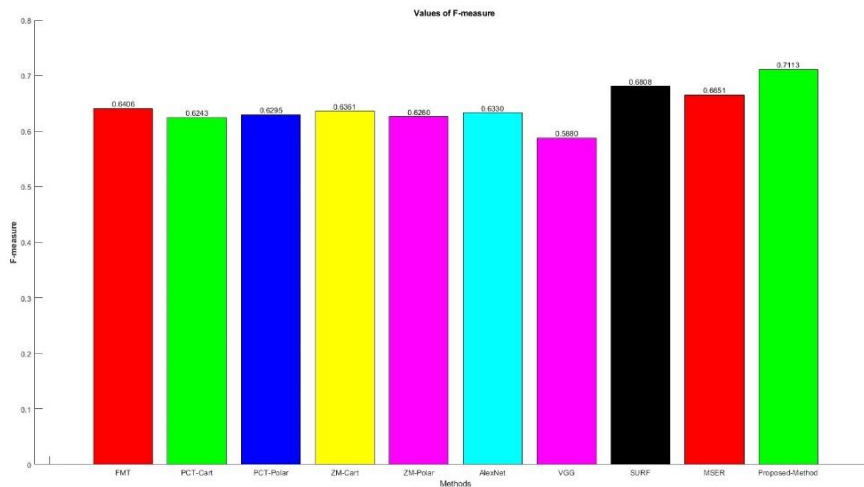
#### 4.3 Comparison results

The corresponding authors' applications with best parameter values reported in their respective papers (FMT, PCT-Cart, PCT-Polar, ZM-Cart, ZM-Polar) [36], Alexnet, VGG [37] are used. SURF [38] and MSER [39] methods for CMFD were applied by us, and the results obtained are given in the table. The method proposed in the manuscript was compared with the state-of-the-art methods [37]–[40]. The

results of the aforementioned methods and our proposed method on CoMoFoD dataset are presented in Table 1.

**Table 1.** Results of methods on CoMoFoD

Dataset	Technique Name	R	P	F1
CoMoFoD	FMT (result taken from [36])	0.522	0.8290	0.6406
	PCT-Cart (result taken from [36])	0.494	0.8480	0.6243
	PCT-Polar (result taken from [36])	0.491	<b>0.8770</b>	0.6295
	ZM-Cart (result taken from [36])	0.509	0.8480	0.6361
	ZM-Polar (result taken from [36])	0.489	0.8700	0.6260
	Alexnet (result taken from [37])	<b>0.835</b>	0.5105	0.6334
	VGG (result taken from [37])	0.7204	0.4965	0.5875
	SURF	0.725	0.6416	0.6808
	MSER	0.710	0.6256	0.6651
	Proposed Method (MSER+SURF)	0.795	0.6437	<b>0.7113</b>



**Figure 6.** F1 Scores of methods



**Figure 7.** Image which is applied brightness change attack

Experimental results showed that the proposed method was more successful than both the use of SURF and MSER features separately and other methods. In applications performed with the use of SURF and MSER features separately, F1 score 0.6808 and 0.6651 were obtained, respectively, while F1 score became 0.7113 with the use of these features together. Also, it can be seen from the Table 1, P and R values in some methods were higher than the proposed method. However, in these methods where higher values are obtained, the disproportion between P and R values is striking. As a result, considering the F1 score, which is obtained from P and R values and which is frequently used in the literature, the most successful method has been the recommended method.

To calculate efficiently a high-quality approximate nearest neighbor field for the whole image, Cozzolino et al. used the PatchMatch algorithm (FMT, PCT-Cart, PCT-Polar, ZM-Cart, ZM-Polar) [40]. F1-scores from all methods in table 1 are evaluated using bar graph in Figure 6.

#### 4.4 Experiments on post-processing

On the tampered images described in Dataset section, we test the resilience of our proposed CMFD technique against three forms of post-processing attacks: brightness change, contrast adjustments, color reduction, image blurring, noise adding, JPEG compression. Figure 7, 8, 9, 10, 11 and 12 shows the suggested CMFD results of images with attacks, respectively.

As can be seen from the figures, the proposed method has detected copy-move forgery even in cases where different attacks were applied.

## 5 Conclusions

On the basis of MSER and SURF, this article offers a unique CMFD technique that combines MSER and SURF. A typical block-based scheme splits images into overlapping blocks, but our suggested technique preserves the superiority of a key-point based scheme, which is effective for native images. In addition, our approach is robust against JPEG compression, noise addition, image blurring, brightness changing, color reduction and contrast adjustments attacks. Although the proposed method is strong according to the compared methods and also considering the attacks, it can be improved and made more robust. In this study, it has been shown that more success can be achieved by applying hybrid methods instead of applying the methods one by one. It would be beneficial for people who will work in this field to take this issue into consideration.

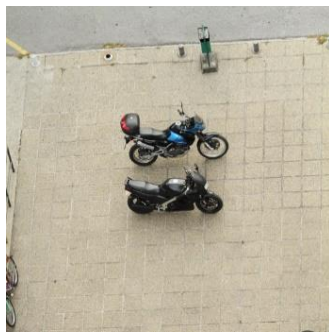
It is important to use strong features in CMFD applications where correct detection as well as false detection is of great importance. In this context, studies can be conducted on different combination methods such as triple hybrid combination with different features in the future.



Figure 8. Image which is applied contrast adjustment attack



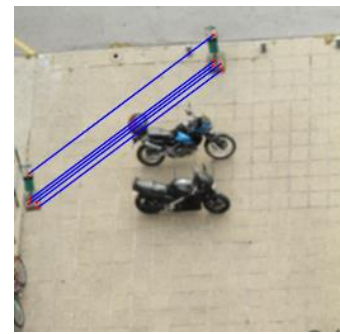
Figure 9. Image which is applied color reduction change attack



(a) original image



(b) forged image



(c) results of proposed method

**Figure 10.** Image which is applied image blurring attack



(a) original image



(b) forged image



(c) results of proposed method

**Figure 11.** Image which is applied noise adding attack



(a) original image



(b) forged image



(c) results of proposed method

**Figure 12.** Image which is applied JPEG compression attack

### Acknowledgement

The authors would like to thank the editor and anonymous reviewers for their comments that help improve the quality of this work.

### Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

**Similarity rate (iThenticate):** 15%.

### References

[1] M. Hassaballah, A. A. Abdelmgeid, and H. A. Alshazly, Image Features Detection, Description and Matching, Image Feature Detectors and Descriptors :

- Foundations and Applications, A. I. Awad and M. Hassaballah, Eds. Cham: Springer International Publishing, 11–45, 2016.
- [2] G. Ulutas and G. Muzaffer, A New Copy Move Forgery Detection Method Resistant to Object Removal with Uniform Background Forgery, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/3215162>.
- [3] D. Ozdemir and D. Celik, Analysis of Encrypted Image Data with Deep Learning Models, 14th International Conference on Information Security and Cryptology, ISCTURKEY Proceedings, 121–126, 2021. <https://doi.org/10.1109/ISCTURKEY53027.2021.9626>.
- [4] M. A. Qureshi and M. Deriche, A bibliography of pixel-



- based blind image forgery detection techniques, *Signal Processing: Image Communication*, (39), 46–74, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.image.2015.08.008>.
- [5] M. Kashif, T. M. Deserno, D. Haak, and S. Jonas, Feature description with SIFT, SURF, BRIEF, BRISK, or FREAK A general question answered for bone age assessment, *Computers in Biology and Medicine*, (68), November, 67–75, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2015.11.006>.
- [6] K. Asghar, Z. Habib, and M. Hussain, Copy-move and splicing image forgery detection and localization techniques: a review, *Australian Journal of Forensic Sciences*, 49, (3), 281–307, 2017, <https://doi.org/10.1080/00450618.2016.1153711>.
- [7] T. Mahmood, T. Nawaz, A. Irtaza, R. Ashraf, M. Shah, and M. T. Mahmood, Copy-Move Forgery Detection Technique for Forensic Analysis in Digital Images, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/8713202>.
- [8] O. I. Al-Sanjary and G. Sulong, Detection of video forgery: A review of literature, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 74, (2), 207–220, 2015.
- [9] N. P. Joglekar and P. N. Chatur, A Compressive Survey on Active and Passive Methods for Image Forgery Detection, *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 4, (1), 10187–10190, 2015.
- [10] R. Oommen, M. Jayamohan, and S. Sruthy, A Survey of Copy-Move Forgery Detection Techniques for Digital Images, *International Journal of innovations in engineering and technology*, 5, (2), 419–426, 2015.
- [11] J. A. Redi, W. Taktak, and J. L. Dugelay, Digital image forensics: A booklet for beginners, *Multimedia Tools and Applications*, 51, (1), 133–162, 2011, <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0620-1>.
- [12] B. L. Shivakumar and S. S. Baboo, Detecting Copy-Move Forgery in Digital Images: A Survey and Analysis of Current Methods, *Global Journal of Computer Science and Technology*, 10, (7), 61–65, 2011.
- [13] Z. Zhang, C. Wang, and X. Zhou, A survey on passive image copy-move forgery detection, *Journal of Information Processing Systems*, 14, (1), 6–31, 2018, <https://doi.org/10.3745/JIPS.02.0078>.
- [14] P. C. Sekhar and T. Shankar, Review on Image Splicing Forgery Detection, *International Journal of Computer Science and Information Security*, 14, (11), 471–475, 2016.
- [15] R. Raj and N. Joseph, Keypoint Extraction Using SURF Algorithm for CMFD, *Procedia Computer Science*, (93), 375–381, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.223>.
- [16] V. Christlein, C. Riess, J. Jordan, C. Riess, and E. Angelopoulou, An evaluation of popular copy-move forgery detection approaches, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 7, (6), 1841–1854, 2012, <https://doi.org/10.1109/TIFS.2012.2218597>.
- [17] M. Hassaballah and A. I. Awad, Detection and Description of Image Features: An Introduction, *Image Feature Detectors and Descriptors: Foundations and Applications*, A. I. Awad and M. Hassaballah, Eds. Cham: Springer International Publishing, 1–8, 2016.
- [18] K. Mikolajczyk et al., A comparison of affine region detectors, *International Journal of Computer Vision*, 65, (1–2), 43–72, 2005, <https://doi.org/10.1007/s11263-005-3848-x>.
- [19] G. J. Burghouts and J.-M. Geusebroek, Performance evaluation of local colour invariants, *Computer Vision and Image Understanding*, 113, (1), 48–62, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2008.07.003>.
- [20] I. Abu Doush and S. AL-Btoush, Currency recognition using a smartphone: Comparison between color SIFT and gray scale SIFT algorithms, *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 29, (4), 484–492, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2016.06.003>.
- [21] E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, and G. Bradski, ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 2564–2571, 2011, <https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126544>.
- [22] D. G. Lowe, Object recognition from local scale-invariant features, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2, pp. 1150–1157, 1999, <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>.
- [23] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, LNCS 3951-SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision–ECCV*, pp. 404–417, 2006, [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/11744023\\_32](https://link.springer.com/chapter/10.1007/11744023_32).
- [24] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla, Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions, *Image and Vision Computing*, 22, (10) SPEC. ISS., 761–767, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.02.006>.
- [25] F. Akar and Y. Aydın, Comparison of Interest Point-Based Features in Object Recognition Applications, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), Elazığ, Türkiye, 19-22, pp. 3553-3556, 2017.
- [26] K. Ramirez-Gutierrez, Mariko-Nakano, G. Sanchez-Perez, and H. Perez-Meana, Copy-move forgery detection algorithm using frequency transforms, surf and mser, 2019 7th International Workshop on Biometrics and Forensics, IWBF, pp. 4–9, 2019, [doi:10.1109/IWBF.2019.8739168](https://doi.org/10.1109/IWBF.2019.8739168).
- [27] K. Ramirez-Gutierrez, M. Nakano-Miyatake, G. Sanchez-Perez, Blind Tamper Detection to Copy Move Image Forgery using SURF and MSER, *MMEDIA*, 9, 2015.
- [28] B. Soni and P. K. Das, Geometric Transformation Invariant Improved Block-Based Copy-Move Forgery Detection, in *Image Copy-Move Forgery Detection: New Tools and Techniques*, Singapore: Springer Singapore, 51–67, 2022.
- [29] M. Bansal, M. Kumar, and M. Kumar, 2D object recognition: a comparative analysis of SIFT, SURF and

- ORB feature descriptors, *Multimedia Tools and Applications*, 80, (12), 18839–18857, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10646-0>.
- [30] C. Lin, W. Lu, et al., Copy-move forgery detection using combined features and transitive matching, *Multimedia Tools and Applications*, 78, (21), 30081–30096, 2019, <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6922-4>.
- [31] K. Mikolajczyk and C. Schmid, A performance evaluation of local descriptors, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27, (10), 1615–1630, 2005, <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.188>.
- [32] H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, Speeded-Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, 110, (3), 346–359, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>.
- [33] M. A. Fischler and R. C. Bolles, Random sample consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, 24, (6), 381–395, 1981, <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- [34] D. Tralic, I. Zupancic, S. Grgic, and M. Grgic, CoMoFoD - New database for copy-move forgery detection, *Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine*, pp. 49–54, 2013.
- [35] V. T. Manu and B. M. Mehtre, Copy-move tampering detection using affine transformation property preservation on clustered keypoints, *Signal, Image and Video Processing*, 12, (3), 549–556, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11760-017-1191-7>.
- [36] M. Bilal, H. A. Habib, Z. Mehmood, T. Saba, and M. Rashid, Single and Multiple Copy–Move Forgery Detection and Localization in Digital Images Based on the Sparsely Encoded Distinctive Features and DBSCAN Clustering, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, (4), 2975–2992, 2020, <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04238-2>.
- [37] A. Kumar, A. Bhavsar, and R. Verma, Syn2Real: Forgery Classification via Unsupervised Domain Adaptation, *Proceedings-2020 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision Workshops, WACVW*, 63–70, 2020, <https://doi.org/10.1109/WACVW50321.2020.9096921>.
- [38] B. Xu, J. Wang, G. Liu, and Y. Dai, Image copy-move forgery detection based on SURF, *Proceedings - 2010 2nd International Conference on Multimedia Information Networking and Security, MINES 2010*, pp. 889–892, 2010, <https://doi.org/10.1109/MINES.2010.189>.
- [39] Kanica Sachdev, A Novel Technique for Detection of Copy Move Forgery Using MSER Features, *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)*, 5, (9), 14–19, 2017, [Online]. Available: <https://ijeter.everscience.org/Manuscripts/Volume-5/Issue-9/Vol-5-issue-9-M-03.pdf>.
- [40] D. Cozzolino, G. Poggi, and L. Verdoliva, Efficient Dense-Field Copy-Move Forgery Detection, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 10, (11), 2284–2297, 2015, <https://doi.org/10.1109/TIFS.2015.2455334>.





## Sivas ilinin iklim değişikliği projeksiyonları Climate change projections of Sivas province

Sefa Furkan Selçuk<sup>1,\*</sup>, Meltem Sarıoğlu Cebeci<sup>2</sup>, Orhan Cerit<sup>3</sup>, Burcu Çirci Selçuk<sup>4</sup>,  
Bünyamin Karagözoğlu<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,5</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye  
<sup>4</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

### Öz

Antropojenik nedenlerden kaynaklanan iklim değişikliği çağımızın en büyük küresel çevre sorunlarından biridir. İklim değişikliği ile küresel çapta mücadele için küresel iklim modelleri ile iklim değişikliği projeksiyonları oluşturulmuştur. Bu model çıktıları küresel ve kıtasal ölçekte yeterli olsa da yerel ölçekte iklim değişikliğine karşı alınacak önlemler için yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada GFDL-ESM2M küresel iklim modeli veri setine Climate Change Toolkit (CCT) yazılımı ile istatistiksel ölçek küçültme uygulanarak RCP senaryoları için yağış, minimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık parametrelerinin değişim projeksiyonları oluşturulmuştur. Elde edilen ortalama değişim oranlarına ters mesafe ağırlıklı interpolasyon yöntemi uygulanmış, yakın gelecek dönem (2022-2050), orta gelecek dönem (2050-2075) ve uzak gelecek dönem (2075-2100) mekânsal dağılım haritaları oluşturularak Sivas ilinde gelişmesi olası değişimler değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda ilde, farklı senaryolarda %8,5 - 37 oranlarında maksimum sıcaklık artışları, %10-171 oranlarında minimum sıcaklık artışları ve %0 - 26 oranlarında yağış azalması yaşanacağı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** İklim değişikliği, Sivas, Ölçek küçültme, RCP

### 1 Giriş

İnsanların yaptığı seçimler nedeniyle olumsuz etkileri giderek daha belirgin bir şekilde artan küresel iklim değişikliği, günümüzde ve gelecekte insan yaşamını ve çevreyi olumsuz etkileyen en ciddi sorunlardan biri olmaya devam edecektir. “İklimin ortalama durumunda veya değişkenliğinde onlarca yıl veya daha uzun süren değişiklikler” olarak tanımlanan iklim değişikliği, özellikle mekânsal ve zamansal yağış dağılımı ve yoğunluğunda, ayrıca minimum ve maksimum sıcaklıklarda değişimlere neden olarak, seller ve kuraklıklar gibi aşırı iklim olaylarının sıklığı ve yoğunluğunda önemli değişimlere neden olmaktadır [1-4]. Bu gibi aşırı değişimler insanların yaşam konforunu olumsuz etkilediği gibi çevre ve ekosisteme de geri dönüşü olmayacak önemli zararlar vermektedir.

Küresel yüzey sıcaklıkları giderek artan bir eğilim göstermekte olup, yağış modellerinin değişkenliği hem alan

### Abstract

Climate change caused by anthropogenic causes is one of the biggest global environmental problems of our time. Global climate models and climate change projections have been created to combat climate change on a global scale. Although the outputs of this model are sufficient on a global and continental scale, they are insufficient for measures to be taken against climate change on a local scale. In this study, statistical downscaling of the GFDL-ESM2M global climate model dataset with the Climate Change Toolkit (CCT) software was applied to create change projections of precipitation, minimum temperature and maximum temperature parameters for RCP scenarios. Inverse distance weighted interpolation method was applied to the average change rates obtained, and possible changes in Sivas province were evaluated by creating spatial distribution maps for the near future (2022-2050), mid-future period (2050-2075) and far future (2075-2100). As a result of the study, it has been predicted that the province will experience maximum temperature increases of 8.5 - 37%, minimum temperature increases of 10-171% and a decrease of precipitation of 0 - 26% in different scenarios.

**Keywords:** Climate change, Sivas, Downscaling, RCP

hem de zaman açısından dinamiktir. Hükümetler arası iklim değişikliği panelinin (IPCC) raporuna göre küresel ortalama sıcaklık değerleri 1900-2010 döneminde 0,9°C'lik bir artış göstermiştir [5]. CMIP5'e (IPCC beşinci değerlendirme raporu) dayanarak IPCC, iklim değişikliği projeksiyonu için RCP (Temsili Konsantrasyon Rotaları) senaryoları tanımlamıştır. Bu senaryolar ile insan faaliyetleri sonrasında yeryüzünün maruz kalabileceği ısınmsal zorlama seviyeleri ve zorlama sonucunda iklim sisteminde oluşacak muhtemel değişimler belirlenmiştir. Bu kapsamda RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 ve RCP 8.5 olmak üzere dört farklı senaryo belirlenmiştir. Senaryolarda RCP ifadesinden sonra gelen rakamlar, W/m<sup>2</sup> biriminde belirlenen ısınmsal zorlama seviyelerini ifade etmektedir. Bu senaryolara göre küresel ortalama yüzey sıcaklığının, 1986'dan 2005'e kadar olan 30 yıllık temel verilere kıyasla 2100 yılına kadar düşük ve yüksek emisyon senaryolarında sırasıyla 1°C ve 4°C'nin üzerinde artacağı tahmin edilmektedir. Artan sıcaklıklar ve

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sefaturkan.selcuk@gmail.com (S.F. Selçuk)  
Geliş / Received: 22.03.2022 Kabul / Accepted: 27.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1091466

yağış şekillerindeki değişiklikler bölgesel su dengesi ve hidrolojik rejimleri önemli ölçüde etkileyecektir [6]. Küresel ısınma eğilimleri tüm dünyada görülse de 40° ve 70° kuzey enlemleri arasında daha uzun süreli ısınma eğilimleri görüleceği tahmin edilmektedir [7]. CMIP5'e göre ise Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz Havzası'nda 21. yüzyıl sonlarına doğru sıcaklık artışları ile birlikte yağış miktarlarında önemli ölçüde azalmalar beklenmektedir [8]. Spesifik olarak, gelişmekte olan ülkeler, ekonomilerinde tarımın baskınlığı ve zayıf altyapı nedeniyle iklim değişikliğine karşı gelişmiş ülkelere göre daha savunmasızdır. Dolayısıyla bu bölgelerde yerel ölçekte iklim değişikliği projeksiyonları üretmek ve olası senaryolara karşı önlem almak oldukça önemlidir [9].

Küresel iklim modelleri (GCM), büyük ölçekli iklim özelliklerini ve gelecekteki emisyon senaryoları altında iklimin potansiyel gelişimini tanımlamak için tasarlanmış en güvenilir araçlardır [10]. Bu modeller küresel ve kıtasal ölçekte iklim değişkenlerini simüle etmek için makul düzeyde iyi performans göstermelerine rağmen bölgesel iklimi koşullandırabilecek küçük ölçekli süreçleri temsil etme konusunda hâlâ büyük eksiklikler göstermektedir [10-14]. GCM model çıktılarını yerel ölçeklere uyarlamak için genellikle ölçek küçültme teknikleri kullanılmaktadır [15]. Yüksek çözünürlüklü projeksiyonlar elde etmek için yaygın olarak dinamik ölçek küçültme ve istatistiksel ölçek küçültme olmak üzere iki temel ölçek küçültme tekniği kullanılmaktadır [16]. Dinamik ölçek küçültme, bir GCM grid yapısı içine ilgili alan üzerinde daha ince ölçekli bir grid yapısı yerleştirilerek uygulanmaktadır [17, 18]. Dinamik ölçek küçültme tekniğinin iklim değişikliği çalışmalarında kullanımını kısıtlayan en büyük dezavantajı karmaşık tasarımı ve yüksek hesaplama maliyetidir [16,18]. Ölçek küçültükçe hesaplama maliyeti artmaktadır. Ayrıca çalışma bölgesini genişletmek veya değişiklik yapmak konusunda esnek değildir, tüm çalışmanın yenilenmesini gerektirebilir [19]. İstatistiksel küçültme yöntemleri ise büyük ölçekli atmosferik değişkenler ve yerel iklim arasındaki istatistiksel ilişkiler aracılığıyla yerel ölçekte iklim bilgisi üretir [20]. İstatistiksel ölçek küçültme yöntemlerinin yüksek hesaplama verimliliği vardır. En önemli dezavantajı ise model parametrelerinin değişmediği kabulüdür [21]. Bu iki teknik arasındaki karşılaştırmalı çalışmalar, her iki tekniğin de bölgesel iklim özelliklerini temsil etmek için kullanılabilirliğini göstermektedir [18, 22, 23].

Türkiye'de ölçek küçültme ile iklim değişikliği projeksiyonlarının oluşturulduğu geniş ölçekli çalışmalardan biri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılan "Yeni senaryolar ile Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği" çalışmasıdır. Çalışmada HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modellerine RegCM4.3.4 bölgesel iklim modeli kullanılarak dinamik ölçek küçültme uygulanarak RCP4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için sıcaklık ve yağış parametrelerine ait projeksiyonlar oluşturulmuştur. HadGEM2-ES modeli ile alınan sonuçlara göre; sıcaklıkların 2016-2099 periyodunda RCP4.5 senaryosuna göre 2,5°C, RCP8.5 senaryosuna göre ise ortalama 3,6°C artması beklenmektedir. Bu değerler MPI-ESM-MR ve GFDL-ESM2M modelleriyle alınan sonuçlarda; RCP4.5

senaryosunda 1,5°C ve RCP8.5 senaryosunda 2,5°C olarak hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları su havzaları için ortalama değerler ve Türkiye için genel haritalar olarak verilmiştir [24].

Bu çalışmada, hesaplama verimliliği ve maliyet göz önünde bulundurularak istatistiksel ölçek küçültme tekniği tercih edilmiştir. Çalışma, yerel ölçekte ve ayrıntılı iklim verileri oluşturarak Sivas ili iklim değişikliği projeksiyonlarını incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık parametrelerini içeren bir GCM veri setine CCT yazılımı yardımı ile ölçek küçültme ve hata düzeltme işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen küçük ölçekli veriler referans dönem (1950-2000), yakın gelecek dönem (2022-2050), orta gelecek dönem (2050-2075) ve uzak gelecek dönem (2075-2100) olarak sınıflandırılmıştır. Her dönem için mekânsal dağılım haritaları oluşturularak Sivas ilinde olası iklim değişikliğinin boyutları incelenmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Çalışma alanı

Sivas ili 28 488 km<sup>2</sup>'lik yüz ölçümü ile Türkiye'nin en büyük ikinci ilidir. İç Anadolu bölgesinde bulunan il, Erzincan, Yozgat, Malatya, Kahramanmaraş, Ordu, Tokat, Giresun ve Kayseri illeri ile komşudur. 35°50' ve 38°14' doğu meridyenleri ile 38°42' ve 40°16' kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. İlin genel olarak topografik yapısına bakıldığında ülkemiz topografyası ile paralel olarak batıdan doğuya doğru bir yükseklik artışı mevcuttur. Deniz seviyesinden yüksekliği 1250 – 2280 m aralığındadır. Birçok Anadolu ili gibi karasal iklimin görüldüğü ilde yaz mevsimleri kurak ve sıcak, kış mevsimleri ise soğuk ve kar yağışlı geçmektedir. Türkiye'nin en soğuk illerinden biri olan Sivas'ta 1970 - 2018 yılları arasında karla kaplı gün sayısının ortalama 17,5 – 35,3 gün olduğu belirtilmiştir. Çalışma alanı bitki örtüsü açısından değerlendirilecek olur ise bozkır vejetasyonunun hâkim olduğu bölgede doğal bitki örtüsü dâhilinde gözlemlenen türler genellikle boyları 20 – 25 cm'yi geçmeyen kısa ömürlü bitkilerden oluşmaktadır. Bozkır vejetasyonu ilkbahar yağışları ile canlanan ve yağışın az olduğu yaz mevsiminde ise kuru bir görünüme bürünen bitki türlerinden oluşmaktadır. Aynı zamanda bölgede yüksek kesimlerde görülen orman vejetasyonu için iklimin önemli bir rol oynadığını söylemek mümkündür [25-27].

### 2.2 Veri ve yöntem

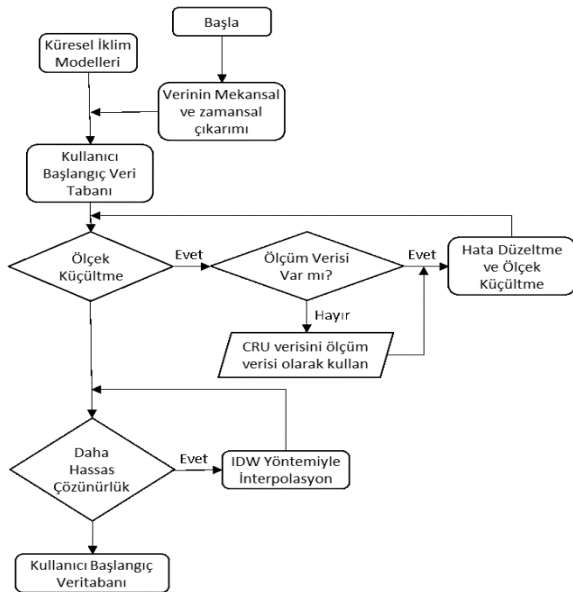
Küresel iklim modelleri, iklim değişikliği çalışmalarında iklim verileri elde etme ve gelecek koşulların tahmin edilmesinde kullanılacak en güvenilir araçlardır. GCM'ler küresel ve kıtasal ölçekte iklim değişkenlerini simüle etmek için makul düzeyde iyi performans gösterirler. Ancak bölgesel veya yerel analizlerde küçük ölçekli çalışmalarda yetersiz kalmaktadır. Çalışma kapsamında GFDL-ESM2M küresel iklim modeli veri setine CCT yazılımı ile istatistiksel ölçek küçültme ve hata düzeltme uygulanmıştır.

GFDL-ESM2M modeli, Amerika Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesine (NOAA) bağlı Jeofizik Akışkanlar Dinamiği Laboratuvarı (GDFL) tarafından insan

eylemleri de dahil olmak üzere Dünya'nın biyojeokimyasal döngülerinin iklim sistemi ile nasıl etkileşime girdiği üzerine çalışmalar yapmak için geliştirilmiş bir dünya sistem modelidir (ESM). GFDL'nin fiziksel iklim modelleri, bir okyanus sirkülasyon modeli ve atmosferik sirkülasyon modelinin birleşimine dayanmaktadır. Model, karbon döngüsü de dahil olmak üzere etkileşimli biyojeokimyayı, atmosferik bileşenleri (aerosoller, bulut fiziği ve yağış gibi), karasal ekoloji bileşenlerini (yağış, buharlaşma, yüzeyel su kaynakları ve dinamik karbon depoları gibi) ve okyanus bileşenlerini (deniz buzu dinamikleri, su akışları, dalga süreçleri ve deniz ekolojisi gibi) içermektedir [28].

Beşinci birleştirilmiş model karşılaştırma projesinde (CMIP5) kullanılan ve gösterdiği ortalama sıcaklık değerleriyle ülkemiz ortalama sıcaklık değerlerini en iyi temsil eden modellerden biri GFDL-ESM2M'dir [24]. Ayrıca çalışmada kullanılan CCT yazılımının içerdiği beş veri setinden biridir. Bu iki avantaj göz önünde bulundurularak, çalışmada GFDL-ESM2M modelinin kullanılmasına karar verilmiştir.

CCT yazılımının ölçek küçültme modülü ölçek küçültme için yerel ölçüm verilerine ihtiyaç duyar. Yerel ölçüm verilerinin bulunmadığı veya yeterli görülmediği durumlarda ise içeriğinde bulunan CRU veri setini ölçüm verisi yerine kullanmaktadır (Şekil 1). Modül, basit ve en yaygın kullanılan istatistiksel ölçek küçültme yöntemini olan istatistiksel önyargı düzeltme yöntemini kullanmaktadır [29]. Yöntemde ölçüm verisi tanımlanan istasyona en yakın küresel iklim modeli gridine ön yargı düzeltme uygulanarak veri bu istasyona aktarılmaktadır. Farklı klimatolojik çalışmalarda, bu yöntemin tatmin edici olduğu rapor edilmiştir [30-32].



Şekil 1. CCT proses akım şeması [29].

Yazılım sıcaklık verilerine aylık periyotlar için Denklem 1'e göre düzeltme faktörü uygulamaktadır [29].

$$T_{düzelttilmiş_{ij}} = T_{GCM_{ij}} + (\bar{T}_{Referans_{jk}} - \bar{T}_{GCM_{jk}}) \quad (1)$$

Denklem 1'de T sıcaklığı,  $\bar{T}$  uzun dönem ortalama sıcaklığı ve i,j,k sırasıyla gün, ay ve yılı sembolize etmektedir.

Yazılım yağış verileri için ise Denklem 2'deki çarpımsal düzeltme faktörünü kullanmaktadır [29].

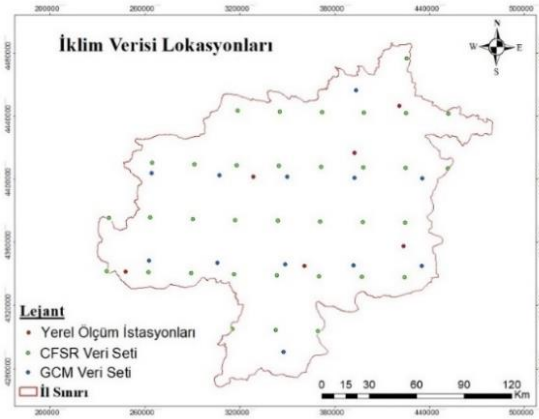
$$P_{düzelttilmiş_{ij}} = P_{GCM_{ij}} * \frac{\bar{P}_{Referans_{jk}}}{\bar{P}_{GCM_{jk}}} \quad (2)$$

Denklem 2'de P yağışı,  $\bar{P}$  uzun dönem ortalama yağışı ve i,j,k sırasıyla gün, ay ve yılı sembolize etmektedir.

Sivas ilinde yeterli süredir (>20 yıl) ölçüm yapan 6 ölçüm istasyonu tespit edilmiş olmasına rağmen sayı olarak yeterli görülmemiştir. CCT yazılımı ölçek küçültme uygularken alternatif olarak kullandığı CRU veri seti ise 0.5° ölçeğindedir [29]. Daha önce, İstanbul ve çevresinin hidrolojik modellenmesi için yapılmış bir çalışmada, CCT yazılımı ile ölçek küçültme yapılmış ve Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) veri setinin CRU veri setine ve yerel ölçüm verilerine göre daha iyi sonuç verdiği rapor edilmiştir [33]. Çalışma alanında bulunan yerel ölçüm verilerinin yetersizliği ve CRU veri setinin ölçeğinin büyük olması nedeniyle istatistiksel ölçek küçültme çalışmalarında sıklıkla ve başarıyla kullanılan 0.25° ölçeğine sahip CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) veri setinin kullanılmasına karar verilmiştir [3, 9, 18, 34-36].

CFSR veri seti, NCEP (The National Centers for Environmental Prediction) tarafından geliştirilmiş üçüncü nesil bir yeniden analiz ürünüdür. Küresel, yüksek çözünürlüklü ve birleştirilmiş bir atmosfer-okyanus-kara yüzeyi-deniz buzu sistemi olarak tasarlanmış ve yürütülmüştür. Küresel kara yüzeyi modeli 4 toprak seviyesine ve küresel deniz buzu modeli 3 seviyeye sahiptir. CFSR atmosferik modeli, karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gözlemlenen değişikliklerle birlikte aerosollerdeki, diğer eser gazlardaki ve güneş enerjisindeki değişimleri de içermektedir [37]. Veri setinden, 1979-2014 zaman periyodunda, 0.25° grid çözünürlüğünde ve günlük zaman ölçeğinde maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık, yağış, rüzgâr, nem ve radyasyon parametrelerine ait veriler temin edilebilmektedir [38].

0.5° ölçeğe sahip GFDL-ESM2M modeli veri seti 0.25° ölçeğine küçültülmüş ve il sınırları içerisinde 12 noktadan temin edilen veriler 34 noktaya çıkarılmıştır. Çalışmada kullanılan veri setlerinin grid yapıları Şekil 2'de verilmiştir. Daha sonra veri seti, referans dönem (1950-2000), yakın dönem (2022-2050), orta dönem (2050-2075) ve uzak dönem (2075-2100) olarak sınıflandırılmıştır. Her dönem ve veri bulunan her lokasyon için yıllık ortalama yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık değerleri hesaplanmış ve gelecek dönemlerde gerçekleşeceği tahmin edilen yüzde değişimler hesaplanmıştır. Coğrafi bilgi sistemi yazılımı ile ters mesafe ağırlıklı (IDW) tekniğini kullanarak interpolasyon uygulanmış ve verilerin mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur.

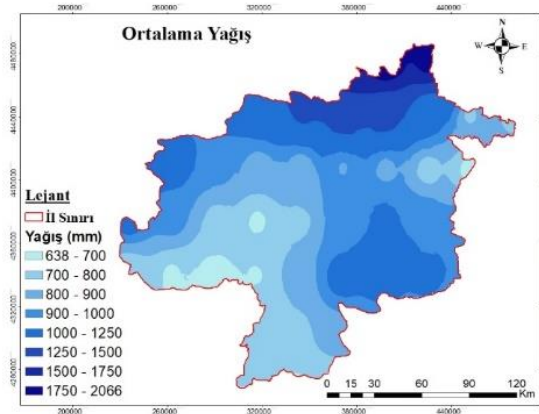


Şekil 2. Çalışma alanında iklim verisi temin edilen lokasyonlar [29, 38, 39].

### 3 Bulgular

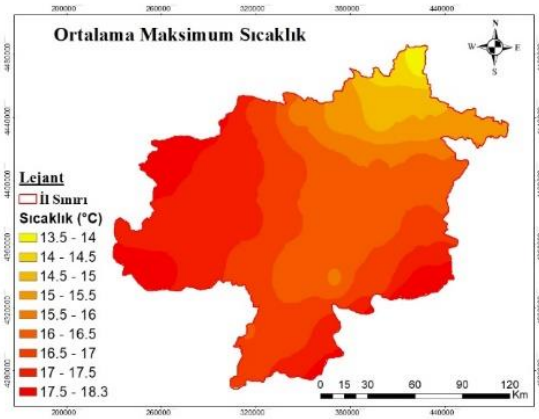
#### 3.1 Referans dönem

Referans dönem için hazırlanmış ortalama yağış verilerinin mekânsal dağılım haritası incelendiğinde ilin sadece kuzey bölümünde küçük bir kısmın yıllık ortalama 1500 mm'den fazla yağış aldığı görülmektedir (Şekil 3). İlin geneli ise yıllık ortalama 1000 mm'den daha az yağış almıştır. Yağış parametresinin mekânsal dağılımı incelendiğinde ilinde kuzeyde güneye doğru inildikçe yağışta ciddi azalmalar olduğu görülmektedir. Özellikle güney sınırlarına yaklaştığında yağış miktarının ortalama 700 mm'ye kadar düştüğü ve kuzey uçların aldığı yağış miktarının yarısından daha az yağış aldığı dikkat çekmektedir.



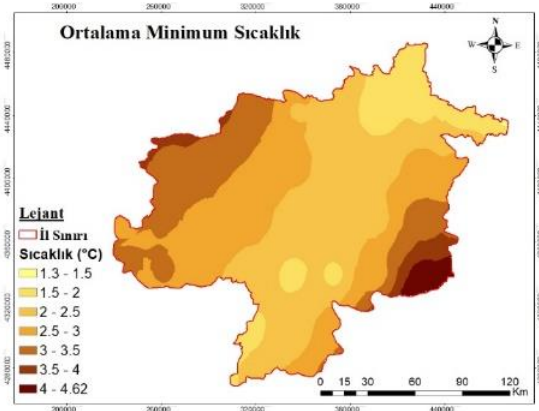
Şekil 3. Referans dönem mekânsal ortalama yağış dağılım haritası

Ortalama maksimum sıcaklık verilerinin mekânsal dağılım haritası incelendiğinde ise ilin en çok yağış alan kuzey uçlarında 13,5 – 15,5°C sıcaklıklar olduğu görülmektedir (Şekil 4). İlin orta bölümlerinden güney doğu ve batı bölümlerine gidildikçe ortalama maksimum sıcaklıkların arttığı dikkat çekmektedir. İlin önemli bir kısmında sıcaklıklar 16 °C'yi geçmezken özellikle batı bölümünde büyük bir bölgede ortalama maksimum sıcaklıklar 17 – 18,3 °C aralığında görülmektedir.



Şekil 4. Referans dönem mekânsal ortalama maksimum sıcaklık dağılım haritası

Referans dönemde ortalama minimum sıcaklık parametresinin mekânsal dağılım haritası incelendiğinde ortalama maksimum sıcaklık parametresinin dağılımına benzer bir desen olduğu görülmektedir (Şekil 5). İlin kuzey ucundan güney ucuna bir koridor şeklinde oldukça büyük bir alanda 1,3 – 2 °C ortalama minimum sıcaklıklar görülmekte doğu ve batıya ilerledikçe ortalama minimum sıcaklığın 4 °C'ye kadar çıktığı ve doğu ve batı uçlarda göz ardı edilebilir küçük bir alanda ise 4 – 4,6 °C sıcaklık olduğu görülmektedir.

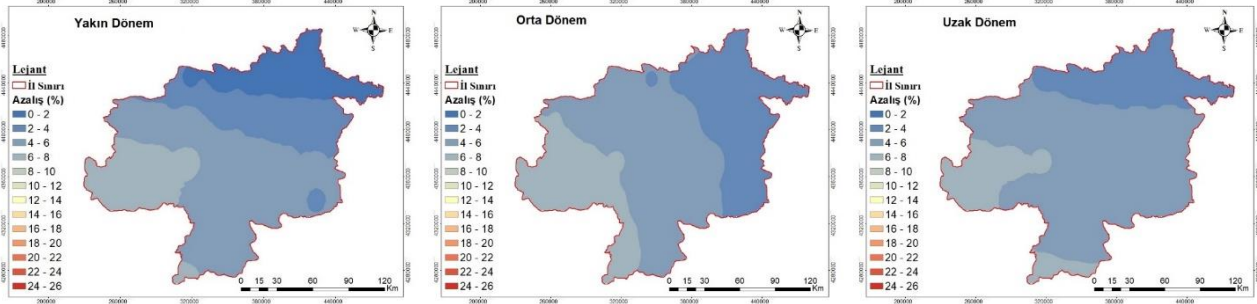


Şekil 5. Referans dönem mekânsal ortalama minimum sıcaklık dağılım haritası

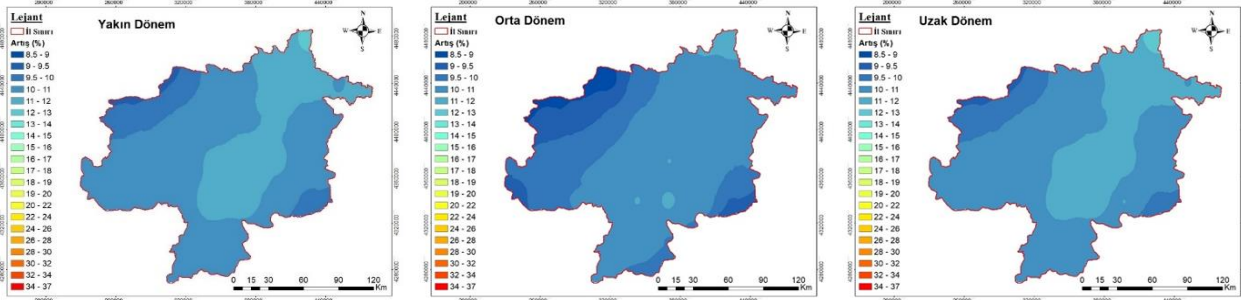
#### 3.2 RCP 2.6 senaryosuna göre iklim parametrelerinde oluşacak değişimler

IPCC'nin yayınladığı en iyimser senaryo olan RCP 2.6'da 2100 yılına kadar ısınmsal zorlama seviyesinin 3,0 W/m<sup>2</sup>'ye ulaşmadan artışın durması ve 2,6 W/m<sup>2</sup>'ye kadar düşmesi beklenmektedir [8].

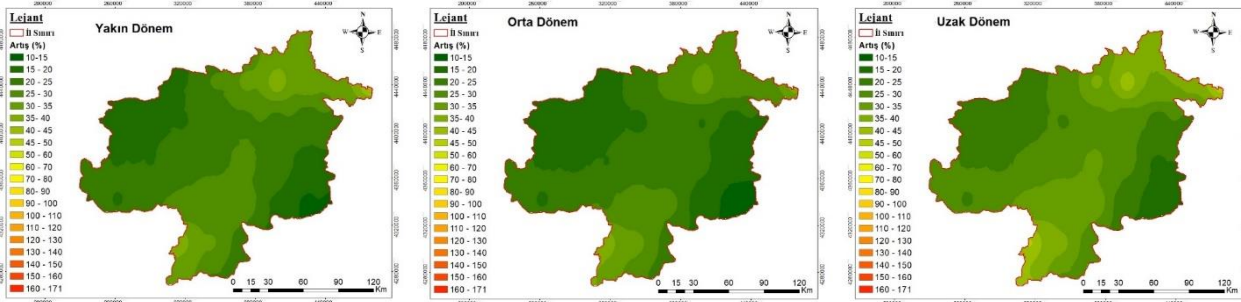
Şekil 6'da bu senaryo ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş yağış azalış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Referans döneme göre yakın dönemde ilin en çok yağış alan kuzey bölgelerinde % 0 – 2 oranında bir yağış azalması beklenirken güneye inildikçe bu oran kademe kademe artarak % 6 – 8 düzeyine çıkmaktadır.



Şekil 6. RCP 2.6 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama yağış azalma oranları haritası.



Şekil 7. RCP 2.6 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama maksimum sıcaklık artış oranları haritası.



Şekil 8. RCP 2.6 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama minimum sıcaklık artış oranları haritası.

Orta dönemde yıllık ortalama yağış değişimleri incelendiğinde il genelinde azalma oranlarının arttığı ve % 2'nin altında bir azalma beklenmediği görülmektedir. Uzak dönemde ise % 2 – 4 ve % 6 – 8 oranlarında azalma beklenen alanların azaldığı ve % 4 – 6 oranında azalma beklenen alanların önemli bir ölçüde arttığı görülmektedir. RCP 2.6 senaryosuna göre genel olarak Sivas ilinde iklim değişikliğinin az yağış alan bölgeleri daha çok etkileyeceği söylenebilir.

Şekil 7'de RCP 2.6 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş maksimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Haritalara göre yakın dönemde ilde % 10 – 11 ve % 11 – 12 artışların beklendiği bölgelerin, ilin çok büyük bir bölümünü kapladığı görülmektedir. Orta bölümünde ise kuzeyden güneye uzanan bir alanda % 11 – 12 artış beklendiği ve bu bölgeden doğu ve batıya ilerlendikçe oranın azaldığı görülmektedir. Referans dönemle kıyaslandığında maksimum sıcaklıkların yüksek olduğu bölgelerde düşük bölgelere kıyasla daha düşük oranda artış olacağı öngörülmektedir. Orta dönem haritası incelendiğinde, yakın

dönemde % 11 – 12 yükselme beklenen bölgelerde oranların % 10 – 11'e düştüğü ve ilin batı bölümlerine gidildikçe bu oranların % 8,5 – 9'lara düştüğü görülmektedir. Uzak dönemde ise orta dönemde görülen tüm olumlu ve olumsuz değişikliklerin eski haline döndüğü ve yakın dönemle neredeyse birebir aynı desende bir harita elde edildiği görülmektedir.

Şekil 8'de RCP 2.6 senaryosu için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş minimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönemde ilin orta bölümünden kuzey ve güneye gidildikçe % 20 – 25 artış oranlarından % 35 – 40 seviyelerine çıkan bir değişim deseni görülmektedir. İlin doğu ve batı bölümlerinde ise bu oran % 10 – 15 ve % 15 – 20 seviyelerine düşmektedir. Orta dönem haritası incelendiğinde ise yağıştaki durumun aksine yakın döneme kıyasla iklim değişikliğinin etkilerinin azaldığı görülmektedir. İlin genelinde bir iyileşme görülse de orta bölgede büyük bir alanda oranların düşmesi daha fazla dikkat çekmektedir. Uzak dönemde ise RCP 2.6 senaryosunun genel tanımının aksine yakın ve orta döneme

kıyasla daha fazla artış olacağı öngörülmektedir. Bu dönemde ilin orta bölümlerinde % 25 – 30 olarak öngörülen artış, kuzey ve güneye gidildikçe % 35 – 40'lara çıkmakta, batı ve doğuya gidildikçe % 15 – 20 seviyesine düşmektedir. Referans dönem haritasıyla birlikte inceleme yapıldığında ilin daha sıcak bölgelerinde artışın soğuk bölgelere kıyasla daha az olacağı söylenebilir.

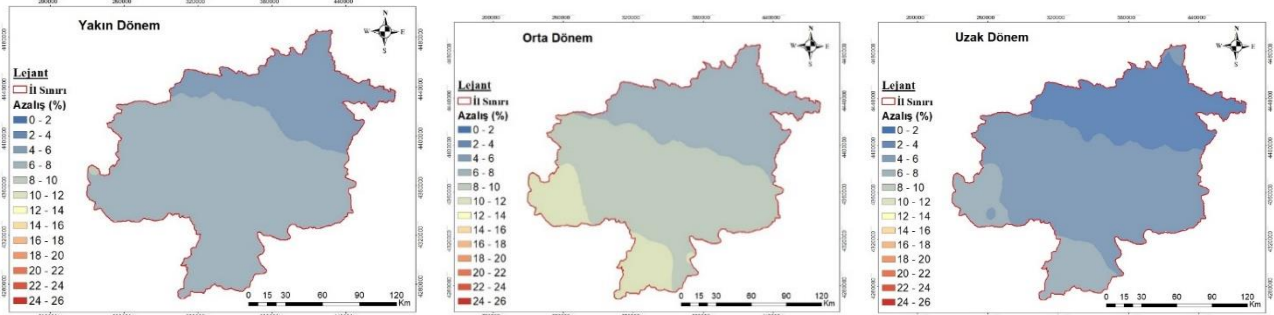
### 3.3 RCP 4.5 senaryosuna göre iklim parametrelerinde oluşacak değişimler

Bir dengede tutma senaryosu olan RCP 4.5'e göre 2100-2150 yılları arasında ışımsal zorlama seviyesi  $4,5 \text{ w/m}^2$ 'ye ulaşacak ve bu değerle dengede tutulacaktır. Bu senaryonun hedefleri RCP 2.6'ya göre daha ulaşılabilir olduğu için gerçekleşmesi daha muhtemeldir ve literatürde üzerine en çok çalışma yapılan senaryodur [8].

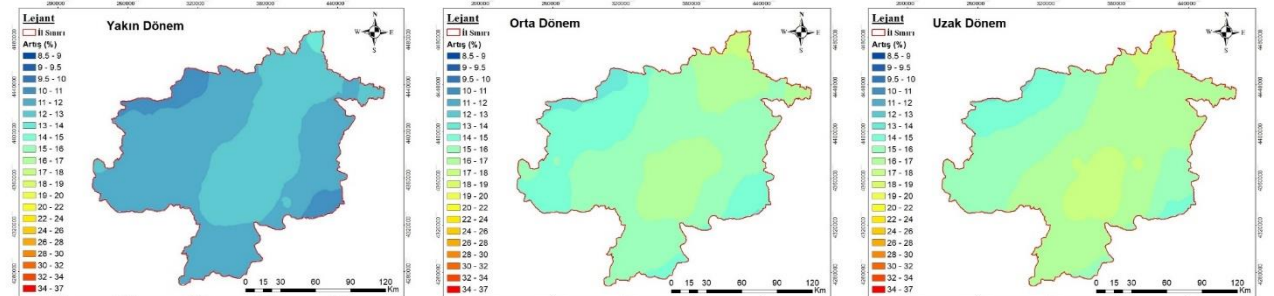
Şekil 9'da bu senaryo ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş yüzde yağış azalış verilerinin mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. RCP 4.5'e göre, yakın dönemde ilin kuzey bölgesinde % 4 – 6 yağış azalması beklenirken geriye kalan daha büyük kısmında ise % 6 – 8 azalma beklenmektedir. Orta dönemde ise tahminler bir kademe daha kötüleşmekte ve kuzey bölümde % 6 – 8 oranlarında azalma beklenmektedir. İlin güneyinde ve batısında küçük birer alanda % 10 – 12 ve geriye kalan büyük bir alanda ise % 8 – 10 azalma beklenmektedir. Uzak dönemde ise yağış azalma oranları yakın döneme göre dahi iyi bir hal alacaktır. Uzak dönemde ilin kuzeyinde % 2 – 4

oranında, güneyinde ve batısında ise küçük birer alanda % 6 – 8 oranında ve geriye kalan büyük bir alanda da % 5 – 6 oranında azalma beklenmektedir.

Şekil 10'da RCP 4.5 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş maksimum sıcaklık artış verilerinin mekânsal dağılım haritaları sunulmuştur. Yakın dönemde ilin orta bölümünde kuzeyden güneye uzanan bir alanda % 12 – 13 maksimum sıcaklık artışı beklenmektedir. İlin geri kalan bölümünde çoğunlukla % 11 – 12 artış beklenirken çok küçük bir alanda ise % 10 – 11 oranında artış beklenmektedir. Orta dönemde ilin orta ve kuzey bölgelerinde iki alanda % 16 – 17, doğu ve batı bölümünde % 14 – 15 ve geri kalan alanların büyük bir bölümünde de % 15 – 16 oranlarında artış olması beklenmektedir. Oldukça küçük bir alanda ise % 13 – 14 ve % 17 – 18 oranlarında artış olacağı öngörülmektedir. Model sonuçlarına göre uzak dönemde orta dönem için oluşturulan harita ile benzer bölgelerde 1 kademe daha fazla artış oranları beklenmekte olup ilin genelinde maksimum sıcaklık ortalamalarının % 14 – 18 oranlarında artacağı öngörülmektedir. RCP 4.5 senaryosunda, yağış parametresinin aksine maksimum sıcaklıklarda, yakın dönemden uzak döneme sürekli olumsuz yönde ilerleyen bir tablo karşımıza çıkmaktadır.

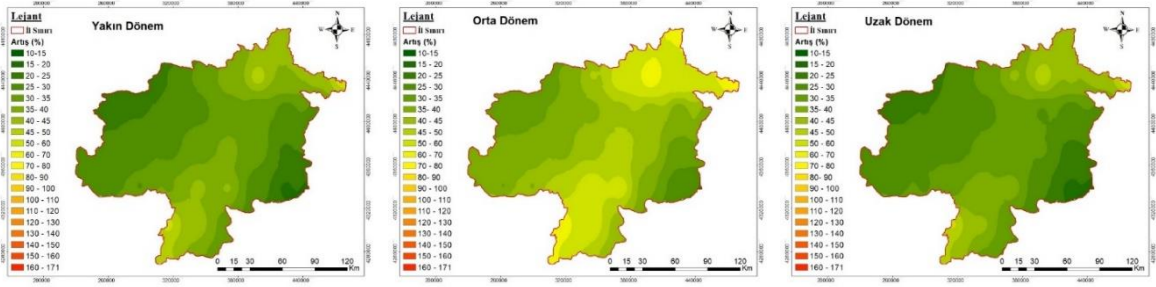


Şekil 9. RCP 4.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama yağış azalma oranları haritası.

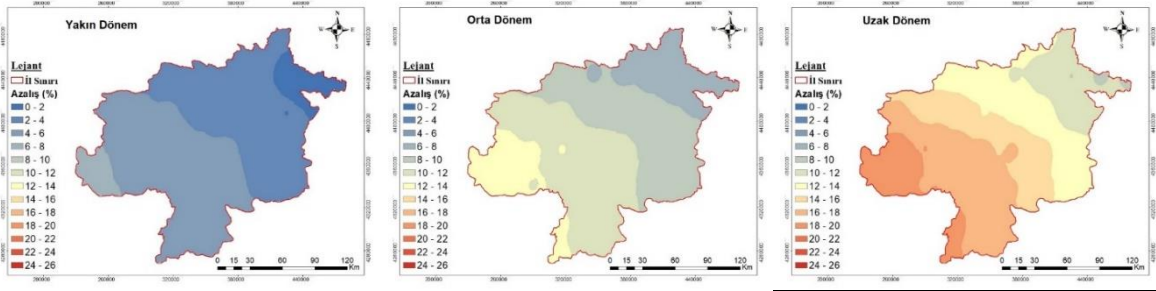


Şekil 10. RCP 4.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama maksimum sıcaklık artış oranları haritası.

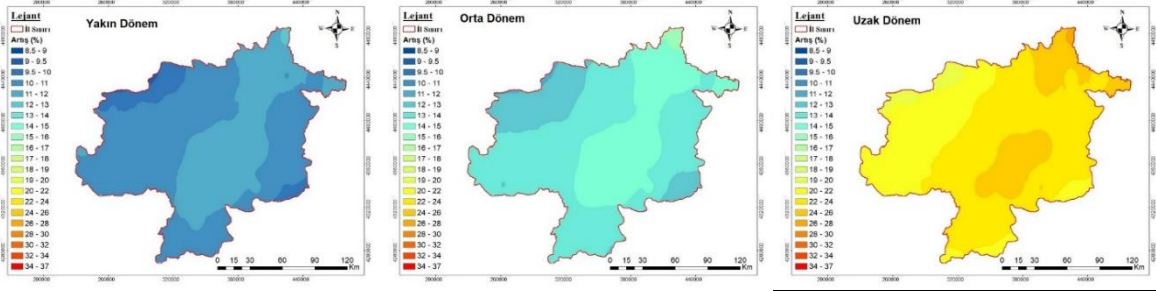




Şekil 11. RCP 4.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama minimum sıcaklık artış oranları haritası.



Şekil 12. RCP 6.0 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama yağış azalma oranları haritası.



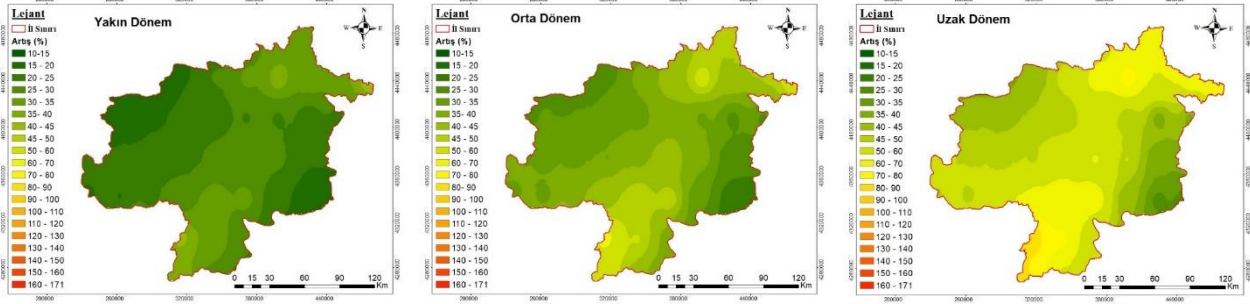
Şekil 13. RCP 6.0 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama maksimum sıcaklık artış oranları haritası.

Şekil 11’de RCP 4.5 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş yüzde minimum sıcaklık artış verilerinin mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönemde çalışılan alanın orta bölgelerinde % 30 – 35 olan artış oranları kuzey ve güneye gidildikçe % 45 – 50 seviyelerine çıkmaktadır. İlin doğu ve batı bölümlerinde ise bu oranlar % 20 – 25 civarına düşmektedir. Orta dönem haritası incelendiğinde ise orta bölgelerde % 40 – 45 artışlar beklendiği, kuzey ve güney bölgelerde bu beklentinin % 60 – 65’ e kadar çıktığı görülmektedir. Doğu ve batı bölgelerine doğru bu beklentinin kademe kademe % 25 – 30’ a kadar düştüğü görülmektedir. Uzak dönemde ise orta döneme kıyasla daha olumlu bir tablo karşımıza çıkmaktadır. Uzak dönem için yakın dönem haritasının desen ve oranlarına oldukça benzer bir dağılım elde edilmiştir. Bu haritaya göre yakın dönemden farklı olarak alanın orta bölgelerinde % 30 – 35 artış beklenen alanların daha fazla olduğu görülmektedir.

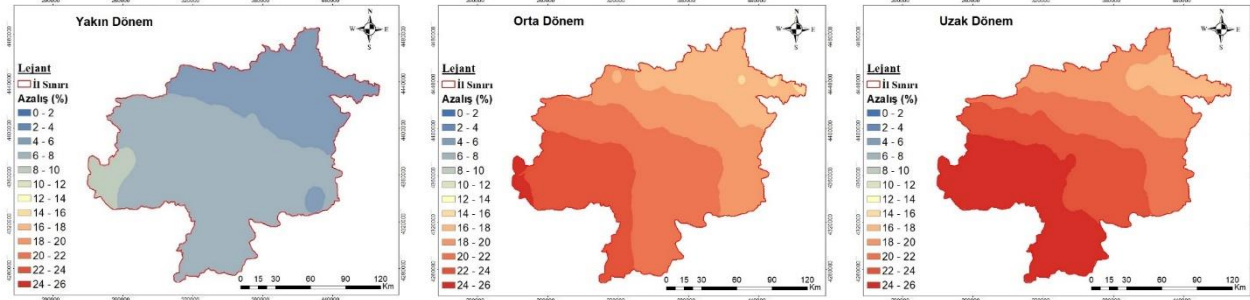
### 3.4 RCP 6.0 senaryosuna göre iklim parametrelerinde oluşacak değişimler

RCP 6.0 senaryosu, iklim değişikliği sorununa zamanında çözüm bulunulmadığı ancak geç de olsa sorunun kontrol altına alındığı bir senaryodur. Senaryoda ışınimsal zorlamanın 2100 yılına kadar sürekli artacağı ve 2100’den sonra yaklaşık  $6w/m^2$  civarında sabitleneceği varsayılmaktadır [8].

Şekil 12’de bu senaryo ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş yüzde yağış azalış verilerinin mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönemde ilde 2 farklı oranda yağış azalma beklentisi hâkimdir. Bunlardan doğu kısımda kalan alanda % 2 – 4 batı kısımda kalan ise % 4 – 6 azalma beklenmektedir. Bu alanlar haricinde ilin doğu ucunda % 0 – 2 batı ucunda ise % 6 – 8 azalma beklenen iki küçük alan bulunmaktadır. Orta dönemde ise kuzey doğudan güney batıya doğru artan oranlarda yağış azalması beklendiği görülmektedir. Kuzey doğu bölgesinde % 6 – 8 olan azalma oranları kademe kademe % 12 – 14’e kadar çıkmaktadır. Uzak dönem için oluşturulan haritada ise orta döneme göre iklim değişikliği etkilerinin önemli derecede artacağı görülmektedir. Uzak dönemde ilin kuzey doğu bölgesinde % 10 – 12 yağış azalması beklenirken güney doğuya inildikçe bu oran % 18 – 20’ye ulaşmaktadır.



Şekil 14. RCP 6.0 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama minimum sıcaklık artış oranları haritası.



Şekil 15. RCP 8.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama yağış azalma oranları haritası.

Şekil 13'te RCP 6.0 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş maksimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönem haritası, RCP 4.5 senaryosu için oluşturulan haritayla benzer desenlere sahiptir ancak daha düşük artış oranları görülmektedir. İlin orta bölümünde kuzeyden güneye uzanan bir alanda % 11 – 12 maksimum sıcaklık artışı beklenmektedir. İlin geri kalanında genel olarak % 10 – 11 oranında artma beklenirken, doğu ve batı bölümünde küçük birer alanda % 9.5 – 10 artma beklenmektedir. Orta dönemde de benzer desenlerde daha yüksek oranlara sahip bir mekânsal dağılım haritası elde edilmiştir. İlin orta bölümündeki alanda % 14 – 15 ve geri kalan büyük alanda % 13 – 14 oranında artma beklenmektedir. Orta dönem haritasında doğu ve batı bölgelerinde bulunan alanlarda % 12 – 13 artış beklenmekte ve yakın döneme göre kapladıkları etki alanının büyüdüğü görülmektedir. Uzak dönemde ise iklim değişikliği etkilerinin katlanarak arttığı görülmektedir. Bu dönemde ilin orta ve kuzey bölgesinde iki alanda % 24 – 26, batı bölgesinde büyük bir alanda % 20 – 22 ve geri kalan büyük alanda % 22 – 24 oranlarında artış beklenmektedir.

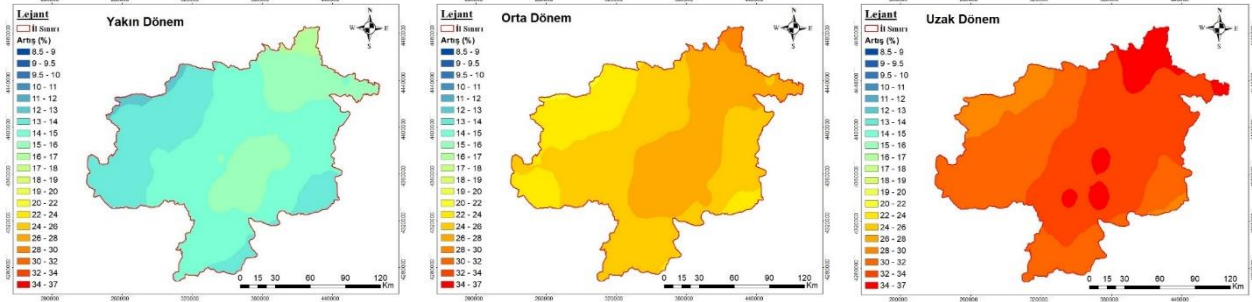
Şekil 14'de RCP 6.0 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş minimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönemde ilin orta bölgesinde bulunan alanda % 25 – 30 oranında artış beklenmektedir. Bu bölgeden doğu ve batıya ilerlendikçe bu oranlar % 15 – 20'ye kadar düşmekte, kuzey ve güney uçlara ilerlendikçe % 35 – 40'a çıkmaktadır. Orta dönemde bu oranlar yükselerek orta bölgede % 35 – 40'a, doğu ve batı bölgelerde % 25 – 30'a, kuzey ve güney uçlarda % 50 – 55'e çıkmıştır. Uzak dönem haritası incelendiğinde ise iklim değişikliğinin minimum sıcaklık parametresi üzerindeki etkisini oldukça artıracaktır.

görülmektedir. Bu dönemde orta bölgede % 50 – 55 oranında artış beklenirken bu oran kuzey bölgelerde % 70 – 75'e güney bölgede % 80 – 85'e çıkmakta, batı bölgesinde % 40 – 45 doğu bölgesinde ise % 25 – 30'a kadar düşmektedir.

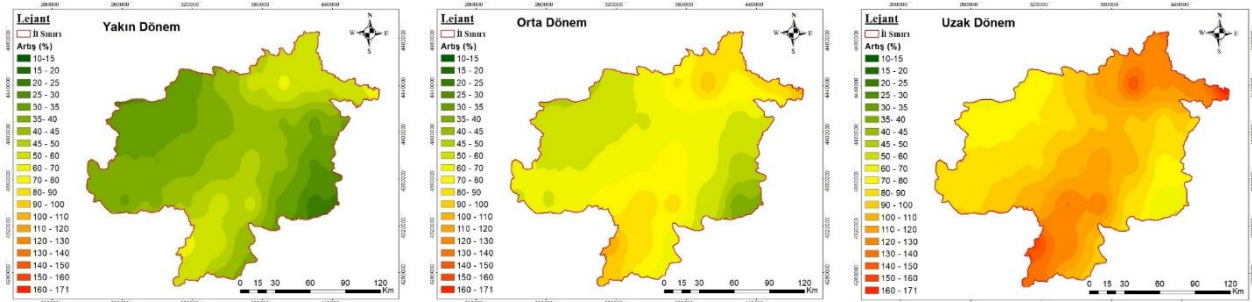
### 3.5 RCP 8.5 senaryosuna göre iklim parametrelerinde oluşacak değişimler

RCP 8.5 senaryosu, IPCC tarafından sunulmuş en olumsuz senaryodur. İklim değişikliğinin olası etkileri göz önünde bulundurulursa bir felaket senaryosu olarak da değerlendirilebilir. Senaryoda ısınmsal zorlamanın 2100 yılına kadar sürekli artacağı ve 2200'den sonra yaklaşık 8.5w/m<sup>2</sup> civarında sabitleneceği varsayılmaktadır [8].

Şekil 15'te bu senaryo için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönemlerde beklenen yıllık ortalama yağış miktarlarındaki azalma oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Yakın dönemde ilin kuzey bölgesinde % 4 – 6 güneyinde ise % 6 – 8 oranında azalma beklenen iki büyük alan bulunmaktadır. Bunun haricinde doğu bölgesinde % 4 – 6 batı bölgesinde ise % 8 – 10 azalma beklenen iki küçük alan bulunmaktadır. Bu senaryoda yakın dönem haritası, gerek oran gerekse desen bakımından RCP 4.5 senaryosunun haritasıyla oldukça benzerlik göstermektedir. Orta dönem haritası incelendiğinde ise iklim değişikliği etkilerinin katlanarak artacağı görülmektedir. Kuzey doğu bölgesinde % 16 – 18 seviyesine çıkan oranlar güney batıya ilerlendikçe % 24 – 26 seviyelerine çıkmaktadır. Uzak dönemde ise ilin alması beklenen yağış miktarları daha da düşmektedir. Bu dönemde ilin alacağı yağış skalası orta döneme göre değişmeyecek ancak yüksek azalma oranlarının olduğu alanlar genişleyerek ili daha fazla etkisi altına alacaktır. İlde en fazla alanda etkili olan skalanın % 24 – 26 olacağı görülmektedir.



Şekil 16. RCP 8.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama maksimum sıcaklık artış oranları haritası.



Şekil 17. RCP 8.5 için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem ortalama minimum sıcaklık artış oranları haritası.

Şekil 16'da RCP 6.0 senaryosu ile yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş maksimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları sunulmuştur. Yakın dönemde ilde %12'den %17'ye uzanan bir skalada maksimum sıcaklık değerlerinin artması beklenmektedir. Yüksek oranlarda değişimler daha çok ilin kuzey ve orta bölgelerinde beklenirken güneydoğu ve kuzeybatı bölgelerine doğru bu oranların düştüğü görülmektedir. Senaryoda beklenen ışınimsal zorlama seviyesinin artmasıyla birlikte orta dönemde iklim değişikliği etkilerinin de artması beklenmektedir. Orta dönemde %23'ten %30'a kadar artan bir oranda maksimum sıcaklık artışları beklenmektedir. Orta dönemde sıcaklık oranlarının artacağı ancak harita deseninde önemli bir değişim olmayacağı görülmektedir. Uzak dönemde ise orta döneme göre daha yüksek değişim oranlarına sahip ancak benzer desende değişim haritası elde edilmiştir. Bu dönemde %28'den %37'ye kadar çıkan bir aralıkta sıcaklık artışları beklenmektedir.

Şekil 17'de RCP 8.5 senaryosu için yakın dönem, orta dönem ve uzak dönem için oluşturulmuş minimum sıcaklık artış oranlarının mekânsal dağılım haritaları verilmiştir. Bu senaryo için oluşturulmuş minimum sıcaklık değişim haritalarının desenleri, diğer senaryolar için oluşturulan haritalarla benzerlik göstermektedir. Bütün dönemlerde ilin orta bölgesinden doğu ve batıya gidildikçe değişim oranları düşmekte, kuzey ve güney uçlara gidildikçe değişim oranları artmaktadır. Yakın dönemde %20'den %70'e kadar değişen oranda minimum sıcaklık değerlerinin artması beklenmektedir. Orta dönemde bu skala %35'ten başlayıp %110'a çıkmaktadır. Uzak dönemde ise beklenen en düşük

değişim oranı %65'e, en yüksek değişim oranı ise %171'e kadar çıkmıştır.

#### 4 Sonuç ve tartışma

Bu çalışmada bir küresel model veri setine istatistiksel ölçek küçültme uygulanarak Sivas ili için RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 ve RCP 8.5 senaryolarına göre iklim değişikliği projeksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen veriler referans dönem, yakın dönem ve uzak dönem olarak sınıflandırılarak her dönem için ortalama yıllık yağış, ortalama maksimum sıcaklık ve ortalama minimum sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere coğrafi bilgi sistemi yazılımı aracılığıyla interpolasyon uygulanarak mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuş ve değerlendirme bu haritalar üzerinden yapılmıştır.

Çalışmada elde edilen bulgulara göre; değerlendirme yapılan tüm senaryolarda ilin alacağı ortalama yıllık yağışın düşeceği görülmüştür. Referans dönemde yıllık ortalama 638 – 2066 mm aralığında yağış dağılımı olan ilde, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 ve RCP 8.5 senaryolarının gerçekleşmesi durumunda sırasıyla %0 – 8, %4 – 12, %0 – 20 ve %4 – 26 oranlarında yağış azalması yaşanacağı öngörülmüştür. Yağış azalma oranlarının mekânsal dağılımlarına bakıldığında genel olarak, referans dönemde az yağış alan bölgelerde yüksek oranda, çok yağış alan bölgelerde ise düşük oranda azalma olacağı öngörülmüştür. Dolayısıyla Sivas'ta iklim değişikliği etkilerinin az yağış alan bölgelerde daha şiddetli görüleceği söylenebilir.

İklim değişikliği etkilerinin değerlendirilmesi çalışmalarında en önemli parametrelerden biri maksimum sıcaklık parametresidir. Sivas'ta referans dönemde 13,5-18,3°C aralığında ortalama maksimum sıcaklık dağılımı

olduğu görülmüştür. İlin en fazla yağış alan kuzey bölgesi aynı zamanda en düşük maksimum sıcaklıkların görüldüğü bölgedir. Projeksiyon oluşturulan tüm senaryolarda maksimum sıcaklıklarda artış olacağı görülmüştür. RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 ve RCP 8.5 senaryolarında sırasıyla %8,5 – 12, %10 – 18, %9,5 – 24 ve %12 – 37 oranlarında artışlar yaşanacağı öngörülmüştür. Sivas'ta, referans dönemde düşük maksimum sıcaklıkların görüldüğü alanlarda yüksek oranlarda değişim olacağı, yüksek sıcaklıkların görüldüğü bölgelerde ise düşük oranlarda değişim yaşanacağı yargısına varılmıştır.

Çalışma kapsamında değerlendirme yapılmış olan son parametre ortalama minimum sıcaklık parametresidir. Referans dönem için oluşturulmuş mekânsal dağılım haritasında 1,3 – 4,6 °C aralığında ortalama minimum sıcaklık dağılımı olmuştur. Maksimum sıcaklıklarda olduğu gibi minimum sıcaklıklarda da tüm senaryolarda artış olacağı hesaplanmıştır. RCP 2.6 senaryosunda %10 – 40, RCP 4.5 senaryosunda %20 – 65, RCP 6.0 senaryosunda %15 – 85 ve RCP 8.5 senaryosunda %20 – 171 oranlarında artışlar olacağı öngörüsü oluşturulmuştur. Maksimum sıcaklık parametresi için bahsedilen “Sivas'ta referans dönemde düşük maksimum sıcaklıkların görüldüğü alanlarda yüksek oranlarda değişim olacağı, yüksek sıcaklıkların görüldüğü bölgelerde ise düşük oranlarda değişim yaşanacağı” yargısı minimum sıcaklık parametresi için de geçerlidir.

Sıcaklıkların yükselmesi ve yağışların azalmasıyla hem toprağın niteliği değişebilmekte hem de yüzey sularında kayıplar yaşanmaktadır. Dolayısıyla iklim değişikliğinin etkileri gıda üretiminde miktar ve kalite düşmesi olarak kendini göstermektedir [40]. Bu durum Sivas'ta kırsal kalkınma için de önemli bir sorun oluşturmaktadır. Yeraltı suları bu durum karşısında güvence olabilecek stratejik nitelikte su kaynaklarıdır. Ancak çalışma alanında yıllık yağışların azalması bu kaynağı da olumsuz etkilemektedir.

Abiyotik stres kaynağı olan yüksek sıcaklık ve kuraklık, bitkilerin vejetatif ve generatif gelişim aşamalarını etkileyerek verim üzerinde aditif ve sinerjistik bir olumsuzluğa neden olmaktadır [41-43]. Sivas'ta iklim değişikliği senaryolarında yağış azalmalarının yüksek oranda olacağı bölgelerle maksimum sıcaklık artışının yüksek olacağı bölgelerin çakışmıyor olması bu bağlamda olumlu bir nokta olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sivas ilinde tarımsal faaliyetlerde önemli bir yeri olan buğday yetiştiriciliği, ilin tarım alanlarının yaklaşık %24'nü kaplamaktadır [44]. Buğday bitkisinde optimum sıcaklık değerinin 1°C üzerine çıktığında 16,2 – 57 kg/da verim kaybı yaşanabilmekte, 2 – 5 °C' lik bir artışta ise yıkıcı kayıplar yaşanabilmektedir [43, 45]. RCP senaryolarına göre uzak dönemde 1,6 – 5,5 °C arasında maksimum sıcaklık artışları beklenmektedir. Dolayısıyla Sivas'ta sıcaklık artışları, tarım sektöründe önlem alınması gereken bir sorun oluşturacaktır.

Sonuç olarak iklim değişikliğinin Sivas ilinde biyoçeşitliliğin azalması, ekolojik bozulmalar, tarımsal verim ve kalitenin düşmesi, temiz su kaynaklarına erişimin zorlaşması gibi birçok soruna yol açması muhtemeldir. İklim parametrelerinde tahmin edilen değişikliklerin spesifik türler

üzerinde olası etkilerinin araştırılması ve bu etkilerin azaltılması için önlem alınması önem taşımaktadır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (Turnitin): %9

#### Kaynaklar

- [1] M.T. Turp, T. Öztürk, M. Türkeş ve M.L. Kurnaz, RegCM4.3.5 bölgesel iklim modelini kullanarak Türkiye ve çevresi bölgelerinin yakın gelecekteki hava sıcaklığı ve yağış klimatolojileri için öngörülen değişikliklerin incelenmesi. Ege Coğrafya Dergisi, 23(1), 1-24, 2014.
- [2] H. Gürkan, H. Arabacı, M. Demircan, O. Eskioğlu, S. Şensoy ve B. Yazıcı, GFDL-ESM2M Modeli Temelinde RCP4.5 ve RCP8.5 Senaryolarına Göre Türkiye İçin Sıcaklık ve Yağış Projeksiyonları. Coğrafi Bilimler Dergisi, 14 (2), 77- 88, 2016. [https://doi.org/10.1501/Cogbil\\_0000000174](https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000174).
- [3] B. Timbal, E. Fernandez and Z. Li, Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. Environmental Modelling & Software, 24, 341–358, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.07.007>.
- [4] A. Aygün ve S. E. Torlak, Denizli İli'nin iklim değişikliğine karşı dayanıklılığının incelenmesi. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg., 9(1), 648- 664, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.629809>.
- [5] D. P. Van Vuuren, J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey and J. F. Lamarque, The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109, 5-31, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- [6] T. Bolch, A. Kulkarni, A. Käab, C. Huggel, F. Paul, J. Cogley and M. Scheel, The state and fate of Himalayan glaciers, Science, 336 (6079), 310–314, 2012. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>.
- [7] Y. Kızılelma, M. A. Çelik ve M. Karabulut, İç Anadolu Bölgesinde sıcaklık ve yağışların trend analizi. Türk Coğrafya Dergisi, 64, 1-10, 2015. <https://doi.org/10.17211/tcd.90494>.
- [8] IPCC, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, New York, USA, 2013.
- [9] P. Blanco-Gómez, P. Jimeno-Sáez, J. Senent-Aparicio and Julio Pérez-Sánchez, Impact of Climate Change on Water Balance Components and Droughts in the Guajoyo River Basin (El Salvador). Water, 11, 2360, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112360>.
- [10] G. A. Meehl, C. Covey, T. L. Delworth, M. Latif, B. McAveney, J. F. B. Mitchell and K. E. Taylor, The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. Bulletin of the American Meteorological Society, 88, 1383–1394, 2007. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>.

- [11] M. L. Bettolli and O. C. Penalba, Synoptic sea level pressure patterns-daily rainfall relationship over the Argentine Pampas in a multi-model simulation. *Meteorological Applications*, 21, 376–383, 2014. <https://doi.org/10.1002/met.1349>.
- [12] R. Maenza, E. A. AgostaScarel and M. L. Bettolli, Climate change and precipitation variability over the western “Pampas” in Argentina. *International Journal of Climatology*, 37, 445–463, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5014>.
- [13] G. Silvestri and C. Vera, Evaluation of the WCRP-CMIP3 model simulations in the La Plata Basin. *Meteorological Applications*, 15, 497–502, 2008. <https://doi.org/10.1002/met.98>.
- [14] S. Ghosh and P. P. Mujumdar, Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. *Advances in Water Resources*, 31, 132–146, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.07.005>.
- [15] S. Spak, T. Holloway, B. Lynn and R. Goldberg, A comparison of statistical and dynamical downscaling for surface temperature in North America. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-10, 2007. <https://doi.org/10.1029/2005JD006712>.
- [16] S.D. Tumbo, E. Mpeti, M. Tadross, F.C. Kahimba, B.P. Mbillinyi and H.F. Mahoo, Application of self-organizing maps technique in downscaling GCMs climate change projections for Same, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35, 608–617, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.023>.
- [17] P. D. Jones, J. M. Murphy and M. Noguer, Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model, I: assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 121, 1413–1449, 1995. <https://doi.org/10.1002/qj.49712152610>.
- [18] V. K. Singh and D. Kumar, Downscaling daily precipitation over the Upper Shivnath basin: A comparison of three statistical downscaling techniques. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(1), 1676-1688, 2020. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.901.185>.
- [19] R. G. Crane and B. C. Hewitson, Doubled CO2 precipitation changes for the Susquehanna Basin: down-scaling from the genesis general circulation model. *International Journal of Climatology*, 18, 65-76, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970088\(199801\)18:1<65::AID-JOC222>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970088(199801)18:1<65::AID-JOC222>3.0.CO;2-9).
- [20] C. G. Menéndez, M. de Castro, J.-P. Boulanger, A. D’Onofrio, E. Sanchez, A. A. Sörensson, J. Blazquez, A. Elizalde, D. Jacob, H. Le Treut, Z. X. Li, M. N. Núñez, N. Pessacq, S. Pfeiffer, M. Rojas, A. Rolla, P. Samuelsson, S. A. Solman and C. Teichmann, Downscaling extreme month-long anomalies in southern South America. *Climatic Change*, 98, 379–403, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9739-3>.
- [21] H. Tath, New statistical downscaling methods and application for Turkey. Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University, Turkey, 2004.
- [22] R. Huth, J. Miksovsky, P. Stepanek, M. Belda, A. Farda, Z. Chladova and P. Pišoft, Comparative validation of statistical and dynamical downscaling models on a dense grid in central Europe: Temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 120, 533–553, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1190-3>.
- [23] R. L. Wilby, S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, C. G. Menéndez, M. de Castro, J.-P. Boulanger, A. D’Onofrio, E. Sanchez, A. A. Sörensson, ... and C. Teichmann, Downscaling extreme month-long anomalies in southern South America. *Climatic Change*, 98, 379–403, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9739-3>.
- [24] Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği. Meteoroloji Genel Müdürlüğü Matbaası Ankara, Türkiye, 2015.
- [25] B. Cırci Selçuk ve M. A. Irmak, A study on the adequacy and requirement of urban active green areas in Sivas. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(02), 2209-2220, 2022.
- [26] B. Çirci Selçuk, Sivas kenti açık ve yeşil alanlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [27] Harita Genel Müdürlüğü, Türkiye mülki idare bölümleri haritası. <https://www.harita.gov.tr/urun/turkiye-mulk-idare-bolumleri-haritasi/189>, Erişim 11.03.2022.
- [28] Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Earth System Models. <https://www.gfdl.noaa.gov/earth-system-model/>, Erişim 25.04.2022.
- [29] A. S. Vaghefi, N. Abbaspour, B. Kamali and K. C. Abbaspour, A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, 96, 181-198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033>.
- [30] Z.E. Asong, M.N. Khaliq and H.S. Wheeler, Multisite multivariate modeling of daily precipitation and temperature in the Canadian Prairie Provinces using generalized linear models. *Climate Dynamics*, 47 (9), 2901-2921, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3004-z>.
- [31] A. Dosio and P. Paruolo, Bias correction of the ENSEMBLES high-resolution climate change projections for use by impact models: evaluation on the present climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 116 (22), 2011. <https://doi.org/10.1029/2011JD015934>.
- [32] S. Hagemann, C. Chen, J.O. Haerter, J. Heinke, D. Gerten and C. Piani, Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of Hydrometeorology*, 12 (4), 556-578, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1336.1>.

- [33] G. Cüceloğlu, İklim değişikliğinin İstanbul'un yüzeysel su kaynaklarına etkisi ve kuraklık dirençli bütünleşik su yönetimi. Doktora Tezi, İTÜ Fenbilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [34] G. Z. Ndhlovu and Y. E. Woyessa, Use of gridded climate data for hydrological modelling in the Zambezi River Basin, Southern Africa. *Journal of Hydrology*, 602, 126749, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126749>.
- [35] P. Anuchaivong, D. Sukawat and A. Luadsong, Statistical Downscaling for Rainfall Forecasts Using Modified Constructed Analog Method in Thailand. *The Scientific World Journal*, 2017, 24, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1075868>.
- [36] N. Farahnaz, A. A. Kuntoro and M. S. B. Kusuma, Statistical Downscaling for the Projection of the Keetch Byram Drought Index in the Barito Basin. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 10(2), 873-879, 2020. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.2.10102>.
- [37] SWAT, CFSR Global Weather Data for SWAT 1979-2014, <https://swat.tamu.edu/data/cfsr>, Erişim 25.04.2022.
- [38] S. Saha, S. Moorthi, H.L. Pan, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, R. Kistler, J. Woollen, D. Behringer, et al., The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1057, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- [39] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, İstasyon Bilgileri Veritabanı. <https://mgm.gov.tr/kurumsal/istasyonlarimi.z.aspx>, Erişim 11.03.2022.
- [40] E. S. Turan, Türkiye'nin İklim Değişikliğine Bağlı Kuraklık Durumu. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(1), 63-69, 2018. <https://doi.org/10.213247/dacd.357384>.
- [41] B. Grigorova, I. Vaseva, K. Demirevska and U. Feller, Combined drought and heat stress in wheat: Changes in some heat shock proteins. *Biologia plantarum*, 55, 105-111, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0014-x>.
- [42] A.D. Sharma and P. Kaur, Combined effect of drought stress and heat shock on cyclophilin protein expression in *Triticum aestivum*. *General and Applied Plant Physiology*, 35(1-2), 88-92, 2009.
- [43] Ç. Sayılğan, Küresel Sıcaklık Artışının Buğdayda Beklenen Etkileri ve Yüksek Sıcaklığa Toleranslılığın Fizyolojik Göstergeleri. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 26(3): 439-447, 2016.
- [44] T. Karaköy, Sivas Atlası. K. Ş. Kavak (Ed.), SVS Yayınları, 329-349.
- [45] J.W. White and M.P. Reynolds, A Physiological Perspective on Modeling Temperature Response in Wheat and Maize Crops. *Modeling Temperature Response in Wheat and Maize*, Proceedings of a Workshop, pp. 8-17, El Batán, Mexico, 23-25 April 2001.





## Mann-Kendall trend analizi ile Sivas ilindeki sıcaklık ve yağış trendlerinin belirlenmesi

### Determination of temperature and precipitation trends in Sivas by Mann-Kendall trend analysis

Can Bülent Karakuş<sup>1\*</sup>, Ülker Aslı Güler<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mimarlık, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmanın amacı; Sivas ilindeki 9 meteoroloji istasyonu için sıcaklık ve yağış trendlerinin ortaya konulmasıdır. Bu meteoroloji istasyonlarının farklı rasat yılı aralıklarındaki sıcaklık ve yağış verileri (Sivas Merkez (1929-2019), Kangal (1959-2019), Suşehri (1970-2019), Zara (1964-2019), Divriği (1959-2019), Gemerek (1963-2019), Gürün (1964-2019), Şarkışla (1963-2019) ve Ulaş (1957-2019)) Sivas Meteoroloji Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Mann-Kendall trend testi yardımıyla ilkbahar, yaz, sonbahar, kış ve yıllık periyot için trend analizi gerçekleştirilmiştir. Gürün ve Ulaş ilçeleri dışındaki tüm istasyonlarda yıllık ortalama sıcaklık değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlı bir artış trendi gösterdiği belirlenmiştir. Yıllık ortalama yağış değerleri açısından ise Kangal, Şarkışla ve Ulaş ilçelerinde istatistiksel açıdan anlamlı bir azalış trendi görülmüştür. Sivas Merkez istasyon için sıcaklık değerleri ortalama 2 °C artış göstermiş, yağış değerleri ise 10 mm azalış göstermiştir. Çalışma alanının genelinde sıcaklıklar artış göstermiş, Şarkışla ve Ulaş ilçelerinde yağış değerleri azalmıştır. Bu çalışma, sıcaklık ve yağış trendlerindeki değişimlerin çalışma alanındaki iklim değişikliği olgusunu desteklediğini ortaya koymuştur. Çalışma sonuçlarının iklim kaynaklı risklere ve su kaynakları yönetimine yardımcı olması beklenmektedir.

**Anahtar kelimeler:** İklim değişikliği, Sıcaklık, Yağış, Mann-Kendall trend analizi

#### 1 Giriş

Son yıllarda en dikkat çeken konuların başında küresel iklim değişikliği ve küresel ısınma gelmektedir. Küresel iklim; atmosfer, hidrosfer, krayosfer, biyosfer ve litosfer arasındaki karşılıklı etkileşimden oluşan karmaşık bir sistemdir [1]. Bu sistemde, Yerküre'nin varoluşundan günümüze kadar geçen 4.5 milyar yıl boyunca birçok defa değişim meydana gelmiştir [2]. Geçmişte uzun vadede yaşanan doğal iklim değişim süreçleri; sanayileşmenin artması ve fosil yakıtların plansız ve aşırı miktarda tüketimine bağlı olarak diğer bir ifadeyle, insan müdahalesi

#### Abstract

The aim of this study is to reveal the temperature and precipitation trends for 9 meteorological stations in Sivas. Temperature and precipitation data (Sivas Center (1929-2019), Kangal (1959-2019), Suşehri (1970-2019), Zara (1964-2019), Divriği (1959-2019), Gemerek (1963-2019), Gürün (1964-2019), Şarkışla (1963-2019) and Ulaş (1957-2019)) of these meteorology stations in different observation year intervals were obtained from Sivas Meteorology Directorate. With the help of Mann-Kendall trend test, trend analysis was performed for spring, summer, autumn, winter and annual period. It was determined that the annual average temperature values showed a statistically significant increase trend at all stations except Gürün and Ulaş districts. In terms of annual average precipitation values, a statistically significant decrease trend was observed in Kangal, Şarkışla and Ulaş districts. Temperature values for Sivas Central station increased by 2 °C on average, while precipitation values decreased by 10 mm. Temperatures have increased throughout the study area, and precipitation values have decreased in Şarkışla and Ulaş districts. This study revealed that changes in temperature and precipitation trends support the phenomenon of climate change in the study area. The results of the study are expected to help climate-related risks and water resources management.

**Keywords:** Climate change, Temperature, Precipitation, Mann-Kendall trend analysis

nedeniyle kısa vadede gerçekleşmeye başlamıştır. Özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren iklimler üzerinde etkili olmaya başlayan bu değişim küresel ısınmayı da beraberinde getirmiştir [3]. Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli'nin (IPCC) 2021 yılında çevrimiçi yayınlanan altıncı raporuna göre; iklim değişiminin artarak ve hızla ilerlediği, insan kaynaklı iklim hareketinin dünyanın her bölgesinde aşırı hava ve iklim hareketine yol açtığı ve Dünya'nın tüm iklim sisteminde bu değişikliklerin gözlemlendiği belirtilmektedir [4]. Beklenmeyen ve hızlı bir şekilde gerçekleşen yağışlar, kuraklıklar, sıcaklıklar, fırtınalar, donlar gibi pek çok parametrede bölgenin iklim karakterinin dışında görülen

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: asli.atay@cumhuriyet.edu.tr (Ü. A. Güler)  
Geliş / Received: 15.04.2022 Kabul / Accepted: 31.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1104140

hava olayları iklim düzensizliklerini oluşturmaktadır. Öngörülemez bu iklim düzensizlikleri, dünyada önemli belirsizlikleri de beraberinde getirmektedir. İklim düzensizliklerinin sıklığı ve sürekliliği iklim karakterine de yansımaktadır [5].

İklim sistemi, farklı parametrelerin karşılıklı etkileşiminin bir sonucudur ve genel itibarıyla zaman ve mekân ölçeğinde büyük değişkenliklerin gerçekleştiği dinamik bir yapıya karşılık gelmektedir. İklim sistemi ve bileşenlerinden herhangi birinde gerçekleşen en küçük değişiklik dahi iklim sistemi üzerinde etkili olmaktadır [6]. İklim sistemi çalışmalarının pek çok parametresi bulunmaktadır. Sıcaklık ve yağış temel iklim sisteminin ana elemanlarını oluşturmaktadır. Sıcaklık ve yağışla ilgili elde edilen veriler, yerel ve küresel bazda iklim değişikliklerini anlamada, iklimin karakterini belirlemede ya da belirli bir iklim karakterinin değişmesi ile ilgili konularda ciddi katkılar sağlamaktadır. Örneğin; sıcaklıklarda meydana gelmesi muhtemel küresel nitelikteki artışların, hidrolojik döngüde değişikliğe, deniz, buz ve kara buzullarında erimeye, deniz seviyesinde yükselmeye, sıcak hava dalgalarının sıklığı ve şiddeti üzerinde artışa, bölgesel bazda taşkına ve daha şiddetli ve sık kuraklıklara yol açacağı öngörülmektedir [7-9]. Ayrıca yağışların azalması ve sıcaklığın artmasıyla birlikte oluşan kuraklık, bölgelerin su kaynaklarının azalmasına, enerji, tarım, içme suyu gibi alanlarda su kıtlığı ya da su stresinin oluşmasına, toprakta bitkiler için yeterli suyun bulunmamasına neden olmaktadır [10, 11]. Bu nedenle iklim değişikliği konularında yapılan çalışmaların büyük bir kısmı sıcaklık ve yağış ile ilgili olup bu iki parametrenin özellikle trend analizleri üzerine olanları ağırlık kazanmaktadır [10, 12-15]. Genellikle, yağış ve sıcaklık gibi parametreler üzerine trendi belirlemek için Mann-Kendall yöntemi kullanılmaktadır. Çünkü parametrik olmayan ve verilerin değerlerinden çok sıraları ile ilgili olan Mann-Kendall testi trendin belirlenmesi konusunda oldukça başarılıdır [16]. Bugüne kadar iklim ve iklim elemanları ile ilgili yapılan çalışmalara göre; son yıllarda Türkiye'nin farklı bölgeleri için sıcaklıkların arttığı, yağışların ise azalmakta olduğu bildirilmektedir [10, 17-20]. Yapılan çalışmalara göre; küresel iklim değişikliğinin bölgesel ölçekte meydana getirdiği etkilerden lokasyon olarak Türkiye'nin etkilenmesi beklenmektedir. Çünkü 40° ve 70° kuzey enlemleri arasında uzun süreli ısınma eğilimi daha fazla gerçekleşmektedir [21]. Bu durumda iklim değişikliğinin en büyük etkileri orta ve yüksek enlemlerde yer alan ülkelerde gözlemlenecektir. Türkiye ve dolayısıyla İç Anadolu Bölgesi de coğrafi konumu nedeniyle bu değişimden etkilenecek alanlar arasında yer almaktadır.

İç Anadolu'nun doğusunda yer alan Sivas ilinde de iklimde meydana gelen salınımların vejetasyon süresinin kısılması, arazi degradasyonu ve tarımsal verimin azalması gibi ciddi problemlere yol açması muhtemeldir. Ayrıca, beklenmedik iklim değişiklikleri, bölgedeki su kaynaklarındaki azalmaları gündeme getirmektedir. Sivas'ta sanayi, tarım ve konutlarda kullanılan suyun büyük bir kısmı baraj veya yeraltı suyundan elde edilmektedir. Son yıllarda meydana gelen bu beklenmedik iklim değişiklikleri nedeniyle su kaynakları üzerinde baskı hissedilmeye

başlanmıştır. Bu nedenlerden dolayı, yağış ve sıcaklık gibi meteorolojik verilere trend analizlerinin uygulanması olası iklim değişikliğini belirlemek açısından çok daha önemli hale gelmektedir. Daha önce; Kızılelma ve diğ. [3], tarafından yapılan çalışmada; Sivas ilini de içeren İç Anadolu bölgesindeki 1970-2020 yılları arası sıcaklık ve yağışların trend analizi yapılmıştır. Terzi ve İlker [22] tarafından yapılan bir çalışmada da, 1980-2017 yılları aralığında elde edilen veriler ile Kızılırmak havzasının yağış verileri değerlendirilmiştir. Ancak bu çalışmalar geniş alanları kapsamaması nedeniyle Sivas ayrıntılı olarak ele alınamamıştır. Bu nedenle; çalışmamızda; Türkiye'de meydana gelen iklimsel değişikliklerin yerel ölçekteki etkisini belirlemek amacıyla Sivas iline ait farklı zaman aralıklarında (Sivas Merkez (1929-2019), Kangal (1959-2019), Suşehri (1970-2019), Zara (1964-2019), Divriği (1959-2019), Gemerek (1963-2019), Gürün (1964-2019), Şarkışla (1963-2019) ve Ulaş (1957-2019)) atmosfer kökenli sıcaklık ve yağış trendlerindeki eğilimlerin belirlenmesi ve bunların periyodik olup olmadığının anlaşılması amaçlanmıştır. Bu amaçla; Sivas ilinde yer alan dokuz meteoroloji istasyonunun farklı zaman aralıklarındaki sıcaklık ve yağış verileri Mann-Kendall yöntemi ile ilkbahar, yaz, sonbahar, kış ve yıllık periyotlar için incelenmiştir.

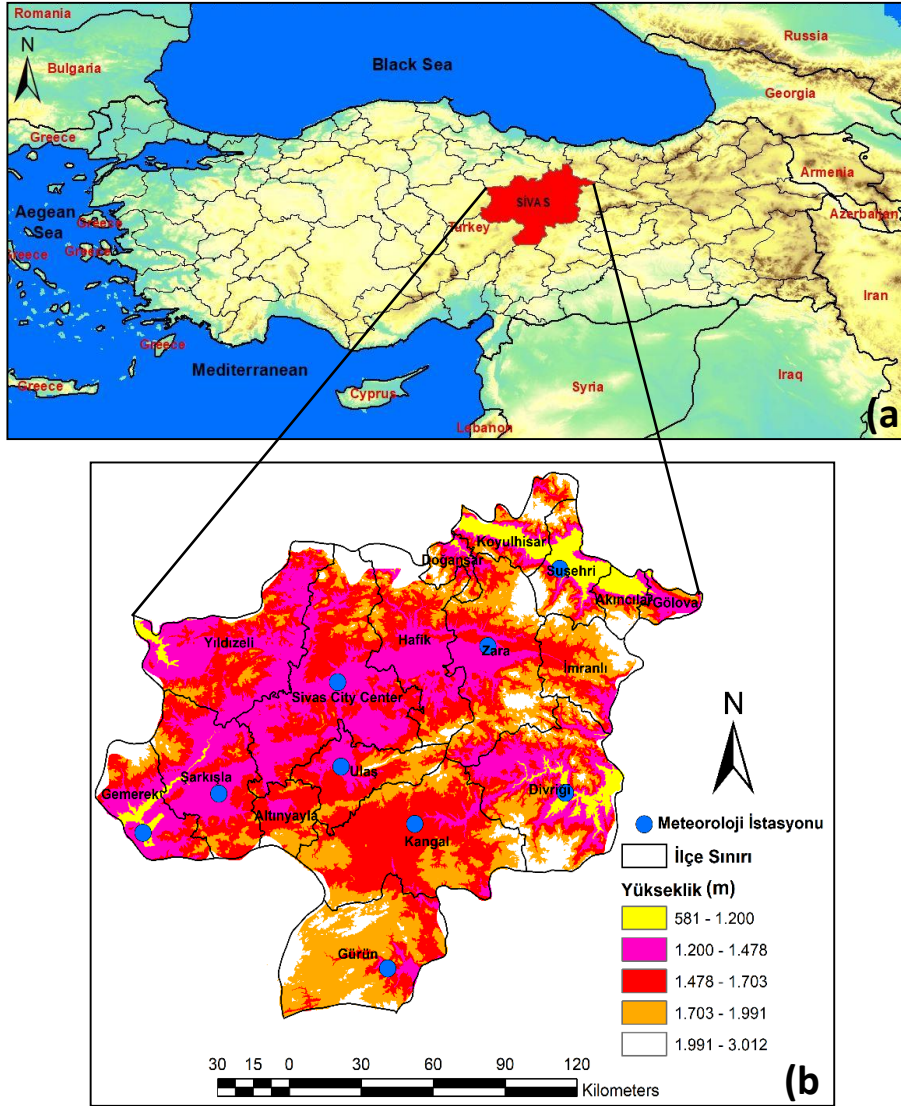
## 2 Materyal ve metod

Sivas, Anadolu yarımadasının ortasında, İç Anadolu Bölgesi'nin Yukarı Kızılırmak bölümünde yer alır. 36° ve 39° doğu boylamları ile 38° ve 41° kuzey enlemleri arasında kalır. 28.488 km<sup>2</sup>'lik yüzölçümü ile Türkiye'nin toprak bakımından Konya'dan sonra ikinci büyük ilidir. Sivas ilinin büyük bir kısmı yazları sıcak ve kurak, kışları soğuk ve karlı geçen karasal İç Anadolu ikliminin etkisinde kalmaktadır. Fakat kuzeyde Karadeniz, doğuda Doğu Anadolu yüksek bölge ikliminin etkileri bulunmaktadır. Yaz ve kış mevsimleri ile gündüz ve gece arasındaki sıcaklık farkları yüksektir. Kış ayları ise dondurucu soğuk, uzun ve kar yağışlıdır. Bu mevsimde ortalama sıcaklık 0°C civarındadır. Sivas ilinin en soğuk ay ortalaması -4°C olup, sıcaklığın -36.4°C'ye düştüğü görülmüştür. Yaz aylarında sıcaklık genellikle 19°C'nin üzerindedir. Ancak sıcaklığın yaz aylarında 38°C'yi aştığı da görülmektedir. Sivas kentinin yıllık ortalama sıcaklık değeri 9.03°C ve yıllık ortalama yağış değeri ise 36.69 mm'dir. Sivas kentinin yıllık ortalama toplam yağış miktarı 440.28 mm'dir. Çalışma alanında bulunan Sivas Merkez, Kangal, Suşehri, Zara, Divriği, Gemerek, Gürün, Şarkışla ve Ulaş ilçeleri için rasat yılı aralıklarına göre aylık ortalama yağış değerleri sırasıyla 36.69 mm, 34.85 mm, 35.50 mm, 43.42 mm, 32.70 mm, 34.49 mm, 26.39 mm, 31.71 mm ve 37.17 mm'dir. Çalışma alanı genel olarak kent merkezinin kuzey-kuzeydoğusuna ve güney-güneydoğusuna doğru yükselen bir yapı göstermektedir. Çalışma alanının deniz seviyesinden yüksekliği 581-3.012 m arasında değişmektedir. Çalışma kapsamında 9 adet meteoroloji istasyonuna ait veriler kullanılmıştır. Meteoroloji istasyonlarına ait detaylı bilgiler Tablo 1'de verilmiş olup, meteoroloji istasyonlarının mekansal dağılımları da Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Tablo 1.** Çalışma alanındaki istasyonların genel özellikleri

İstasyon No	İstasyon Adı	Enlem (°)	Boylam (°)	Yükseklik (m)	Rasat Yılı Aralığı
17090	Sivas Merkez	39.74	37.00	1294	1929-2019
17762	Kangal	39.24	37.39	1521	1959-2019
17684	Suşehri	40.16	38.08	1164	1970-2019
17716	Zara	39.88	37.73	1338	1964-2019
17734	Divriği	39.36	38.11	1121	1959-2019
17162	Gemerek	39.19	36.08	1182	1963-2019
17841	Gürün	38.72	37.27	1401	1964-2019
18139	Şarkışla	39.33	36.44	1253	1963-2019
17710	Ulaş	39.44	37.03	1528	1957-2019



**Şekil 1.** (a) Çalışma alanının konumu, (b) Çalışma alanındaki meteoroloji istasyonlarının ve yükseltilerin mekânsal dağılımı

Çalışmanın temel verilerini Sivas Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden temin edilmiş olan meteorolojik (sıcaklık ve yağış) parametreler oluşturmaktadır. Çalışmanın temel verilerini Sivas Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden temin edilmiş olan meteorolojik (sıcaklık ve yağış) parametreler oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında yapılmış olan trend analizi için her meteoroloji istasyonunun farklı zaman aralıklarındaki maksimum, minimum ve ortalama değerlerine ait sıcaklık ve yağış verileri kullanılmıştır. Meteoroloji istasyonlarına ait veriler üzerinde trend analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için kesintisiz olarak en az 30 yıllık veriye gereksinim duyulması, 30 yılın altında veri içeren istasyonlarda trend tespitinin mümkün olmaması ve bu istasyonlara ait verilerin istatistiksel olarak anlamlılık göstermemesi hususuna dayanarak [6] Yıldızeli, Hafik, Doğanşar, Koyulhisar, Akıncılar, Gölova, İmranlı ve Altınyayla ilçelerinde bulunan meteoroloji istasyonlarına ait sıcaklık ve yağış verileri hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

Çalışma yönteminin temelini, Mann-Kendall trend analizi yardımıyla çalışma kapsamında yer alan meteoroloji istasyonlarına ait sıcaklık ve yağış parametrelerindeki trendler oluşturmaktadır. Bu kapsamda Mann-Kendall trend testi yardımıyla ilkbahar, yaz, sonbahar, kış ve yıllık olmak üzere beş farklı periyot için trend analizi gerçekleştirilmiştir. Yıllık analizler için 12 aylık ortalama değerler; kış mevsimi analizi için Aralık, Ocak ve Şubat aylarının ortalama değerleri; ilkbahar mevsimi analizi için Mart, Nisan ve Mayıs aylarının ortalama değerleri; yaz mevsimi analizi için Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarının ortalama değerleri ve sonbahar mevsimi analizi için Eylül, Ekim ve Kasım aylarının ortalama değerleri kullanılmıştır. Çalışmada uygulanmış olan trend analizi, sıcaklık ve yağış parametrelerinin maksimum, minimum ve ortalama değerlerine göre yapılmıştır. Sıcaklık ve yağış parametrelerinin maksimum, minimum ve ortalama değerlerinin hesaplanması için Excell 2017, meteorolojik parametrelerin trend analizi için ise SPSS Statistics 23 kullanılmıştır.

#### Mann-Kendall (MK) trend analizi

Bir zaman serisi içinde artan veya azalan trendin varlığını belirlemek için çok popüler bir araç olan MK testi, bir eğilimin önemini değerlendirmek için sıra tabanlı parametrik olmayan bir testtir [23, 24]. Mann-Kendall test istatistiği aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [25].

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Burada;

$n$ ; veri noktası sayısı,

$x_i$  ve  $x_j$ ;  $i$  ve  $j$  zaman serilerindeki ( $j > i$ ) veri değerleri  $\text{sgn}(x_j - x_i)$ ; işaret fonksiyonu olup aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{eğer } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{eğer } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{eğer } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Varyans ise aşağıdaki şekilde formülize edilmiştir.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

Burada;  $n$  = veri noktası sayısı,  $m$  = bağlı grupların sayısı,  $t_i = i$  kapsamındaki bağların sayısıdır. Varyansı belirlenen Mann-Kendall testinin önemli olup olmadığı standart normal değişken  $Z$ 'nin aşağıdaki eşitlikle hesaplanıp kritik  $Z$  değeriyle karşılaştırılmasıyla belirlenir [26]. Negatif  $Z_S$  değerleri azalan bir trend anlamına gelirken pozitif  $Z_S$  değeri ise artan bir trendi ifade etmektedir.

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{eğer } S > 0 \\ 0, & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Mann-Kendall yaklaşımında; eğer veriler seri bir şekilde pozitif bir korelasyona sahipse trendin önemi önemsenebilir düzeyde iken eğer veriler seri bir şekilde negatif bir korelasyona sahipse trendin önemi önemsenebilir düzeydedir [26].

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Sıcaklık trendleri

$p < 0.05$  ve  $p < 0.01$  şartlarının gerçekleştiği durumlarda sıcaklık ve yağış parametrelerine ait trendlerdeki artışlar ve azalışlar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Yıllık ve mevsimlik ortalama maksimum sıcaklık değerlerine göre tüm meteoroloji istasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artış trendleri gözlenmiştir. Sivas merkez, Kangal, Suşehri, Zara, Divriği, Gemerek ve Şarkışla ilçelerinde yer alan istasyonlardaki sıcaklık artışları  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı, Gürün ve Ulaş ilçelerinde yer alan istasyonlardaki sıcaklık artışları ise  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlıdır. Maksimum sıcaklık ortalama değerlerindeki artışlar mevsimsel olarak değerlendirildiğinde ilkbahar mevsiminde Sivas, Divriği, Gemerek ve Şarkışla ilçelerindeki; yaz mevsiminde Ulaş dışındaki tüm ilçelerdeki; sonbahar mevsiminde Sivas merkez, Kangal, Zara, Divriği ve Gemerek ilçelerindeki ve kış mevsiminde ise Sivas merkez ilçesinde yer alan istasyonlardaki artış trendleri  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlılık göstermiştir. Kızılelma ve diğ. [3], tarafından 1970-2010 yılları arasını kapsayan Sivas ilinin de dahil olduğu çalışmada; İç Anadolu bölgesinde yaz mevsiminde maksimum sıcaklık trendinin artış yönünde olduğu, ilkbahar ve kış mevsiminin genel anlamda durağan geçtiği belirtilmiştir [3]. Yukarıda da belirtildiği gibi; yaz mevsiminde Ulaş dışındaki tüm ilçelerde sıcaklık trendi artış yönündeyken, ilkbahar mevsiminde Sivas, Divriği, Gemerek ve Şarkışla ilçeleri ile kış mevsiminde ise Sivas merkez ilçesinde artış trendi anlamlılık göstermektedir. Bu durum; 2010 yılından sonraki yaklaşık 10 yıllık zaman aralığında Sivas ili için sıcaklık trendinin tüm mevsimler için genel olarak artış yönünde olduğunu ortaya koymaktadır.

Maksimum sıcaklık trendleri açısından 9 istasyon için toplam 45 trend analizi yapılmış olup, bu trendlerin 25'i  $p < 0.01$  düzeyinde ve 7'si  $p < 0.05$  düzeyinde istatistiksel

açından anlamlı iken 13 trend ise istatistiksel açıdan anlamsız olmakla birlikte bu trendler artış trendi şeklindedir (Şekil 2, Tablo 2).

Yıllık ortalama minimum sıcaklık değerlerine göre yıllık periyot ve tüm mevsimler için tüm istasyonlarda sıcaklık artışları görülmüştür. Yıllık periyot için  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı trend artışı gösteren istasyonlar Sivas merkez, Suşehri ve Gemerek ilçesinde yer alan istasyonlar olmuştur. Minimum sıcaklıklardaki artışlara göre; ilkbahar mevsiminde Sivas merkezde yer alan istasyondaki sıcaklık artışı  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı iken Gemerek ilçesinde yer alan istasyondaki sıcaklık artışı  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlıdır. Yaz mevsiminde Sivas merkez, Suşehri, Divriği, Gemerek ve Ulaş ilçelerine ait istasyonlarda; sonbahar ve kış mevsiminde ise Sivas merkez ilçesinde yer alan istasyonda artış gösteren minimum sıcaklıklar  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlıdır. Minimum sıcaklık trendlerine ilişkin olarak yapılan analizlere göre; 11 trend  $p < 0.01$  düzeyinde ve 2 trend  $p < 0.05$  düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı iken 32 trend ise istatistiksel açıdan anlamsız olmakla birlikte bu trendler de artış trendi şeklindedir (Şekil 2, Tablo 2).

Sivas merkez ilçesinde yer alan istasyona ait ortalama sıcaklık değerleri yıllık periyotta, ilkbahar ve yaz mevsiminde  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı bir artış trendi göstermiş olup sonbahar ve kış mevsimindeki artışlar istatistiksel olarak anlamlılık göstermemiştir. Yıllık periyot için  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı trend artışı gösteren diğer istasyonlar Kangal, Divriği, Gemerek iken  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlı trend artışı gösteren istasyonlar ise Suşehri, Zara ve Şarkışla olmuştur. İlkbahar mevsiminde Sivas ve Divriği; yaz mevsiminde Suşehri, Şarkışla ve Ulaş dışındaki tüm ilçeler ve sonbahar mevsiminde Divriği ilçesindeki ortalama sıcaklıklardaki artışlar  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlıdır. Kış mevsiminde ise tüm istasyonlarda ortalama sıcaklık değerleri artış trendi göstermiş ancak bu trendler istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Ortalama sıcaklık trendlerinin 13'ü  $p < 0.01$  düzeyinde ve 8 trend  $p < 0.05$  düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı iken 24 trend ise istatistiksel açıdan anlamsız olmakla birlikte bu trendler artış trendi şeklindedir.

Sıcaklıklarda gözlemlenen artış trendi doğal süreçler ve/veya insani unsurlarla açıklanabilmekte birlikte günümüzde, sıcaklıklardaki artışın doğal süreçlerden ziyade insani unsurlara bağlı olarak ortaya çıktığı görüşü ağırlık kazanmaktadır [6]. Şapolyo ve Topaloğlu [27] yapmış oldukları çalışmada; sıcaklıklarındaki artış trendinin buharlaşmayı hızlandırarak sulama suyu hacminde düşüşe yol açabileceğini, tarımı ve su kaynaklarında sorun yaratabileceğini ortaya koymuşlardır [8].

### 3.2 Yağış trendleri

Maksimum ortalama yağış değerleri; yıllık, ilkbahar ve kış periyotlarında tüm istasyonlarda genel olarak azalma eğiliminde iken yaz ve sonbahar periyotlarında ise birkaç istasyon dışında artış eğilimindedir. Maksimum ortalama yağışlardaki bu artış ve azalmaların büyük çoğunluğu istatistiksel olarak anlamsızdır. Yalnızca kış mevsiminde Kangal istasyonundaki maksimum ortalama yağış değerlerindeki azalma  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı ( $r = -0.251$ )

iken Şarkışla istasyonundaki maksimum ortalama yağış değerlerindeki azalma  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlıdır ( $r = -0.218$ ) (Şekil 3, Tablo 3).

Minimum yağış değerleri tüm periyotlarda ve tüm istasyonlarda azalma eğilimindedir. Genel olarak tüm periyotlar için minimum yağış değerlerindeki azalmaların büyük çoğunluğu istatistiksel açıdan anlamsız olup yalnızca kış periyodunda Kangal, Zara, Şarkışla ve Ulaş istasyonlarındaki azalma trendleri  $p < 0.05$  düzeyinde istatistiksel olarak anlamlılık göstermiştir.

Ortalama yağış değerlerine göre; yıllık periyotta, ilkbahar ve kış mevsiminde genel olarak azalma trendleri mevcut iken yaz ve sonbahar mevsiminde ise genel olarak artış trendleri mevcuttur. Yıllık ortalama değerlere göre; Kangal, Şarkışla ve Ulaş istasyonlarındaki ortalama yağış değerlerindeki azalmalar  $p < 0.05$  düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. İlkbahar mevsiminde Ulaş istasyonundaki ortalama yağış değerlerindeki azalma  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlı, Gürün ve Şarkışla istasyonlarındaki ortalama yağış değerlerindeki azalmalar ise  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlıdır. Yaz, sonbahar ve kış mevsiminde Şarkışla istasyonundaki ortalama yağış değerlerindeki azalmalar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Şarkışla istasyonuna ait ortalama yağış değerlerindeki azalmalar, yaz ve sonbahar mevsiminde  $p < 0.05$  düzeyinde anlamlı; kış mevsiminde ise  $p < 0.01$  düzeyinde anlamlıdır. Terzi ve İlker [22] tarafından 1980-2017 yılları aralığında elde edilen yağış verilerine göre; Sivas ili için istatistiksel olarak anlamlı olmamakla birlikte Nisan, Temmuz, Ağustos, Ekim, Kasım, Aralık aylarında, sonbahar döneminde ve yıllık olarak yağışlarda azalış trendi görüldüğü, diğer aylar ve dönemlerde ise artış trendi görüldüğü tespit edilmiştir [22]. İç Anadolu Bölgesi ve Sivas'ı içeren diğer çalışmaların sonuçlarına göre de; minimum, maksimum ve ortalama sıcaklıklarda genel olarak bir artış trendi söz konusu iken, toplam yağışlarda genel olarak bir azalma trendi söz konusudur [3, 17, 18, 28]. Sivas ili için yapılan bu çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, iklim değişikliğinin etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, iklim değişimi çalışmalarında değerlendirilen en önemli parametrelerden olan yağış ve sıcaklıkların Sivas ilindeki değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. İstasyonlara ait en az 49, en çok 90 yıllık sıcaklık ve yağış değerlerinin zamansal trendleri, Mann-Kendall trend analiz yöntemine göre incelenmiştir. Sivas ilinde yıllık ve mevsimlik ortalama maksimum sıcaklık değerlerine göre tüm meteoroloji istasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artış trendleri gözlenmiştir. Yıllık ortalama minimum sıcaklık değerlerine göre ise yıllık periyot ve tüm mevsimler için tüm istasyonlarda sıcaklık artışları görülmüştür. Sivas Merkez istasyonu için sıcaklık değerleri ortalama 2 °C artış göstermiştir.

Sivas ili yağış açısından değerlendirilecek olursa; maksimum ortalama yağış değerleri; yıllık, ilkbahar ve kış periyotlarında tüm istasyonlarda genel olarak azalma eğilimindedir ve Sivas Merkez istasyonu için yağış değerleri ortalama 10 mm azalma göstermiştir. Yaz ve sonbahar

periyotlarında ise birkaç istasyon dışında artış eğilimindedir. Minimum yağış değerleri tüm periyotlarda ve tüm istasyonlarda azalma eğiliminde iken ortalama yağış değerlerine göre; yıllık periyotta, ilkbahar ve kış mevsiminde genel olarak azalma trendleri mevcuttur. Yaz ve sonbahar mevsiminde ise genel olarak artış trendleri görülmektedir.

Özellikle Sivas Merkez istasyonunda daha belirgin olarak ortaya çıkan bu artış ve azalış trendleri, kentleşme özelliğinin bir sonucu olarak da karşımıza çıkmaktadır. Şehirlerdeki radyasyon dengesi sıcaklık artışına neden olarak kentsel ısı adalarının oluşmasına yol açmaktadır. Daha sıcak olan bu alanlarda soğuk hava akımları şiddetli ve ani yağışlara neden olabilmektedir ve ani yağışlara bağlı olarak sel ve taşkınların meydana gelme olasılığı artmaktadır. Geniş bir yüzey alanına sahip olan Sivas ilinde ortalama yükselti 1000 m'nin üzerindedir. İstasyonlar arasındaki sıcaklık ve yağış farklılığına merkez ve ilçeler arasındaki yükselti farklılığı da etkide bulunabilir. Ayrıca, artan konutlar ve buna bağlı olarak artan enerji tüketimi, artan trafik, yeşil alanların yetersizliği, gibi etkiler iklim elemanlarının trendlerinin farklılaşmasına yol açmaktadır. Bu durum da sıcaklıklardaki artış trendleri buharlaşmayı hızlandırarak sulama suyu hacminde azalmaya yol açabileceği gibi, yüzey sularının akım değerlerinde azalma ve buharlaşmanın artması ile tarımsal kuraklık ve su kaynaklarında sorunlara da yol açabilecektir. Nitekim yıl içerisinde Sivas il merkezinde zaman zaman içme, ve kullanma sularında miktar ve kalite bakımından sorunlar yaşanmaya başlamıştır. Özellikle ilerleyen yıllarda yağış yetersizliğinin ve sıcaklığın artması durumunda Sivas genelinde su kaynakları üzerindeki bu baskının giderek artması olasıdır. Sonuç olarak; Sivas ilinin en az elli yıllık sıcaklık ve yağış verileri ele alınarak ortaya konulan sıcaklık ve yağış eğilimlerinin ilerleyen yıllarda doğal çevre başta olmak üzere enerji, tarım, sanayi ve yerleşim gibi tüm alanlar üzerinde etkili olabileceği düşünülmektedir.

Bu nedenle, bu verilerin ortaya konulması gelecekteki eğilimlerin doğru bir şekilde belirlenmesi, bu verilere dayanarak iklim değişikliğinden korunabilmek adına gerekli önlemlerin alınması açısından önemlidir. Bu çalışmanın dikkate alınarak mevcut su kaynaklarının korunması çalışmalarının da yürütülmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca bu çalışmanın gelecekte yapılması planlanan sıcaklık ve yağış değişkenlerine bağlı çalışmalar için de yol gösterici olması beklenmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan verilerin temin edilmesini sağlayan Sivas Meteoroloji İl Müdürlüğü yetkililerine teşekkür ederiz.

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 20

### Kaynaklar

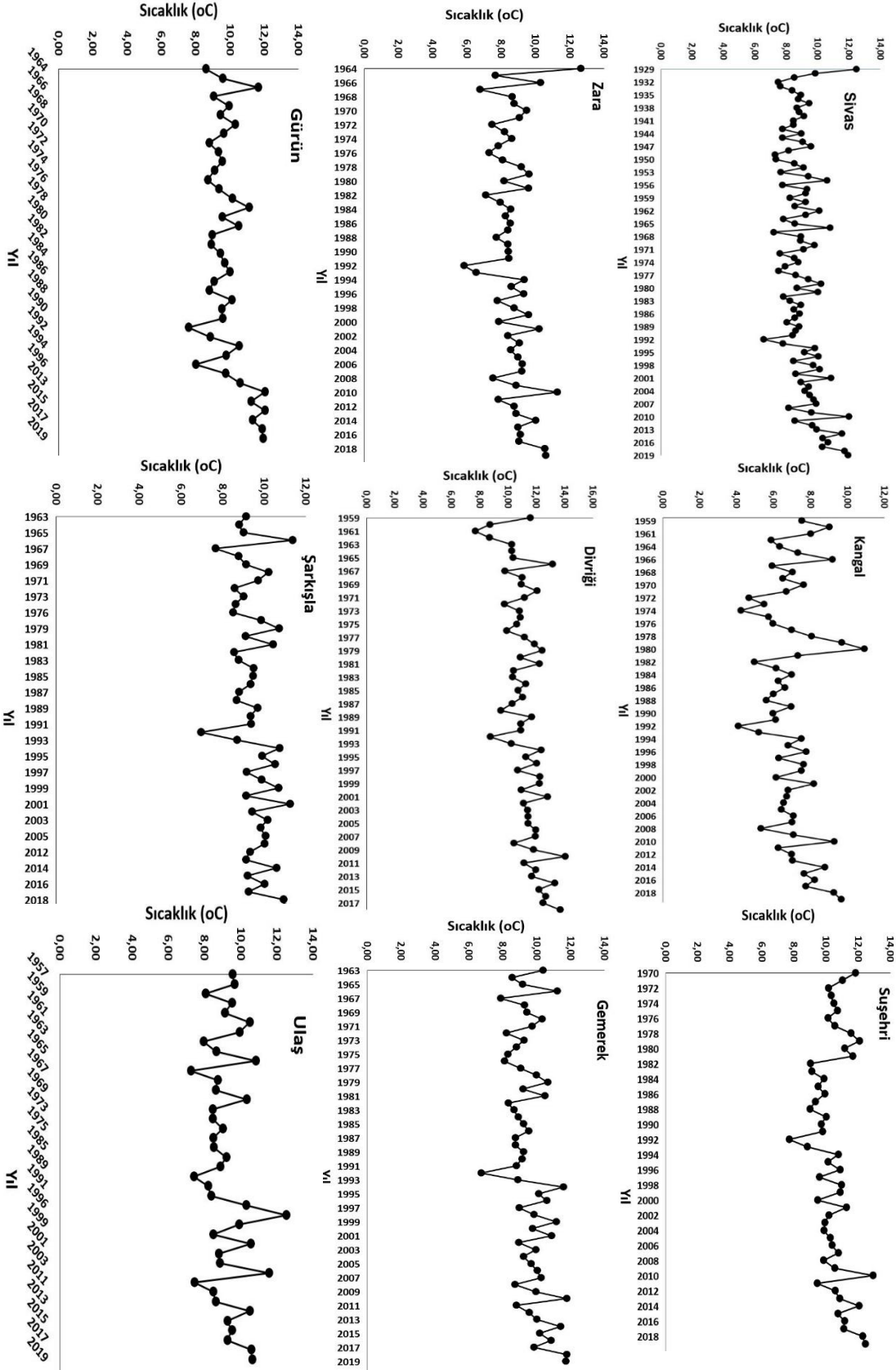
[1] M. Türkeş, Türkiye’de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme, Ankara Üniversitesi

- Çevre Bilimleri Dergisi, 4 (2), 1-32, 2012. [https://doi.org/10.1501/Csaum\\_0000000063](https://doi.org/10.1501/Csaum_0000000063)
- [2] B. Gönençgil, G. İçel, Türkiye’nin Doğu Akdeniz kıyılarında yıllık toplam yağışlarda görülen değişimler (1975-2006), Türk Coğrafya Dergisi, 55, 1-12, 2010.
- [3] Y. Kızılelma, M.A. Çelik, M. Karabulut, İç Anadolu Bölgesi’nde sıcaklık ve yağışların trend analizi, Türk Coğrafya Dergisi, 64, 1-10, 2015. <https://doi.org/10.17211/tcd.90494>
- [4] url-1:https://turkey.un.org/tr/139350-hukumetlerarasi-iklim-degisikligi-paneli-kuresel-isinma-insan-kaynakli-ve-daha-once
- [5] M. Coşkun, İklim değişimleri ve küresel ısınma, 12. Bölüm, Yer Bilimi Kitabı, Ed. Mete Alim-Serkan Doğanay, Pegem Akademi, Ankara, 2019.
- [6] A. Yılmaz, Muğla’da sıcaklık verilerinin trend analizi, Turkish Studies - Social, 16 (5), 1871-1896, 2021. <https://dx.doi.org/10.7827/TurkishStudies.49295>
- [7] F. Cosun, M. Karabulut, Kahramanmaraş’ta ortalama, minimum ve maksimum sıcaklıkların trend analizi, Türk Coğrafya Dergisi, 53, 41-50, 2009.
- [8] E. Erlat, İklim sistemi ve iklim değişimleri, 4. Baskı, Ege Üniversitesi Basımevi, 2013.
- [9] M. Türkeş, Küresel iklim değişikliği nedir? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen ve öngörülen değişiklikler, İklim Değişikliği ve Çevre, 1, 26-37, 2008.
- [10] A. Demir, Y. Demir, Ü. Şahin, R. Meral, Bingöl ilinde sıcaklık ve yağışların trend analizi ve tarıma etkisi, Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 4 (3), 284-291, 2017.
- [11] O. Fıstıkoğlu, E. Biberöglü, Küresel iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi ve uyum önlemleri, TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu, 238-252, 2008.
- [12] S. Tokgöz, T. Partal, Karadeniz Bölgesi’nde yıllık yağış ve sıcaklık verilerinin Yenilikçi Şen ve Mann-Kendall yöntemleri ile trend analizi”, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10 (2), 1107-1118, 2020. <https://doi.org/10.21597/jist.633368>
- [13] P. Polat, M. Sunkar, Rize’nin iklim analizleri özellikleri ve Rize çevresinde uzun dönem sıcaklık ve yağış verilerinin trendi”, Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 27 (1), 1-23, 2017.
- [14] B. Ercan, M.İ. Yüce, Kilis ili aylık sıcaklık ve yağış verileri trend analizi, DÜMF Mühendislik Dergisi, 9 (2), 947-953, 2018.
- [15] İ. Eroğlu, Meriç nehri havzasında sıcaklık ve yağış değerlerinin dönemsel trend analizi, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 750-760, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.882937>
- [16] M. Gocic, S. Trajkovic, Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in Serbia, Global and Planetary Change, 100, 172-182, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- [17] M. Türkeş, Spatial and temporal analysis of annual rainfall variations in Turkey, International Journal of Climatology, 16, 1057-1076, 1996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>

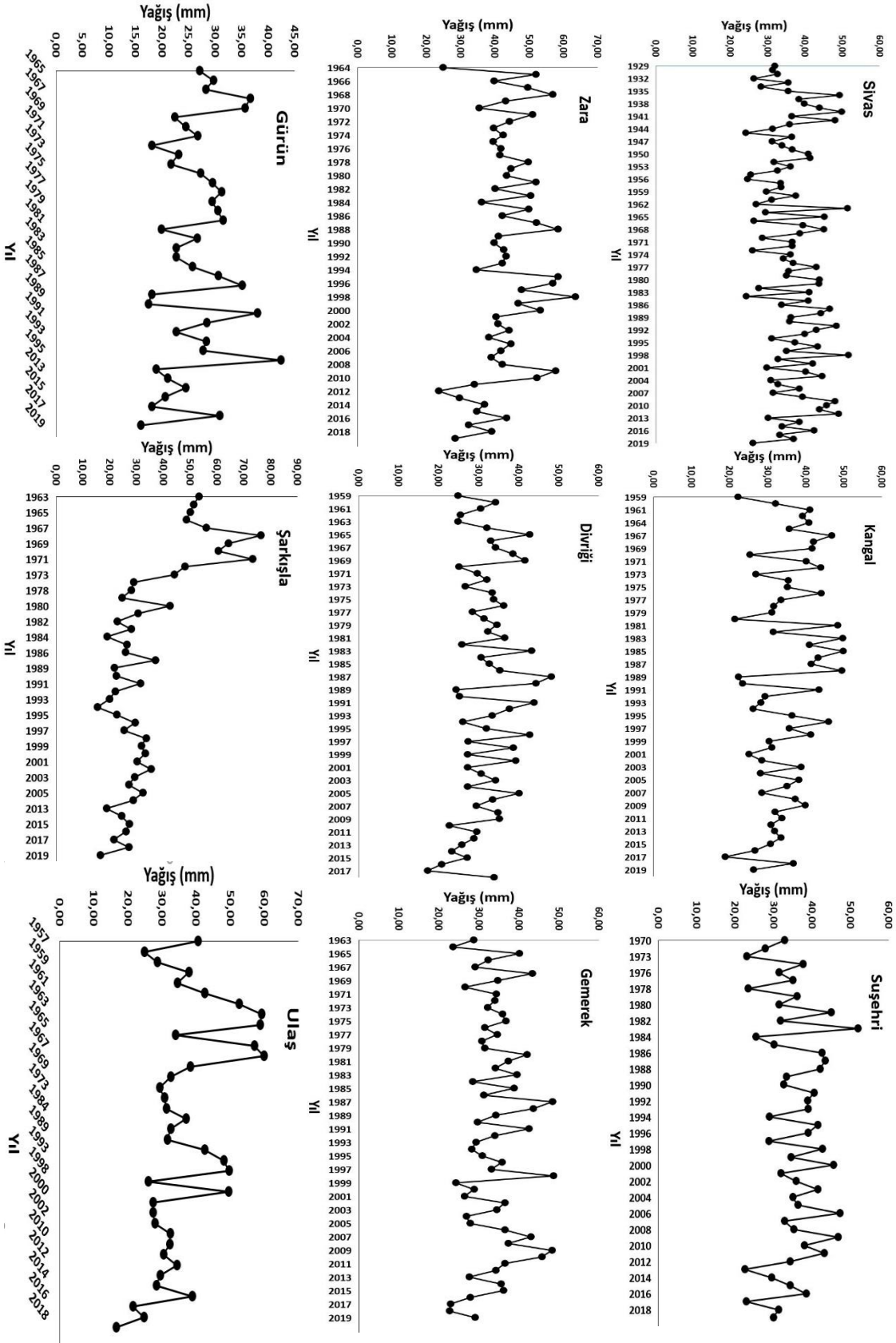
- [doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199609\)16:9%3C1057::AID-JOC75%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199609)16:9%3C1057::AID-JOC75%3E3.0.CO;2-D)
- [18] M. Türkeş, T. Koç, F. Sariş, Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey, *International Journal of Climatology*, 29 (8), 1056-1074, 2009. <https://doi.org/10.1002/joc.1768>
- [19] T. Partal, E. Kahya, Trend analysis in Turkish precipitation data”, *Hydrological Processes*, 20, 2011-2026, 2006. <https://doi.org/10.1002/hyp.5993>
- [20] M. Özfıdaner, Türkiye yağış verilerinin trend analizi ve nehir akımları üzerine etkisi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 73 s, Adana, 2007.
- [21] M. Karabulut, F. Cosun, Kahramanmaraş ilinde yağışların trend analizi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7 (1), 65-83, 2009.
- [22] Ö. Terzi, A. İlker, Yağış verilerinin trend analizi: Kızılırmak havzası örneği, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 9-2, 371-377, 2002. <https://doi.org/10.21541/apjes.735378>
- [23] G. Chattopadhyay, P. Chakraborty, S. Chattopadhyay, Mann–Kendall trend analysis of tropospheric ozone and its modeling using ARIMA, *Theoretical and Applied Climatology*, 110 (3), 321-328, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0617-y>
- [24] E.M. Douglas, R.M. Vogel, C.N. Kroll, Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation, *Journal of Hydrology*, 240, 90–105, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00336-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00336-X)
- [25] M. Dawood, Spatio-statistical analysis of temperature fluctuation using Mann–Kendall and Sen’s slope approach, *Climate Dynamics*, 48 (3), 783-797, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3110-y>
- [26] R. Kumar, S. Singh, S.S. Randhawa, K.K. Singh, J.C. Rana, Temperature trend analysis in the Glacier region of Naradu Valley, Himachal Himalaya, India, *Geoscience*, 346 (9-10), 213–222, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2014.09.001>
- [27] D. Şapolyo, F. Topaloğlu, Ege Bölgesi aylık sıcaklık verilerinin bölgesel ortalama Mann-Kendall testi ile trend analizi”. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 39 (6), 71-80, 2020.
- [28] M. Türkeş, Vulnerability of Turkey to desertification with respect to precipitation and aridity conditions, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 23, 363-380, 1999.



EKLER



Şekil 2. Sivas ilindeki dokuz istasyon için yıllık ortalama sıcaklıklardaki değişimler



Şekil 3. Sivas ilindeki dokuz istasyon için yıllık ortalama yağışlardaki değişimler

**Tablo 2.** Sivas ilindeki dokuz istasyon için Mann-Kendall (MK) testi sonuçları ve mevsimsel sıcaklıklardaki trendler

İstasyon Adı	İstatistiksel Gösterge	Yıllık			İkibahar			Yaz			Sonbahar			Kış		
		Max Ort	Min Ort	Ort	Max Ort	Min Ort	Ort	Max Ort	Min Ort	Ort	Max Ort	Min Ort	Ort	Max Ort	Min Ort	Ort
Sivas Merkez	r	0.404**	0.453**	0.260**	0.209**	0.338**	0.234**	0.358**	0.540**	0.278**	0.232**	0.262**	0.110	0.235**	0.215**	0.138
	p	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.124	0.001	0.003	0.054
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Karınel	r	0.314**	0.067	0.244**	0.119	0.000	0.206*	0.334**	0.059	0.363**	0.254**	0.042	0.153	0.111	0.023	0.057
	p	0.000	0.452	0.006	0.184	1.000	0.021	0.000	0.511	0.000	0.005	0.643	0.088	0.214	0.799	0.524
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Suğehri	r	0.326**	0.303**	0.239*	0.175	0.161	0.044	0.369**	0.298**	0.219*	0.042	0.160	0.030	0.156	0.146	0.071
	p	0.001	0.002	0.014	0.080	0.108	0.663	0.000	0.003	0.028	0.676	0.110	0.762	0.118	0.142	0.467
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Zara	r	0.399**	0.118	0.208*	0.144	0.044	0.070	0.355**	0.050	0.289**	0.294**	0.020	0.116	0.200*	0.107	0.069
	p	0.000	0.198	0.024	0.117	0.636	0.445	0.000	0.745	0.002	0.001	0.827	0.208	0.029	0.246	0.493
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Dörtiğ	r	0.527**	0.171	0.427**	0.332**	0.166	0.289**	0.523**	0.312**	0.504**	0.432**	0.038	0.275**	0.178*	0.013	0.158
	p	0.000	0.053	0.000	0.000	0.068	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.664	0.002	0.043	0.883	0.072
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Gençerek	r	0.303**	0.285**	0.265**	1.000**	0.207*	0.226*	0.338**	0.516**	0.397**	0.228**	0.141	0.111	0.116	0.027	0.069
	p	0.001	0.010	0.004	-	0.025	0.014	0.000	0.000	0.000	0.012	0.123	0.223	0.203	0.767	0.449
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Gürün	r	0.214*	0.166	0.122	0.254*	0.041	0.126	0.311**	0.207	0.312**	0.234*	0.047	0.156	0.106	0.117	0.134
	p	0.049	0.127	0.261	0.023	0.717	0.260	0.006	0.068	0.006	0.036	0.672	0.164	0.328	0.281	0.217
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Şarfasla	r	0.363**	0.005	0.237*	0.304**	0.004	0.221*	0.303**	0.069	0.236*	0.134	0.179	0.119	0.186	0.007	0.156
	p	0.000	0.957	0.015	0.004	0.968	0.035	0.003	0.511	0.024	0.197	0.083	0.252	0.065	0.943	0.110
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Ulaş	r	0.221*	0.233*	0.116	0.130	0.042	0.009	0.244*	0.360**	0.205	0.143	0.215	0.033	0.051	0.059	0.087
	p	0.045	0.036	0.286	0.239	0.714	0.940	0.027	0.002	0.070	0.196	0.061	0.772	0.641	0.595	0.425
	Trend	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲

▲ : Artan Trend

▼ : Azalan Trend

\*\* : Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlı

\* : Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlı



Tablo 3. Sivas ilindeki dokuz istasyon için Mann-Kendall (MK) testi sonuçları ve mevsimsel yağışlardaki trendler

İstasyon Adı	İstatistiksel Göstergeler	Yüzlük			İlkbahar			Yaz			Sonbahar			Kış		
		Max Ort.	Min Ort.	Ort.	Max Ort.	Min Ort.	Ort.	Max Ort.	Min Ort.	Ort.	Max Ort.	Min Ort.	Ort.	Max Ort.	Min Ort.	Ort.
Sivas Merkez	r	0.091	-0.068	0.123	0.073	0.089	0.096	0.032	-0.098	0.045	0.082	0.010	0.088	-0.008	0.058	0.020
	p	0.200	0.347	0.085	0.309	0.212	0.177	0.656	0.175	0.546	0.248	0.894	0.218	0.915	0.593	0.784
	Trend															
Kangal	r	-0.163	-0.074	-0.195*	-0.147	0.091	-0.078	0.074	-0.045	0.000	0.083	-0.060	0.031	-0.251**	-0.188*	-0.249**
	p	0.069	0.413	0.029	0.099	0.308	0.384	0.410	0.614	1.000	0.353	0.505	0.729	0.005	0.035	0.005
	Trend			▼												
Süpehri	r	0.035	-0.001	0.028	-0.083	0.055	-0.041	0.050	0.013	0.038	0.096	-0.025	0.052	0.015	-0.028	-0.087
	p	0.729	0.993	0.776	0.403	0.382	0.683	0.619	0.894	0.563	0.337	0.803	0.600	0.880	0.783	0.709
	Trend															
Zara	r	-0.112	-0.139	-0.162	-0.101	-0.057	-0.105	0.097	-0.057	0.062	0.079	0.037	0.062	-0.165	-0.202*	-0.264**
	p	0.224	0.133	0.078	0.270	0.534	0.252	0.289	0.338	0.502	0.389	0.687	0.497	0.073	0.028	0.004
	Trend															
Diyüğü	r	-0.017	-0.012	-0.064	-0.063	-0.076	-0.112	0.025	0.088	-0.040	-0.019	-0.054	-0.034	0.008	-0.038	-0.084
	p	0.847	0.890	0.463	0.474	0.390	0.207	0.779	0.328	0.655	0.832	0.542	0.695	0.926	0.265	0.338
	Trend															
Generek	r	-0.050	-0.022	-0.031	-0.010	-0.122	-0.081	0.116	-0.013	0.043	0.055	-0.011	0.036	-0.033	-0.018	-0.038
	p	0.741	0.809	0.731	0.912	0.182	0.381	0.203	0.890	0.640	0.549	0.907	0.695	0.715	0.842	0.680
	Trend															
Günün	r	-0.133	-0.116	-0.167	-0.145	-0.133	-0.232*	0.077	-0.068	0.108	-0.022	-0.026	-0.064	-0.001	-0.151	-0.047
	p	0.236	0.324	0.134	0.195	0.256	0.040	0.490	0.560	0.339	0.847	0.818	0.628	0.990	0.175	0.672
	Trend															
Şarfasla	r	-0.180	-0.087	-0.247*	-0.098	-0.197	-0.250*	-0.098	-0.093	-0.214*	-0.115	0.063	-0.227*	-0.218*	-0.257*	-0.285**
	p	0.075	0.419	0.14	0.331	0.051	0.027	0.331	0.384	0.041	0.255	0.978	0.028	0.031	0.011	0.005
	Trend			▼												
Ulaş	r	-0.169	-0.397**	-0.238*	-0.192	-0.288*	-0.309**	0.023	-0.306**	-0.081	0.027	-0.102	-0.038	-0.107	-0.280*	-0.224
	p	0.135	0.001	0.036	0.090	0.011	0.007	0.941	0.007	0.480	0.811	0.372	0.734	0.346	0.014	0.059
	Trend		▼			▼	▼		▼							

▼ : Artan Trend

▼ : Azalan Trend

\*\* : Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlı

\* : Korelasyon 0.05 düzeyinde anlamlı



# Anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde azot giderme performansına kademeli besleme sayısının etkisi

## Effect of number of step-feed on nitrogen removal performance in anoxic-aerobic sequencing batch reactor

Engin Gürtekin<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde azot giderme performansına kademeli besleme sayısının etkisi araştırılmıştır. Kademeli besleme sayısı olarak; iki, üç ve dört seçilmiş ve her biri sırasıyla farklı reaktörlerde (R1, R2 ve R3) çalışılmıştır. Kademeli besleme sayısı, KOİ giderme verimini etkilememiştir. R1, R2 ve R3'de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimleri sırasıyla %95, %97 ve %91'dir. Toplam inorganik azot (TIN) giderme verimi R1, R2 ve R3'de sırasıyla %84, %88 ve %85 olarak bulunmuştur. Azot giderme verimi bakımından üç kademeli besleme ile daha iyi sonuçlar elde edilmiş ve kademeli besleme sayısının azot gideriminde önemli bir işletme parametresi olduğu bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Ardışık kesikli reaktör, Denitrifikasyon, Kademeli besleme.

### 1 Giriş

Evsel atıksuda bulunan azot gibi makronutrientler, arıtılmadan veya yeterli düzeyde arıtılmadan alıcı ortamlara deşarj edilmesi durumunda ötrofikasyona, çözülmüş oksijen konsantrasyonunun azalmasına, balık ölümlerine ve insan sağlığı ile ilgili problemlere neden olmaktadır [1]. Biyolojik yöntemler, düşük maliyetli oluşu ve yüksek verim elde edilmesinden dolayı atıksudan azot gideriminde tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Biyolojik azot giderimi, genel olarak nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleriyle gerçekleştirilmektedir. Nitrifikasyon prosesinde amonyum önce nitrit ve daha sonra nitrate dönüşmekte, denitrifikasyon prosesinde ise nitrat, azot gazına dönüşmektedir. Ardışık kesikli reaktör, işletimi basit tek bir reaktörden ibarettir. Ardışık kesikli reaktörde, anoksik ve aerobik şartlar sağlanarak biyolojik azot giderimi gerçekleştirilmektedir. Ancak, genel olarak atıksudaki organik karbonun sınırlı oluşundan dolayı denitrifikasyon prosesi sınırlı düzeyde gerçekleşmekte ve bunun sonucu olarak çıkışta nitrit ve nitrat kontrasyonu yüksek olmakta ve azot giderme verimi düşük kalmaktadır [2]. Azot giderme verimini artırmak için kademeli besleme yöntemi önerilmiştir. Kademeli besleme yönteminde, atıksu girişi eşit yada belirli oranlarda denitrifikasyonun gerçekleştiği anoksik fazların başlangıcında reaktöre beslenmektedir. Kademeli

### Abstract

In this study, the effect of step-feed number on the nitrogen removal performance of anoxic-aerobic sequencing batch reactor was investigated. Two, three and four step-feeds were chosen as the number of feeds, each of which was run in different reactors (R1, R2 and R3) respectively. The number of step-feeds did not affect COD removal efficiency. The NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal efficiencies in R1, R2 and R3 are 95%, 97% and 91%, respectively. The total inorganic nitrogen (TIN) removal efficiency was found to be 84%, 88% and 85% in R1, R2 and R3, respectively. In terms of nitrogen removal efficiency, better results were obtained with three step-feed, and it was found that the number of step-feed was an important operating parameter for nitrogen removal.

**Keywords:** Sequencing batch reactor, Denitrification, Step-feed.

besleme yöntemi ile atıksudaki organik karbonunun daha etkin kullanımı sağlanarak denitrifikasyon hızı artmakta ve azot giderme verimi iyileşmektedir [3,4]. Ayrıca, anoksik fazda atıksudaki karbonun daha fazla kullanılmasıyla aerobik fazda organik yüklemenin azalmakta bunun neticesinde ise nitrifikasyon hızında artış ve organik madde okside etmek gerekli havalandırma gereksiniminde azalma sağlanmaktadır [5]. Üç ve dört kademeli besleme sayısı ile ileri azot giderimi elde edilmiştir [6-9]. Fakat, önceki araştırmalarda kademeli besleme sayısının azot giderimine etkisi araştırılmamıştır. Bu çalışmanın amacı, anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde kademeli besleme sayısının azot giderme verimine etkisini tespit etmektir.

### 2 Materyal ve metod

#### 2.1 Reaktörler ve işletmesi

Deneysel çalışmalarda üç laboratuvar ölçekli ardışık kesikli reaktör (R1, R2 ve R3) kullanılmıştır. Ardışık kesikli reaktörlerde bir devir 8 saat olup; 15 dakika doldurma, 360 dakika reaksiyon, 75 dakika çökeltme, 15 dakika boşaltma ve 15 dakika dinlendirme fazlarından oluşmaktadır (Tablo 1). R1'de reaksiyon fazı; 60 dakika anoksik, 120 dakika aerobik, 60 dakika anoksik, 120 dakika aerobik fazdan oluşmakta ve giriş suyu iki eşit hacme bölünerek (1:1) her bir anoksik faza ardışık biçimde besleme gerçekleştirilmiştir. R2'de

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: egurtekin@firat.edu.tr (E. Gürtekin)

Geliş / Received: 09.03.2022 Kabul / Accepted: 14.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1084986

reaksiyon fazı; 40 dakika anoksik, 80 dakika aerobik, 40 dakika anoksik, 80 dakika aerobik, 40 dakika anoksik, 80 dakika aerobik fazdan oluşmakta ve giriş suyu üç eşit hacme bölünerek (1:1:1) her bir anoksik fazın başlangıcında ardışık biçimde reaktöre besleme gerçekleştirilmiştir. R3'de reaksiyon fazı; 30 dakika anoksik, 60 dakika aerobik, 30 dakika anoksik, 60 dakika aerobik, 30 dakika anoksik, 60 dakika aerobik fazdan oluşmakta ve giriş suyu dört eşit hacme bölünerek (1:1:1:1) her bir anoksik faza ardışık biçimde besleme gerçekleştirilmiştir. Reaktörler; çökeltme, boşaltma ve dinlendirme fazları hariç bir mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Aerobik faz sırasında ise, reaktörlerin havalandırılması hava pompası ve difüzörler ile gerçekleştirilmiştir. İşletme boyunca pH kontrolü yapılmamıştır. Reaktörler, çamur yaşı 20 gün ve sıcaklık 25 °C'de çalıştırılmıştır.

**Tablo 1.** Reaktörlerin bir devir sürelerinin dağılımı

	R1	R2	R3
Devir süresi, saat	8	8	8
Doldurma, dakika	15	15	15
Reaksiyon, dakika	360	360	360
Anoksik	60	40	30
Aerobik	120	80	60
Anoksik	60	40	30
Aerobik	120	80	60
Anoksik	-	40	30
Aerobik	-	80	60
Anoksik	-	-	30
Aerobik	-	-	60
Çökeltme, dakika	75	75	75
Boşaltma, dakika	15	15	15
Dinlendirme, dakika	15	15	15

## 2.2 Sentetik atıksu ve çamur

Sentetik atıksu, 510 mg/L sodyum asetat, 90 mg/L MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 14 mg/L CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, 153 mg/L NH<sub>4</sub>Cl, 46 mg/L Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 200 mg/L NaHCO<sub>3</sub>, 10 mg maya özü ve 0.4 mL/L iz element içermektedir. Sentetik atıksu yaklaşık olarak 400 mg/L KOİ konsantrasyonu, 40 mg/L NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N konsantrasyonu ve 10 mg/L PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P konsantrasyonuna sahiptir [10]. Klasik aktif çamur tesisinden alınan çamur ile reaktörler aşılantmıştır.

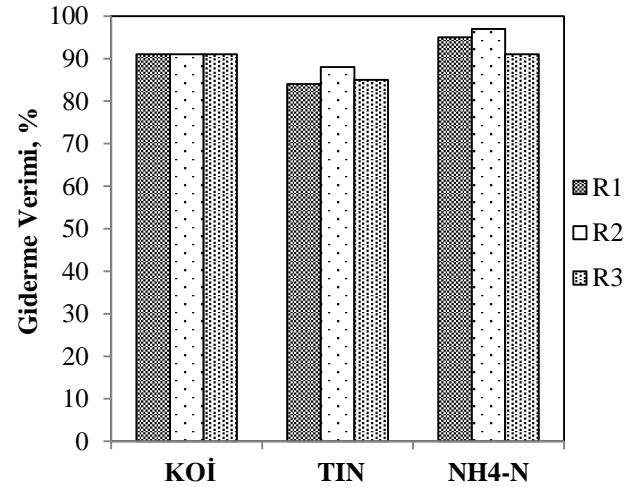
## 2.3 Analitik yöntemler

KOİ ve toplam askıda katı madde (TAKM) analizleri Standart Metotlara [11] göre yapılmıştır. Amonyum, nitrit ve nitrat analizi ise Standart Kit (Merck Specquorant, Nova 60) kullanılarak yapılmıştır. Toplam inorganik azot (TIN) değeri ise, amonyum, nitrit ve nitrat konsantrasyonlarının toplamından elde edilmiştir. TN analizi yapılmamıştır. Çalışmada kullanılan sentetik atıksuyun organik azot içeriği olmadığından TIN değeri TN değerine yaklaşık eşit kabul edilmiştir ve bu nedenle diğer çalışmaların TN değeri ile olan karşılaştırmalarda TIN değeri kullanılmıştır.

## 3 Bulgular ve tartışma

Kademeli besleme sayısının iki (R1), üç (R2) ve dört (R3) olduğu anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörlerde KOİ, TIN ve NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimleri Şekil 1'de

verilmiştir. Her üç kademeli besleme sayısında KOİ giderme verimleri %91 olarak bulunmuştur. R1, R2 ve R3'de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimleri sırasıyla %95, %97 ve %91'dir. Kademeli besleme sayısının ikiden üçe çıkmasıyla NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimi nispeten artmıştır. Ancak, dört kademeli beslemede NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme veriminde azalma gerçekleşmiştir. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimindeki bu azalma, aerobik faz sürelerinin yeterli olmayışı ile açıklanabilir. R1, R2 ve R3'de TIN giderme verimleri sırasıyla %84, %88 ve %85 olarak bulunmuştur. Kademeli besleme sayısının ikiden üçe çıkmasıyla TIN giderme verimi arttığı görülmektedir. Ancak, dört kademeli beslemenin yapıldığı reaktörde, iki kademeli beslemenin yapıldığı reaktörle benzer TIN giderme verimi elde edilmiştir. Kademeli besleme sayısının ikiden üçe artmasıyla, denitrifikasyon prosesinde atıksudaki karbon daha etkin ve verimli kullanıldığı ve buna bağlı olarak azot giderme veriminin arttığı söylenebilir. Kademeli besleme sayısının dört olduğu reaktörde, aerobik faz sürelerinin azalmasına bağlı olarak nitrifikasyon prosesi hızında az da olsa bir düşüş gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak azot giderimi nispeten azalmıştır. Bu sonuçlar, kademeli besleme sayısının üç olduğu reaktörün azot giderme performansı açısından daha uygun olduğunu göstermektedir. Tablo 2'de farklı kademeli beslemeli proseslerle yapılan çalışmaların bir karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 1.** R1, R2 ve R3'deki KOİ, TIN ve NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimleri

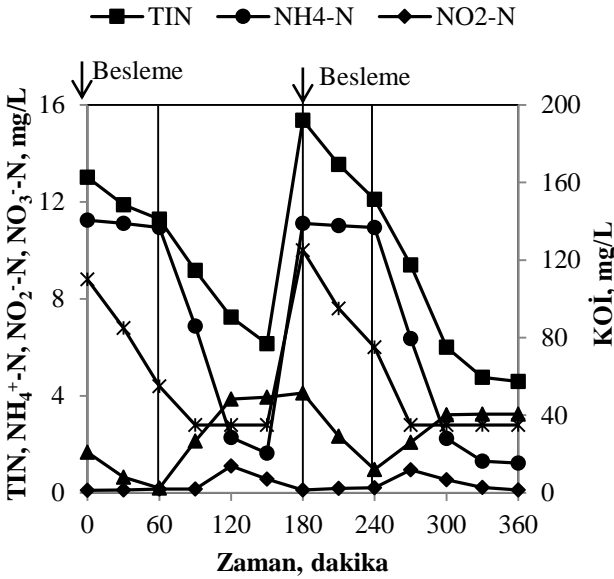
İki kademeli beslemenin gerçekleştiği reaktörde (R1), KOİ konsantrasyonu anoksik fazlarda gerçekleşen denitrifikasyon prosesine bağlı olarak azalmıştır (Şekil 2). Aerobik fazlarda ise, anoksik fazlardan kalan organik madde oksidasyona bağlı olarak azalmıştır. Amonyum konsantrasyonu, anoksik fazlarda kısmen azalmıştır. Bu azalmanın hücre asimilasyonuna bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Aerobik fazlarda ise gerçekleşen nitrifikasyon prosesi ile amonyum konsantrasyonu hızlıca azalmıştır. Her iki anoksik fazda nitrit birikimi yok denecek kadar az olmasına rağmen, aerobik fazlarda çok az da olsa bir nitrit birikimi görülmektedir. Nitrat konsantrasyonu, anoksik fazlarda

**Tablo 2.** Kademeli beslemeli proseslerin performanslarının karşılaştırılması

Biyolojik işletme biçimi	Aktif çamur [6]	Aktif çamur [8]	Biyofilm [9]	Aktif çamur [12]	Aktif çamur [13]	Aktif çamur [Bu çalışma]		
Kademe sayısı	3	3	3	3	4	2	3	4
Çıkış kalitesi, mg/L								
KOİ	30	32.7	<50	35.74	33.05	35	35	35
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1.7	0.14	<8	1.22	0.58	1.22	0.62	2.56
TN	6.9	6.61	Veri yok	16.31	9.26	4.59	3.66	5.66
Giderme Verimi, %								
KOİ	94	89	80	86.6	78.9	91	91	91
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	95	99	96	98	98.31	95	97	91
TN (TIN*)	83	88	Veri yok	73.61	70.24	84*	88*	85*

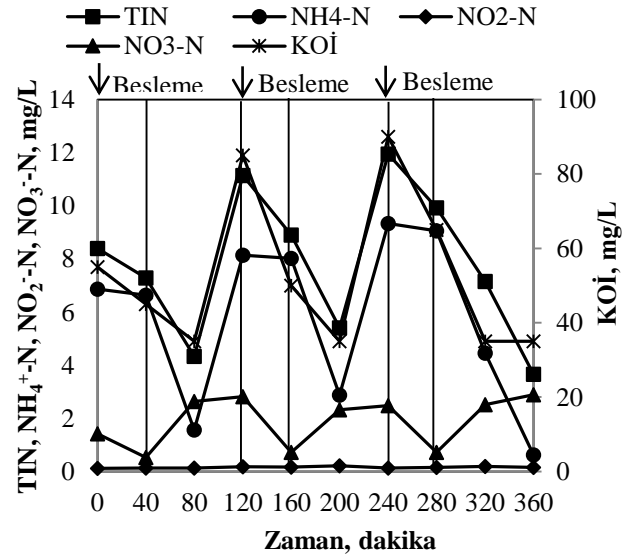
gerçekleşen denitrifikasyona bağlı olarak azalmış ve aerobik fazlarda gerçekleşen nitrifikasyona bağlı olarak artmıştır. TIN konsantrasyonu ise, her iki kademe besleme sonrasında anoksik fazda gerçekleşen denitrifikasyon prosesi ve aerobik fazda gerçekleşen nitrifikasyon prosesine bağlı olarak azalmıştır. R1’de iki kademe beslemeye bağlı olarak reaksiyon fazını oluşturan anoksik ve aerobik faz sürelerinin denitrifikasyon ve nitrifikasyon proseslerinin gerçekleşmesi için yeterli büyüklükte olduğu görülmektedir.

gerekli oksijen miktarı gereksinimini de azaltacağından, işletme maliyeti açısından bir avantajlı durumdur. Amonyum konsantrasyonu aerobik fazlarda gerçekleşen nitrifikasyon prosesine bağlı olarak azalmıştır. Anoksik fazlarda, çok az da olsa amonyum konsantrasyonunda azalma gerçekleşmiştir. Hem anoksik hem de aerobik fazlarda nitrit birikimi gözlenmemiştir. Nitrat konsantrasyonu, anoksik fazlarda gerçekleşen denitrifikasyon prosesi neticesinde azalmış ve aerobik fazlarda gerçekleşen nitrifikasyon prosesi ile artmıştır. Amonyum, nitrit ve nitrat konsantrasyonlarına bakılarak, üç kademeli beslemenin yapıldığı reaktörde anoksik ve aerobik faz sürelerinin nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerinin gerçekleşmesi için yeterli olduğu söylenebilir. R2’de çıkış TIN konsantrasyonu, nitrifikasyon ve denitrifikasyon proseslerindeki iyileşmeye bağlı olarak R1’e kıyasla daha düşüktür. TIN giderimi genellikle biyokütle asimilasyon veya denitrifikasyon prosesi ile gerçekleşmektedir. Daha önce aerobik granüler ardışık kesikli reaktörde yapılan benzer bir çalışmada azot gideriminin başlıca denitrifikasyon prosesi ile sınırlı olduğu belirtilmiştir [3]. Bu çalışmada da, TIN giderimi verimi anoksik fazlarda gerçekleşen denitrifikasyon prosesi büyüklüğüne bağlıdır.



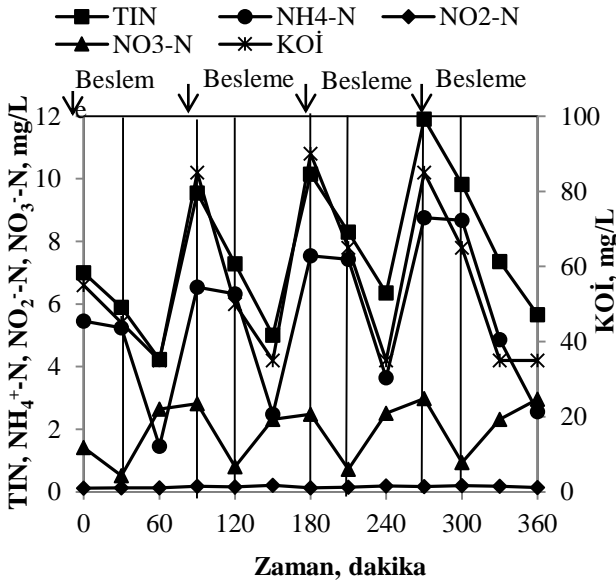
**Şekil 2.** R1’in tipik bir devrinde kirletici konsantrasyonlarının zamansal değişimi

Üç kademeli beslemenin yapıldığı anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde kirletici konsantrasyonlarının zamansal değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Kademeli beslemenin ikiden üçe çıkmasıyla, anoksik fazda gerçekleşen denitrifikasyon prosesinde atıksudaki organik maddenin daha iyi kullanımı sağlandığı ve buna bağlı olarak denitrifikasyon hızının arttığı görülmektedir. Ayrıca, aerobik ortama daha az organik madde girişi gerçekleşmiş ve nitrifikasyon bakterilerin aerobik ortamda daha aktif rol oynaması ile nitrifikasyon veriminde de kısmen bir artış olduğu bulunmuştur. Aerobik ortama giren organik maddenin az olması, oksidasyon için



**Şekil 3.** R2’nin tipik bir devrinde kirletici konsantrasyonlarının zamansal değişimi

Şekil 4’de dört kademeli beslemenin yapıldığı anoksik-aerobik ardışık kesikli reaktörde kirletici konsantrasyonlarının zamansal değişimi verilmiştir. Dört kademeli beslemede KOİ konsantrasyonu, atıksudaki organik maddenin anoksik fazda gerçekleşen denitrifikasyon prosesinde elektron verici olarak kullanılmasına bağlı olarak azalmıştır. Aerobik fazda ise, oksidasyona bağlı olarak KOİ konsantrasyonu azalmıştır. Amonyum konsantrasyonundaki azalma, dört kademeli beslemede aerobik faz sürelerinin azalmasına bağlı olarak kısmen düşmüş ve çıkış amonyum konsantrasyonu 2,56 mg/L’ye yükselmiştir. Anoksik fazda amonyum konsantrasyonunda kısmen küçük bir azalma dört kademeli beslemenin yapıldığı reaktörde de gözlenmiştir. Aerobik ve anoksik fazlarda nitrit birikimi dört kademeli besleme durumunda da gözlenmemiştir. Nitrat konsantrasyonu, anoksik fazlarda gerçekleşen denitrifikasyon ve aerobik fazlarda gerçekleşen nitrifikasyon ile azalmıştır. Çıkış TIN konsantrasyonu, nitrifikasyon prosesindeki kısmi azalmaya bağlı olarak az da olsa artmıştır.



Şekil 4. R3'nün tipik bir devrinde kirletici konsantrasyonlarının zamansal değişimi

#### 4 Sonuçlar

Aktif çamur sistemlerde kademeli besleme atıksudaki karbon kaynağının daha iyi kullanımını sağlayarak denitrifikasyon hızını ve buna bağlı olarak azot giderme verimini artırmaktadır. Farklı kademeli besleme sayılarının denendiği bu çalışmada; iki, üç ve dört kademeli beslemeli olarak işletilen R1, R2 ve R3 reaktörlerinde KOİ giderme verimleri aynı olup, % 91’dir. R1, R2 ve R3’de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N giderme verimleri sırasıyla %95, %97 ve %91 ve TIN giderme verimleri sırasıyla %84, %88 ve %85 olarak bulunmuştur. Aerobik ve anoksik fazlarda gerçekleşen nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri kademeli besleme sayısından etkilenmiştir. Deneysel sonuçlar, üç kademeli beslemenin azot giderimi bakımından daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu çalışma neticesinde, kademeli besleme yanında kademeli besleme sayısının da azot giderme

verimini artırma açısından önemli bir işletme parametresi olduğu görülmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

#### Kaynaklar

- [1] C. Z. Correa, K. V. M. C. Prates, E. F. de Oliveira, D. D. Lopes and A. C Barana, Nitrification/denitrification of real municipal wastewater in an intermittently aerated structured bed reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 134-141, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.03.013>.
- [2] C. Zhong, Y. Wang, Y. Wang, J. Lv, Y. Li and J. Zhu, High-rate nitrogen removal and its behavior of granular sequence batch reactor under step-feed operational strategy. *Bioresource Technology*, 134, 101-106, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.155>.
- [3] F. Y. Chen, Y. Q. Liu, J. H. Tay and Ning, P, Operational strategies for nitrogen removal in granular sequencing batch reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1-2), 342-348, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.041>.
- [4] Q. Zhang, R. Huang, L. Jiang, Z. Lu, G. Wu, J. Lei, S. Liao, G. Liu, B. Li and J. Wang, Enhancing nitrogen removal and reducing aeration energy for wastewater treatment with intermittent Modified Ludzack-Ettinger process: A field demonstration. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102303, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102303>.
- [5] F. Y. Chen, Y. Q. Liu, J. H. Tay and P. Ning, Alternating anoxic/oxic condition combined with step-feeding mode for nitrogen removal in granular sequencing batch reactors (GSBRs). *Separation and Purification Technology*, 105, 63-68, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.12.015>.
- [6] E. Vaiopoulou and A. Aivasidis, A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance. *Chemosphere*, 72(7), 1062-1068, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.044>.
- [7] G. Zhu, Y. Peng, L. Zhai, Y. Wang and S. Wang, Performance and optimization of biological nitrogen removal process enhanced by anoxic/oxic step feeding. *Biochemical Engineering Journal*, 43(3), 280-287, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.017>.
- [8] S. Ge, Y. Peng, S. Wang, J. Guo, B. Ma, L. Zhang and X. Cao, Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios. *Bioresource Technology*, 101(23), 9012-9019, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.151>.
- [9] H. Liang, M. Gao, J. Liu, Y. Wei and X. Guo, A novel integrated step-feed biofilm process for the treatment of decentralized domestic wastewater in rural areas of China. *Journal of Environmental Sciences*, 22(3), 321-327, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60111-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60111-X).






- [10] Y. Sun, H. Wang, G. Wu and Y. Guan, Nitrogen removal and nitrous oxide emission from a step-feeding multiple anoxic and aerobic process. *Environmental Technology*, 39(7), 814-823, 2018. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1311947>.
- [11] APHA, AWWA, WCPF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup> Edition, American Public Health Association, Washington, D.C., 1998.
- [12] Y. Wang, Y. Peng and T. Stephenson, Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process. *Bioresource Technology*, 100(14), 3506-3512, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.026>.
- [13] G. Cao, S. Wang, Y. Peng and Z. Miao, Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater. *Bioresource Technology*, 128, 604-611, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.078>.





## Tunceli biyolojik atıksu arıtma tesisinde gastrointestinal patojenlerin belirlenmesi

### Determination of gastrointestinal pathogens in Tunceli biological wastewater treatment plant

Murat Topal<sup>1,\*</sup> , Zülal Aşçı Toraman<sup>2</sup> , E. Işıl Arslan Topal<sup>3</sup> ,  
Ceren Sel Süer<sup>4</sup> , Erdal Öbek<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Munzur Üniversitesi, Tunceli Meslek Yüksek Okulu, Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, 62000, Tunceli, Türkiye

<sup>2,4</sup> Fırat Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Temel Tıp Bilimleri Bölümü, 23000, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 23000, Elazığ, Türkiye

<sup>5</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 23000, Elazığ, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, Tunceli ili biyolojik atıksu arıtma tesisinde (TBAAT) gastrointestinal patojenler (bakteriyel gastroenterit, viral gastroenterit, enterovirüsler, insan parekovirüsleri, adenovirüsler, dışkı parazitleri) incelenmiştir. TBAAT 'nin giriş ve çıkış suyunda gastrointestinal patojen analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre TBAAT 'nin giriş suyunda enterohemorajik/verotoksin üreten *Esherichia coli*, *salmonella*, norovirüsler G1, norovirüsler G2, astrovirüsler, adenovirüsler ve *Giardia lamblia* ajanları tespit edilmiştir. Bu ajanlar TBAAT 'nin giriş suyunda mevcut olmasına rağmen, TBAAT 'nin çıkış suyunda gastroenterite sebep bakteriyel etkenler, enterovirüsler, parekovirüsler, adenovirüsler (EPA) ve dışkı parazitleri tespit edilmemiştir. TBAAT çıkış suyunda viral ajanlardan olan norovirüsler G2, astrovirüsler ve adenovirüsler pozitif (+) olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Atıksu, Bakteri, Hastalık, Parazit, Virüs

#### 1 Giriş

Su kaynakları hem ekosistemi hem de insan sağlığını etkileyen çeşitli stresörlerle karşı karşıyadır [1, 2]. Su kaynakları atık sular tarafından kirletilmektedir. İnsan sağlığına risk oluşturan patojenler içeren kısmen arıtılmış atıksular alıcı ortama salınmaktadır [3-5]. Popülasyon, çeşitli faaliyetler (örneğin, avlanma, yiyecek toplama, balıkçılık) sırasında bu patojenlere maruz kaldığından habersiz olabilir [5-7]. Maruz kalmanın ardından bu patojenlerin çoğu, ishal ve kusma ile karakterize klinik bir insan hastalığı olan akut gastrointestinal hastalığa yol açabilir [5, 8, 9]. Hastalık, en çok beş yaşın altında olmak üzere tüm yaş gruplarında hastalık ve morbiditeye bağlı ölümlerin 5 ana nedeni arasında yer almaktadır. İshal, yaklaşık 4.620 milyon atak/yıl ile dünya çapında en yaygın hastalık nedenleri arasındadır [9, 10]. Gastrointestinal enfeksiyonlara virüsler, parazitler ve bakteriler dahil olmak üzere patojenler neden olur [9].

#### Abstract

In this study, gastrointestinal pathogens (bacterial gastroenteritis, viral gastroenteritis, enteroviruses, human parechovirus, adenoviruses, stool parasites) in Tunceli biological wastewater treatment plant (TBAAT) are investigated. The gastrointestinal pathogen analyzes are done in influent and effluent of TBAAT. According to obtained results, enterohemorrhagic/verotoxin-producing *Esherichia coli*, *salmonella*, noroviruses G1, noroviruses G2, astroviruses, adenoviruses, and *Giardia lamblia* agents were detected in influents of the TBAAT. Although these agents are present in the influents of TBAAT, bacterial agents causing gastroenteritis, enteroviruses, parechoviruses, adenoviruses (EPA) and stool parasites are not detected in effluents of the TBAAT. Noroviruses G2, astroviruses and adenoviruses from viral agents were detected as positive (+) in effluents of the TBAAT.

**Keywords:** Wastewater, Bacteria, Illness, Parasite, Virus

Enterik virüsler, enfekte bireylerin dışkıları yoluyla çok sayıda boşaltımlarının bir sonucu olarak atıksuda bulunur. Geleneksel atıksu arıtımı ile tamamen ortadan kaldırımlazlar [2, 11]. Enterik virüsler sularda aylarca yaşayabilir [12]. Enterik virüslerin küresel olarak gastrointestinal hastalıkların başlıca etyolojik ajanları olduğuna inanılmaktadır. Rotavirüs ve Norovirüs, çocukluk çağı diyare ve gastroenterit salgınlarının önde gelen nedenleridir [13-15]. Enterovirüsler, Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından ilgili su kaynaklı patojenler olarak listelenmiştir [10]. Solunum salgılarında ve enfekte kişilerin dışkısında bulunurlar [2]. Astrovirüslerin neden olduğu hastalık, benzer uzunlukta bir kuluçka döneminden sonra 2-3 gün sürer [16]. Adenovirüsler 40 ve 41, ABD'de ishal nedeniyle hastaneye yatırılanların %5-20'sini oluşturmaktadır [16-18]. Sapovirüsler semptomatik enfeksiyonlara neden olur. Sapovirüsler ABD ve Birleşik Krallık'ta ishal nedeniyle

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: murattopal@munzur.edu.tr (M. Topal)

Geliş / Recieved: 18.03.2022 Kabul / Accepted: 14.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1090090

hastaneye yatırılanların yaklaşık %3'ünü oluşturmaktadır [16].

*E. coli* fekal kontaminasyonun bir göstergesidir. Çeşitli Avrupa Birliği ülkelerinde atık suyun yeniden kullanımı için *E. coli*'nin etkin bir şekilde uzaklaştırılması esastır [19-21]. İnsanlarda bulaşıcı ishale neden olan *Campylobacter jejuni* ve *Campylobacter coli* halk sağlığı açısından çok önemli hale gelmiştir [22]. *Salmonella*, bulaşıcı bağırsak hastalıkları salgınlarında en sık tanımlanan mikroorganizmalardan biridir [23]. *Shigella* cinsinin gram negatif bakterileri, yılda yaklaşık 1 milyon kişinin ölümüne neden olan Shigelloza neden olur [24, 25]. Toksik Clostridium *difficile*, sağlık bakımıyla ilişkili ishalin en büyük etkenidir [26, 27]. *Yersinia enterocolitica* enterik bir patojen olup ishal ile karakterize Yersiniosis' in etkenidir [28-31].

*E. histolytica*, salgınların etyolojik ajanları olmuştur [32-34]. *E. histolytica* atıksu sistemlerinde bulunur [34]. ABD'de evsel su kaynaklı Giardiasis ve Cryptosporidiosis sonucu meydana gelen ölümler bildirilmiştir [35, 36]. *G. lamblia* dünya çapında dışkı testlerinde en çok tanımlanan bir bağırsak parazittir [37, 38]. Uygun şekilde arıtılmamış atıksu ile sebze sulamanın yaygın olduğu Malamulele, Güney Afrika'daki çiftçilerden ve çocuklarından alınan dışkı örnekleri, *G. lamblia* ile yaygın enfeksiyonlara işaret etmiştir [38, 39]. Cryptosporidium yaygın gastrointestinal hastalığa neden olan bir protozoan parazittir. Giardia dünyada en sık teşhis edilen gastrointestinal protozoon olmasına rağmen, Cryptosporidium salgınları sırasında daha fazla birey etkilenir [40].

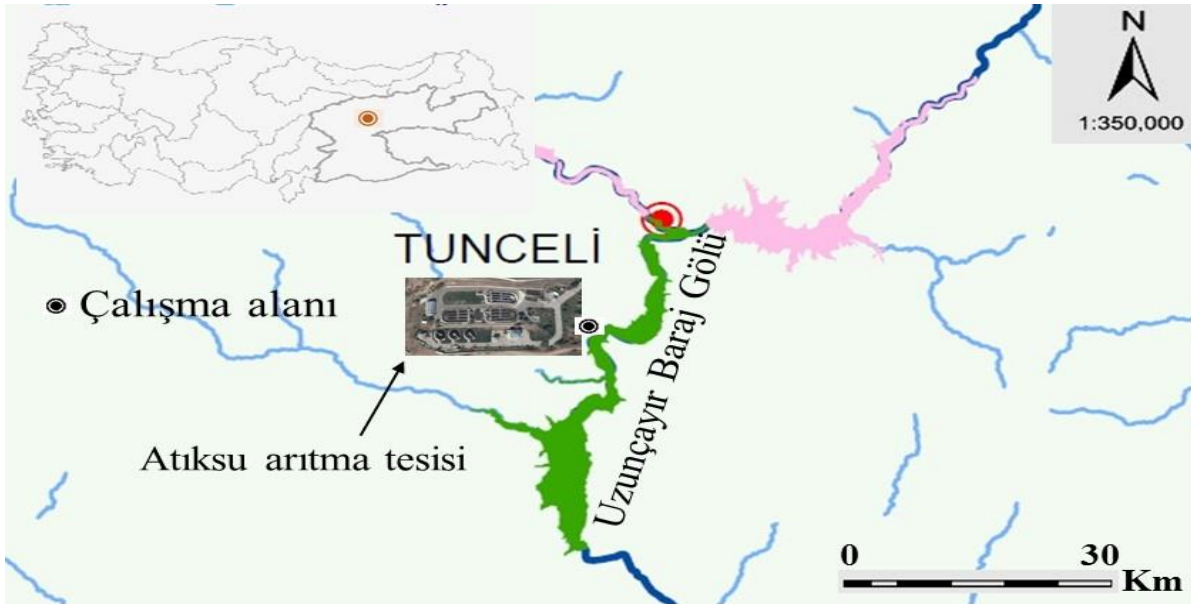
Bu çalışmada, Tunceli ilinde bulunan biyolojik atıksu arıtma tesisinde, gastrointestinal patojenler (Enterohemorragic/verotoxin üreten *E. coli*, *Campylobacter coli/jejuni/lari* ve IC, *C. difficile*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., Enteroinvaziv *E. coli*, *Y. enterocolitica*, Norovirüsler (NoroG1), Norovirüsler (NoroG2), Rotavirüsler (Rota),

Astrovirüsler (Astro), Adenovirüsler (HAdV), Sapovirüsler (Sapo), Enterovirüsler, İnsan Parechovirüsü (HPeV), Adenovirüsler, *E. histolytica*, *G. lamblia*, *C. parvum*) araştırılmıştır. Gastrointestinal patojenlerin farklı zamanlarda çeşitli salgınlara neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu çalışma, atıksularda bulunan patojenlerin yol açabileceği hastalıkların önlenmesi için önceden tedbir alınabilmesi açısından önemli bir çalışmadır.

## 2 Materyal ve metot

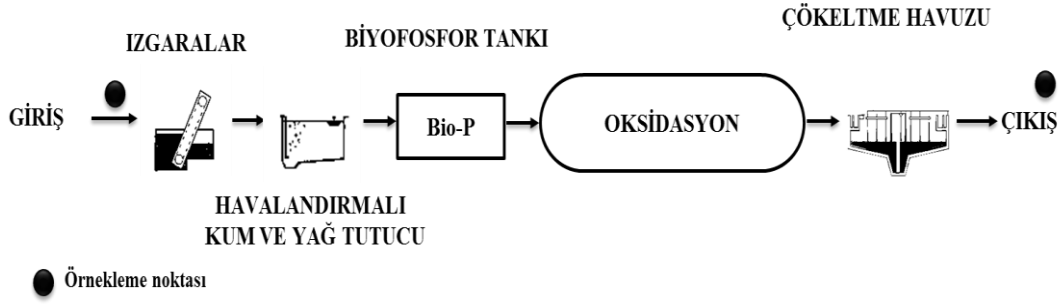
### 2.1 Çalışma alanı ve örnekleme

Çalışma alanı olarak biyolojik atıksu arıtma tesisi seçilmiştir (Tunceli, Türkiye) (Şekil 1). TBAAT, belediye imar planı kapsamında yerleşim yerlerinin atıksularının yaklaşık %90-95'ini arıtmaktadır. TBAAT 'nin mevcut atıksu arıtma kapasitesi 9000 m<sup>3</sup>/gün'dür. TBAAT temel olarak sırasıyla bir ızgara, havalandırılmalı kum ve yağ tutucu, biyofosfor tankı, oksidasyon hendekleri ve ikincil arıtıcı ünitelerinden oluşmaktadır. TBAAT 'de arıtılan/deşarj edilen atıksu miktarı 5500-6000 m<sup>3</sup>/s'dir. TBAAT giriş ve çıkış suyu örnekleme noktalarının koordinatları (UTM ED50 6°) şu şekildedir: Giriş suyu örnekleme noktası =Y:545117, X:4324477 ve çıkış suyu örnekleme noktası = Y:545106, X:4324328. Koordinat değerlerini belirlemek için Magellan eXplorist 510 (Santa Clara, ABD) aleti kullanılmıştır. TBAAT 'nin akış diyagramı ve örnekleme noktaları Şekil 2'de verilmiştir. Gastrointestinal analizler için örnekleme noktaları şu şekildedir; (1) Giriş atıksuyu ve (2) Çıkış atıksuyu. TBAAT 'nin giriş ve çıkış suyundan kompozit numuneler alınmıştır. Gastrointestinal analizler için atıksu numuneleri, kullanımdan önce sterilize edilmiş olan 0.25 L'lik numune toplama kaplarına toplanmıştır. Numuneler laboratuvara getirilerek analizler için hazırlanmıştır.



Şekil 1. Tunceli biyolojik atıksu arıtma tesisi





Şekil 2. Tunceli biyolojik atıksu arıtma tesisi akım şeması

## 2.2. Analiz

Atıksu numunelerinde gastrointestinal patojen analizi aşamaları şunlardır;

(i) İzolasyon Aşaması: Bu aşama, EZ1 cihazı kullanılarak DNA izolasyonu yapılır. Gastrointestinal panelinde atıksu izolasyonu için 400 µl atıksu alınıp 2 mL' lik tüpe aktarılır. Bu tüp cihazda uygun yere yerleştirilir. İzole edilecek her bir örnek için ayrı ayrı 1.5 mL' lik tüpler içerisine AVE bufferdan 54.2 µl, CRNA' dan 3.8 µl, internal kontrolden (IC) 2 µl kullanılarak mix hazırlanır. Bu tüpler iyice vortekslenir, spin yapılır. Cihazda uygun yere yerleştirilir. Daha sonra cihazda DNA aktarımının yapılacağı bölüme 1.5 mL' lik tüpler ve yine uygun bölüme pipet ve hazneleri ile EZ1 mini kit kartuşları yerleştirilir. İzolasyon protokolü başlatılır. İzolasyon protokolü 43 dakika sürmektedir.

(ii) PCR aşaması: Bakteriyel gastroenterit, viral gastroenterit, EPA ve dışkı parazit kit kutuları -20°C ' den çıkarılır içinden çıkan PPMix, buffer, negatif kontrol (NC), pozitif kontrol (PC) çözünmesi için oda sıcaklığına bırakılır. Enzim PCR mixi hazırlanana kadar -20°C' de muhafaza edilir. Çözünen buffer, PP mix, NC ve IC ile PC vortex spin yapılır. Daha sonra enzim -20°C ' den çıkarılır ve kısaca spin yapılır. Her bir örnek için 1.5 µl PP mix, 12.5 µl buffer, 1 µl enzim kullanılarak karışım hazırlanır. Bu mix, numaralandırılan 0.2 mL' lik PCR tüplerine 15' er µl olacak şekilde dağıtılır. Daha sonra her bir örneğin DNA' sından kendisi için numaralandırılan ve içinde mix bulunan bu 0.2 mL' lik tüplere 10' ar µl olacak şekilde dağıtılır. ROTOR-GENE cihazında Fast Track Diagnostics multiplex PCR protokolünde PCR aşaması başlatılır. Bu protokol 113 dakikadır.

(iii) Analiz aşaması: Analiz green, orange, yellow ve red kanallarından yapılır. Bakteriyel gastroenteritler için green kanalından: *E. coli*, *C. difficile*; orange kanalından: *Shigella* ve internal kontrol; red kanalından: *Campylobacter* ve *Salmonella*; yellow kanalından: *Y. enterocolitica* bakılır. Viral gastroenteritler için green kanalından: Nörovirüs G2, Sapovirüs; yellow kanalından: Rotavirüs, internal kontrol; red kanalından: Nörovirüs G1, Adenovirüs bakılır. EPA için green kanalından: Enterovirüs; yellow kanalından: Parechovirüs; orange kanalından: internal kontrol; red kanalından: Adenovirüs bakılır. Dışkı parazitleri için red kanalından: *Giardia lamblia*; yellow kanalından: *E. histolytica*; orange kanalından: *Cryptosporidium* etmenine bakılır.

## 3 Bulgular ve tartışma

Çalışmamızda TBAAT' den alınan örneklerde gastrointestinal patojenler araştırılmıştır. Gastrointestinal patojenler 4 grup altında incelenmiştir. Bunlar; (i) Gastroenterite neden olan bakteriyel ajanlar, (ii) Gastroenterite sebep viral etkenler, (iii) EPA (iv) Dışkı parazitleri.

### 3.1 Bakteriyel ajanlar

TBAAT giriş ve çıkış atıksularında araştırılan gastroenterite neden olan bakteriyel ajanlar şunlardır; Enterohemorajik/verotoksin üreten *E. coli*, *Campylobacter coli/jejuni/lari* ve IC, *C. difficile*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., Enteroinvaziv *E.coli* ve *Y. enterocolitica*.

TBAAT girişinden alınan örneklerde gastroenterite neden olan bakteriyel etkenler açısından, Enterohemorajik/verotoksin üreten *E. coli* ve *Salmonella* spp. pozitif (+) olarak belirlendi. Ancak *Campylobacter coli/jejuni/lari*, *C. difficile*, *Shigella* spp., Enteroinvaziv *E.coli* ve *Y. enterocolitica* negatif (-) olarak belirlendi. TBAAT çıkış atıksuları gastroenterite neden olan bakteriyel etkenler açısından incelendiğinde, Enterohemorajik/verotoksin üreten *E. coli*, *Campylobacter coli/jejuni/lari* ve IC, *C. difficile*, *Salmonella* spp., *Shigella* spp., Enteroinvaziv *E. coli* ve *Y. enterocolitica* negatif (-) olarak bulundu. Enterohemorajik/verotoksin üreten *E. coli* ve *Salmonella* spp. giriş atıksuyunda (+) olarak tespit edilmişken TBAAT çıkış suyunda (-) olarak tespit edilme sebebi bu ajanların atıksu arıtma tesisinde sistemden deşarj edilen arıtma çamurlarına bağlanmaları ile açıklanabilir. Ayrıca bu durum, atıksu arıtma tesisinde gastroenterite neden olan bakteriyel ajanların uzaklaştırıldığını da göstermiştir.

### 3.2 Viral ajanlar

TBAAT 'nin giriş ve çıkış atıksularında araştırılan gastroenterite neden olan viral ajanlar şunlardır; Norovirüsler G1, Norovirüsler G2, Rotovirüsler, Astrovirüsler, Sapovirüsler ve Adenovirüsler.

TBAAT giriş atıksuyundan alınan örneklerde gastroenterite neden olan viral ajanlar açısından Norovirüsler G1, Norovirüsler G2, Astrovirüsler ve Adenovirüsler pozitif (+) olarak belirlendi. Benzer şekilde literatürde giriş atıksuyunda Norovirüsler G2 varlığı rapor edilmiştir [41]. Çalışmamızda Rotovirüsler ve Sapovirüsler negatif (-) olarak belirlendi. TBAAT çıkış suyu

incelendiğinde Norovirüsler (NoroG1), Rotovirüsler (Roto) ve Sapovirüsler negatif (-) olarak tespit edildi. Bu virüsler tesisden çıkan fazla çamur tarafından adsorbe edilmiş olabilir ve biyolojik atıksu arıtma tesisi çıkış sularında bulunmayabilir. Elde ettiğimiz sonuca benzer şekilde literatürde, ikincil arıtılmış atıksuyun NoroG1 için negatif olduğu bildirilmiştir [41]. Çalışmamızda TBAAT çıkış suyunda Norovirüs G2 (NoroG2) pozitif (+) olarak belirlenmiştir. Bu virüsler, biyolojik atıksu arıtma tesisinde giderilememişlerdir. Atıksularda bulunduğu bilinen Norovirüslerin, hastalık yükünden sorumlu olmaları nedeniyle ABD'de halk sağlığını ilgilendiren patojenler listesinde yer aldığı akılda tutulmalıdır [41]. TBAAT 'nin çıkış atık suyunda astrovirüsler de pozitif (+) olarak belirlendi. Bu virüsler de, biyolojik atıksu arıtma tesisinde giderilememişlerdir. Astrovirüsler, semptomatik çocuklarda en sık tanımlanan 2. virüstür [16, 42, 43]. Adenovirüsler de TBAAT 'nin çıkış atık suyunda pozitif (+) olarak belirlendi. Bu virüsler de, biyolojik atıksu arıtma tesisinde giderilememişlerdir. Elde ettiğimiz sonuca benzer şekilde literatürde, Adenovirüsler hem giriş atıksuyunda hem de çıkış atıksuyunda bildirilmiştir [44].

### 3.3 EPA ajanları

TBAAT 'nin giriş ve çıkış atıksularında araştırılan gastroenterite neden olan EPA ajanları şunlardır; Enterovirüsler, Parechovirüsler ve Adenovirüsler.

TBAAT giriş ve çıkış atıksularından alınan örneklerde gastroenterite neden olan viral ajanlar açısından Enterovirüsler, Parechovirüsler ve Adenovirüsler negatif (-) olarak belirlenmiştir. Bu durum Enterovirüsler, Parechovirüsler ve Adenovirüslerin atıksuyun toplandığı kanalizasyon sisteminden biyolojik atıksu arıtma tesisine ulaşmadığını gösterebilir. Literatürde de benzer sonuçlar bildirilmiştir. De Sanctis [21]'nin çalışmasında adenovirüs ve enterovirüs için sınırlı sayıda pozitif atıksu örneği varlığı bildirilmiştir. Numunelerin çoğunda adenovirüs ve enterovirüs bulunmamasının, alınan numunelerde daima bulunmalarını sağlayamayan atıksu kaynaklı olabileceğini bildirmişlerdir. Bu durum, adenovirüs ve enterovirüsün toplanan örneklerin sadece küçük bir kısmında mevcut olduğunu bildiren belediye atıksuları üzerinde yapılan çeşitli araştırmalarla da doğrulanmıştır [21, 45-47].

### 3.4 Dışkı parazitleri

TBAAT giriş ve çıkış atıksularında araştırılan dışkı parazitleri şunlardır; Giardia lamblia (G. Lamblia), Entamoeba histolytica (E. histolytica) ve Cryptosporidium parvum (C. parvum).

TBAAT 'nin girişinden alınan örneklerde gastroenterite neden olan dışkı parazitleri açısından Giardia lamblia pozitif (+) olarak belirlendi. Atıksularda mevcut olduğu bilinen Giardia spp., hastalık yükünden sorumlu oldukları için ABD'de halk sağlığı endişesi taşıyan patojenler listesinde de yer almaktadır [41]. Literatürde bizim sonuçlarımıza benzer şekilde arıtılmamış atıksularda Giardia kistleri rapor edilmiştir [36, 41, 44, 48]. Çalışmamızda E. histolytica ve C. parvum giriş atıksuyunda negatif (-) olarak tespit edilmiştir. TBAAT çıkış suyu incelendiğinde G. lamblia, E. histolytica ve C. parvum negatif (-) olarak bulunmuştur. Analiz

sonuçlarına göre atıksu arıtma tesisi çıkış suyunda tüm dışkı parazitlerinin negatif (-) olmasının nedeni şu şekilde açıklanabilir: Biyolojik atıksu arıtma tesisinde dışkı parazitleri fazla çamur tarafından adsorplanabilir ve bu nedenle biyolojik atıksu arıtma tesisi çıkış atıksularında bulunmayabilir. Ayrıca, arıtılmış atıksularda protozoaların (örneğin Cryptosporidium gibi) varlığının atıksuların çevreye deşarjı sırasında en büyük endişelerden biri olduğu unutulmamalıdır [49].

## 4 Sonuçlar

İklim değişikliği, toplumlar ve ekonomiler için en büyük zorluklardan birini temsil etmektedir. İklim değişikliğinin su kıtlığı üzerindeki etkisini değerlendiren Gosling ve Arnell [50] yaklaşık iki milyar insanın su kıtlığı koşullarında yaşadığını vurgulamıştır. Küresel olarak çekilen suyun %70' den fazlasının tarımsal sulama için kullanıldığı göz önüne alındığında, geri kazanılan kentsel atıksuyun yeniden kullanımı son zamanlarda giderek daha fazla ilgi görmeye başlamıştır [21, 51-53]. Bununla beraber, sulama suyu kaynaklarının yetersiz kalitesi, çoğunlukla çığ tüketilen sebzeler gibi gıdalarda patojenlerin hayatta kalmasına yol açabilir [30, 54-57]. Bu nedenle, patojenlerin bulaşmasını önleyerek çevreyi ve halk sağlığını tehlikeye atmaktan kaçınmak için atıksuyun yeniden kullanımı güvenli bir şekilde yapılmalıdır [21]. Kentsel atıksu ile ilişkili bulaşıcı ajanlar arasında virüsler, parazitler ve bakteriler bulunur [44]. Halk sağlığının korunması, atıksudaki patojenlerin atıksu alıcı ortama deşarj edilmeden önce mümkün olduğu ölçüde uzaklaştırılmasını gerektirir [36]. Patojenlerin varlığı, arıtılmış atıksuyun tarımsal yeniden kullanım için uygunluğunu değerlendirmek için dikkate alınması gereken önemli parametreleri temsil eder [21]. Gastrointestinal patojenler, arıtılmamış veya yetersiz düzeyde arıtılmış atıksuların su kaynaklarına boşaltılması sonucunda rekreasyonel ve mesleki faaliyetler gibi diğer yollar vasıtasıyla da insanlara ulaşarak hem insan hem de çevre sağlığını tehdit etmektedir. Gastrointestinal patojenlerin farklı zamanlarda çeşitli salgınlara neden olduğu unutulmamalıdır. Sonuç olarak, atıksu arıtma tesislerinde gastrointestinal patojenlerin varlığının tanımlanması, bu patojenlerden kaynaklanabilecek potansiyel sağlık risklerinin önceden belirlenmesi açısından kritik öneme sahip olmasının yanısıra atıksuyun yeniden kullanımının düşünüldüğü durumlarda da büyük önem taşımaktadır.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Benzerlik oranı (iThenticate): %13

## Kaynaklar

- [1] E. K. Lipp, S. A. Farrah and J. B. Rose, Assessment and impact of microbial fecal pollution and human enteric pathogens in a coastal community. Marine Pollution Bulletin, 42, 286-293, 2001. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(00\)00152-1](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(00)00152-1).
- [2] V. E. Prez, P. I. Gil, C. F. Temprana, P. R. Cuadrado, L. C. Martínez, M. O. Giordano, G. Masachessi, M. B. Isa, V. E. Ré, J. V. Paván, S. V. Nates and P. A. Barril,

- Quantification of human infection risk caused by rotavirus in surface waters from Córdoba, Argentina. *Science of The Total Environment*, 538, 220-229, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.041>.
- [3] K. Krumhansl, W. Krkosek, M. Greenwood, C. Ragush, J. Schmidt, J. Grant, J. Barrell, L. Lu, B. Lam, G. Gagnon and R. Jamieson, Assessment of Arctic community wastewater impacts on marine benthic invertebrates. *Environmental Science and Technology*, 49 (2), 760-766, 2015. <https://doi.org/10.1021/es503330n>.
- [4] Y. Huang, L. Truelstrup Hansen, C. Ragush and R. Jamieson, Disinfection and removal of human pathogenic bacteria in arctic waste stabilization ponds. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (33), 32881-32893, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8816-9>.
- [5] K. Daley, R. Jamieson, D. Rainham, L. T. Hansen and S. L. Harper, Microbial risk assessment and mitigation options for wastewater treatment in Arctic Canada. *Microbial Risk Analysis*, 100186, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mran.2021.100186>.
- [6] S. Donaldson, J. Van Oostdam, C. Tikhonov, M. Feeley, B. Armstrong, P. Ayotte, O. Boucher, W. Bowers, L. Chan, F. Dallaire, R. Dallaire, E. Dewailly, J. Edwards, G. M. Egeland, J. Fontaine, C. Furgal, T. Leech, E. Loring, G. Muckle, T. Nancarrow, D. Pereg, P. Plusquellec, M. Potyrala, O. Receveur and R. G. Shearer, Environmental contaminants and human health in the Canadian Arctic. *Science of The Total Environment*, 408 (22), 5165-5234, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.04.059>.
- [7] L. M. Nilsson, G. Destouni, J. Berner, A. A. Dudarev, G. Mulvad, J. Ø. Oland, A. Parkinson, C. Tikhonov, A. Rautio and B. Evengård, A call for urgent monitoring of food and water security based on relevant indicators for the Arctic. *Ambio*, 42, 816-822, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0427-1>.
- [8] H. Leclerc, L. Schwartzbrod and E. Dei-Cas, Microbial agents associated with waterborne disease, *Critical Review Microbiology*, 28 (4), 371-409, 2002. <https://doi.org/10.1080/1040-840291046768>.
- [9] M. A. Martínez, L. Soto-Del Rio Mde, R. M. Gutierrez, C. Y. Chiu, A. L. Greninger, J. F. Contreras, S. Lopez, C. F. Arias and P. Isa, DNA Microarray for Detection of Gastrointestinal Viruses. *Journal of Clinical Microbiology*, 53 (1), 136-145, 2015. <https://doi.org/10.1128/JCM.01317-14>.
- [10] WHO, World health statistics, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2011.
- [11] M. Moazeni, M. Nikaeen, M. Hadi, S. Moghim, L. Mouhebat, M. Hatamzadeh and A. Hassanzadeh, Estimation of health risks caused by exposure to enteroviruses from agricultural application of wastewater effluents. *Water Research*, 125, 104-113, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.028>.
- [12] C. P. Gerba and J. E. Smith, Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. *Journal of Environmental Quality*, 34, 42-48, 2005. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0042a>.
- [13] A. Kundu, G. McBride and S. Wuertz, Adenovirus-associated health risks for recreational activities in a multi-use coastal watershed based on site-specific quantitative microbial risk assessment. *Water Research*, 47, 6309-6325, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.002>.
- [14] F. G. Masclaux, P. Hotz, D. Gashi, D. Savova-Bianchi and A. Oppliger, Assessment of airborne virus contamination in wastewater treatment plants. *Environment Research*, 133, 260-265, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.06.002>.
- [15] T. Gao, R. Chen, X. Wang, H. Hao, Y. Li, J. Zhou and L. Zhang, Application of disease burden to quantitative assessment of health hazards for a decentralized water reuse system. *Science of the Total Environment*, 551-552, 83-91, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.210>.
- [16] M. J. Carter, Enterically Infecting Viruses: Pathogenicity, Transmission and Significance for Food and Waterborne Infection. *Journal of Applied Microbiology*, 1354-1380, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02635.x>.
- [17] I. Uhnoo, G. Wadell, L. Svenson and M. E. Johansson, Importance of enteric adenoviruses 40 and 41 in acute gastroenteritis in infants and children. *Journal of Clinic Microbiology*, 20, 365-372, 1984. <https://doi.org/10.1128/jcm.20.3.365-372.1984>.
- [18] K. L. Kotloff, G. A. Losonsky, J. G. Morris, S. S. Wasserman, N. Singh-Naz and M. M. Levine, Enteric adenovirus infection and childhood diarrhoea: an epidemiological survey in three clinical settings. *Pediatrics*, 84, 219-225, 1989.
- [19] L. A. Sanz and B. M. Gawlik, Water Reuse in Europe Relevant Guidelines, Needs for and Barriers to Innovation, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014. <https://doi.org/10.2788/29234>.
- [20] N. V. Paranychianakis, M. Salgot, S. A. Snyder and A. N. Angelakis, Water reuse in EU states: necessity for uniform criteria to mitigate human and environmental risks. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45, 1409-1468, 2015. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.955629>.
- [21] M. De Sanctis, G. Del Moro, S. Chimienti, P. Ritelli, C. Levantesi and C. Di Iaconi, Removal of pollutants and pathogens by a simplified treatment scheme for municipal wastewater reuse in agriculture. *Science of The Total Environment*, 580, 17-25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.002>.
- [22] R. Contreras-Omaña, A.E. Escorcia-Saucedo and J. A. Velarde-Ruiz Velasco, Prevalence and impact of antimicrobial resistance in gastrointestinal infections: A review. *Revista de Gastroenterología de México*, 86 (3), 265-275, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rgmexen.2021.06.004>.
- [23] S. Bahrami, M. Zarei and K. Liljebjelke, Chlorine-stressed *Salmonella* cells are significantly more engulfed by *Acanthamoeba* trophozoites and have a

- longer intracystic survival than the non-stressed cells. *Food Microbiology*, 102, 103927, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103927>.
- [24] M. Emch, M. Ali and M. Yunus, Risk areas and neighborhood-level risk factors for *Shigella dysenteriae* 1 and *Shigella flexneri*. *Health Place*, 14 (1), 96-105, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2007.05.004>.
- [25] D. Singh and V. Agarwal, An in vivo acute toxicity and anti-shigellosis effect of designed formulation on rat. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 100536, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jaim.2021.100536>.
- [26] J. G. Bartlett, Narrative review: the new epidemic of *Clostridium difficile*-associated enteric disease, *Ann Intern Med*, 145, 758-764, 2006. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-145-10-200611210-00008>.
- [27] F. Skyum, M. Chen and C. B. Mogensen, Evaluation of a new fast in-house Real-Time PCR assay for detecting both Norovirus and toxigenic *Clostridium difficile* using fecal sample and rectal swab. *American Journal of Infection Control*, 50 (1), 67-71, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2021.08.026>
- [28] E. J. Bottone, *Yersinia enterocolitica*: revisitation of an enduring human pathogen. *Clinical Microbiology Newsletter*, 37, 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.clinmicnews.2014.12.003>.
- [29] M. Adeolu, S. Alnajjar, S. Naushad and R. S. Gupta, Genome-based phylogeny and taxonomy of the 'Enterobacteriales': proposal for enterobacterales ord. nov. divided into the families Enterobacteriaceae, Erwiniaceae fam. nov., Pectobacteriaceae fam. nov., Yersiniaceae fam. nov., Hafniaceae fam. nov., Morganellaceae fam. nov., and Budviciaceae fam. nov, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 66, 5575-5599, 2016. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.001485>.
- [30] D. Cristiano, M. F. Peruzy, M. Aponte, A. Mancusi, Y. T. R. Proroga, F. Capuano and N. Murrub, Comparison of droplet digital PCR vs real-time PCR for *Yersinia enterocolitica* detection in vegetables. *International Journal of Food Microbiology*, 354, 109321, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109321>.
- [31] B. T. F. Martins, E. C. de Azevedo, R. S. Yamatogi, D. R. Call and L. A. Nero, Persistence of *Yersinia enterocolitica* bio-serotype 4/O:3 in a pork production chain in Minas Gerais, Brazil. *Food Microbiology*, 94, 103660, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103660>.
- [32] P. Karanis, C. Kourenti and H. Smith, Waterborne transmission of protozoan parasites: a worldwide review of outbreaks and lessons learnt. *Journal of Water Health*, 5, 1-38, 2007. <https://doi.org/10.2166/wh.2006.002>.
- [33] S. Baldursson and P. Karanis, Waterborne transmission of protozoan parasites: review of worldwide outbreaks - an update 2004–2010. *Water Research*, 45, 6603-6614, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.013>.
- [34] J. Plutzer, and P. Karanis, Neglected waterborne parasitic protozoa and their detection in water. *Water Research*, 101, 318-332, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.05.085>.
- [35] S. A. Collier, L. Deng, E. A. Adam, K. M. Benedict, E. M. Beshearse, A. J. Blackstock, B. B. Bruce, G. Derado, C. Edens, K. E. Fullerton, J. W. Gargano, A. L. Geissler, A. J. Hall, A. H. Havelaar, V. R. Hill, R. M. Hoekstra, S. C. Reddy, E. Scallan, E. K. Stokes, J. S. Yoder and M. J. Beach, Estimate of burden and direct healthcare cost of infectious waterborne disease in the United States. *Emerging of Infection Diseases*., 27 (1), 140-149, 2021. <https://doi.org/10.3201/eid2701.190676>
- [36] L. Teel, A. Olivieri, R. Danielson, B. Delić, B. Pecson and J. Crook, Protozoa reduction through secondary wastewater treatment in two water reclamation facilities. *Science of The Total Environment*, 807 (3), 151053, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151053>
- [37] A. Efstratiou, J. E. Ongerth and P. Karanis, Waterborne transmission of protozoan parasites: review of worldwide outbreaks - an update 2011–2016. *Water Research*, 114, 14-22, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.036>
- [38] L. P. Leonel and A. L. Tonetti, Wastewater reuse for crop irrigation: Crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. *Science of The Total Environment*, 775, 145833, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145833>
- [39] J. R. Gumbo, E. M. Malaka, J. O. Odiyo and L. Nare, The health implications of wastewater reuse in vegetable irrigation: a case study from Malamulele, South Africa. *International Journal of Environment Health Research*, 20, 201-211, 2010. <https://doi.org/10.1080/09603120903511093>.
- [40] R. A. Guy, P. Payment, U. J. Krull and P. A. Horgen, Real-time PCR for quantification of *Giardia* and *Cryptosporidium* in environmental water samples and wastewater. *Applied and Environmental Microbiology*, 69, 5178-5185, 2003. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.9.5178-5185.2003>.
- [41] E. Seto, A. W. Olivieri and R. E. Danielson, Quantitative microbial risk assessment used to evaluate seasonal wastewater treatment limits: case study in Vacaville, CA, *Water Sci. Technol. Water Supply*, 18, 910-925, 2018. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.162>.
- [42] M. E. Ellis, B. Watson and B. K. Mandal, Microorganisms in gastroenteritis. *Archives of Disease Childhood*, 59, 848-855, 1984. <https://doi.org/10.1136/adc.59.9.848>.
- [43] J. E. Herrmann, D. N. Taylor, P. Echeverria and N. R. Blacklow, Astroviruses as a cause of gastroenteritis in children. *N Engl J Med* 324, 1757-1760, 1991. <https://doi.org/10.1056/NEJM199106203242501>.
- [44] E. Y. Seto, J. Konnan, A. W. Olivieri and R. E. Danielson, A quantitative microbial risk assessment of wastewater plant blending: case study in San Francisco Bay. *Environmental Science: Water Research and*

- Technology, 2, 134-145, 2016.  
<https://doi.org/10.1039/C5EW00147A>.
- [45] G. Sedmak, D. Bina, J. MacDonald and L. Couillard, Nine-year study of the occurrence of culturable viruses in source water for two drinking water treatment plants and the influent and effluent of a wastewater treatment plant in Milwaukee, Wisconsin (August 1994 through July 2003). *Applied and Environment Microbiology*, 1042-1050, 2005.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.71.2.1042-1050.2005>.
- [46] J. Ottoson, A. Hansen, B. Bjorlenius, H. Norder and T. A. Stenstrom, Removal of viruses, parasitic protozoa and microbial indicators in conventional and membrane processes in a wastewater pilot plant. *Water Research*, 40, 1449-1457, 2006.  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.039>.
- [47] S. Jebri, J. Jofre, I. Barkallah, M. Saidi and F. Hmaied, Presence and fate of coliphages and enteric viruses in three wastewater treatment plants effluents and activated sludge from Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 2195-2201, 2012.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-011-0722-y>
- [48] B. Pecson, E. Darby, M. Bartolo, G. Di Giovanni, M. Leddy, K. Nelson, C. Rock, T. Slifko and A. Olivieri, DPR-2: Pathogen Monitoring in Raw Wastewater, WRF 4989, The Water Research Foundation, Alexandria, VA Office, <https://www.waterrf.org/research/projects/pathogen-monitoring-untreated-wastewater>, Accessed 10 March 2021.
- [49] M. Kitajima, E. Haramoto, B. C. Iker, C. P. Gerba, Occurrence of *Cryptosporidium*, *Giardia*, and *Cyclospora* in influent and effluent water at wastewater treatment plants in Arizona. *Science of The Total Environment*, 484, 129-136, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.036>.
- [50] S. N. Gosling and N. W. Arnell, A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climate Change*, 134, 371-385, 2016.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>.
- [51] UNESCO, United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, The 1st UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life, [http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/table\\_contents/index.shtml](http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr1/table_contents/index.shtml), Accessed 12 April 2022.
- [52] A. Levine and T. Asano, Recovering sustainable water from wastewater. *Environmental Science and Technology*, 1, 201-208, 2004.  
<https://doi.org/10.1021/es040504n>.
- [53] B. F. F. Pereira, Z. L. He, M. S. Silva, U. Herpin, S. F. Nogueira, C. R. Montes and A. J. Melfi, Reclaimed wastewater: impact on soil-plant system under tropical conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 192, 54-61, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.095>.
- [54] C. N. Berger, S. V. Sodha, R. K. Shaw, P. M. Griffin, D. Pink, P. Hand and G. Frankel, Fresh fruit and vegetables as vehicles for the transmission of human pathogens. *Environment Microbiology*, 12, 2385-2397, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02297.x>.
- [55] EFSA, Panel on Biological Hazards (BIOHAZ) Panel; Scientific Opinion on the risk posed by pathogens in food of non-animal origin. Part 1 (outbreak data analysis and risk ranking of food/pathogen combinations). 138, 2013.  
<https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3025>.
- [56] J. N. Ssemanda, M. W. Reij, G. van Middendorp, E. Bouw, R. van der Plaats, E. Franz, C. M. Muvunyi, M. C. Bagabe, M. H. Zwietering and H. Joosten, Foodborne pathogens and their risk exposure factors associated with farm vegetables in Rwanda. *Food Control*, 89, 86-96, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.034>.
- [57] S. M. Markland, D. Ingram, K. E. Kniel, M. Sharma, Water for agriculture: the convergence of sustainability and safety. *Preharvest Food Safety*, 143-157, 2018.  
<https://doi.org/10.1128/microbiolspec.PFS-0014-2016>.





## Şişelenmiş sularda ve tatlı su çeşme sularında trihalometan konsantrasyonları Trihalomethane concentrations in bottled water and fresh water taps

Arzu Ulvi<sup>1,\*</sup> , Senar Aydın<sup>2</sup> , Mehmet Emin Aydın<sup>3</sup> 

<sup>1,2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>3</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

### Öz

Dünya çapında ekonomik ve çevresel maliyetine rağmen şişelenmiş sulara olan ilgi artmaktadır. Şişelenmiş sulara erişim gücü az olan kesimler ise şehirlerde bulunan tatlı su çeşmelerinden içme suyu ihtiyaçlarını karşılamaya çalışmaktadırlar. Bu çalışmada Konya’da satılan şişelenmiş sulardan 24 adet doğal kaynak suyu, 4 adet doğal mineralli su ve 28 adet tatlı su çeşmelerinden alınan numunelerde başlıca dezenfeksiyon yan ürünlerinden olan trihalometan (THM) (kloroform, bromodiklorometan, klorodibromometan, bromoform) bileşiklerinin varlığı araştırılmıştır. Piyasadan temin edilen 28 adet şişelenmiş suda THM bileşikleri dedeksiyon limitinin altında tespit edilmiştir. Tatlı su çeşmelerinden alınan 28 adet numunede ise bromoform hariç diğer THM bileşiklerinin varlığı tespit edilmiştir. Kloroform bileşiği 43.73 µg/L olarak en yüksek konsantrasyon da tespit edilen THM olmuştur. Bromodiklorometan bileşiği ise kloroform bileşiğinden sonra en sık tespit edilen bileşik olmuştur ve maksimum 5.37 µg/L konsantrasyonunda tespit edilmiştir. Toplam THM konsantrasyonlarına bakıldığında, İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik’te verilen toplam THM’ler için 100 µg/L olan kalite standartlarını aşmadığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Şişelenmiş su, İçme suyu, Trihalometan, THM, Tatlı su çeşmesi

### 1 Giriş

Su kaynaklı bulaşıcı hastalıkları azaltmak için içme sularının dezenfeksiyonuna başlanmıştır ve bu büyük bir halk sağlığı başarısı olarak görülmüştür [1]. Suların dezenfeksiyonu kaynatma gibi fiziki işlemler ile ve UV ışınları, metal iyonları, halojenler, ozon, potasyum permanganat gibi oksidantlar kullanılarak yapılabilmektedir. [2]. Klorlama, kolay uygulanabilir olması, etkili oksitleme potansiyeli ve maliyetinden dolayı, en yaygın kullanılan dezenfeksiyon yöntemidir [3, 4]. İçme sularının klor ile dezenfeksiyonu, potansiyel olarak su kaynaklı ölümcül hastalıkların bulaşmasını önemli ölçüde azaltmıştır. Klorlama ile yapılan dezenfeksiyon çok etkili olmasına rağmen toksik dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) oluşturmasından dolayı kullanımı ile ilgili endişeler mevcuttur [1].

Dezenfeksiyon yan ürünleri, dezenfektanların organik ve inorganik maddelerle reaksiyona girmesi sonucu oluşan

### Abstract

Despite the worldwide economic and environmental cost, interest in bottled water has been increasing. Those who have little access to bottled water try to meet their drinking water needs from fresh water fountains in cities. In this study, the presence of trihalomethane (THM) (chloroform, bromodichloromethane, chlorodibromomethane, bromoform) compounds, which are among the main disinfection by-products, were investigated in the samples taken from 24 natural spring waters, 4 natural mineral waters and 28 fresh water fountains sold in Konya. THM compounds were detected below the detection limit in 28 bottles of water supplied from the market. Except for bromoform, the presence of other THM compounds was detected in 28 samples taken from fresh water fountains. The chloroform compound was THM with the highest concentration of 43.73 µg/L. Bromodichloromethane compound was the most frequently detected compound after chloroform compound and was detected at a maximum concentration of 5.37 µg/L. Considering the total THM concentrations, it was determined that they did not exceed the quality standards of 100 µg/L for total THMs given in the Regulation on Water Intended for Human Consumption.

**Keywords:** Bottled water, Drinking water, Trihalomethane, THM, Fresh water fountain

istenmeyen bileşiklerdir. Doğal sularda ki toplam organik maddenin %80’inin çözünmüş organik madde (ÇOM)’den oluşmaktadır. ÇOM sudaki DYÜ oluşumunun başlıca sebebidir. ÇOM konsantrasyon ve özellikleri DYÜ’lerini oluşumunu ve çeşitliliğini etkiler. DYÜ oluşumunu etkileyen diğer faktörler ise bromür, iyodür, amonyak konsantrasyonu, klor dozu, pH, sıcaklık ve reaksiyon süresidir [1]. Trihalometanlar (THM’ler) ve haloasetik asitler (HAA’lar) klorlanmış sularda en sık ve en yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen DYÜ’dir. Bunların dışında tanımlanmış 700’den fazla DYÜ bulunmaktadır [5]. THM’ler, klorlanmış suda ilk tanımlanan DYÜ’lerdir. THM’ler oda sıcaklığında ve yüksek dozlarda uçucudurlar ve ciltten geçebilen bileşiklerdir. Solunum ve yutmanın yanı sıra, duş alma, banyo yapma veya havuzda yüzme yoluyla deriden de alınabilirler [6]. THM oluşumu sıcaklık ile birlikte artmaktadır. İklim değişikliği ile ilgili yapılan çalışmalarda 2050 yılına kadar 1.8 °C sıcaklık artışı beklenmektedir. Bu

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atekinay@erbakan.edu.tr (A. Ulvi)

Geliş / Received: 21.03.2022 Kabul / Accepted: 14.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1091070

durumun THM oluşumunu %39 oranında artmasına sebep olacağı öngörülmektedir [7, 8]. Dört hidrojen atomu içeren bir metan molekülündeki üç hidrojen atomu, klor ve brom ile yer değiştirirse en yaygın tespit edilen dört THM bileşiği oluşmaktadır. Triklorometan (CHCl<sub>3</sub>, kloroform), bromodiklorometan (CHBrCl<sub>2</sub>) klorodibromometan (CHBr<sub>2</sub>Cl), tribromometan (CHBr<sub>3</sub>, bromoform) en yaygın tespit edilen THM bileşikleridir. HAA'ler, THM'lerden sonra karşılaşılan esas dezenfeksiyon gruplarından biridir. Monokloroasetik asit, dikloroasetik asit, trikloroasetik asit, monobromoasetik asit, dibromoasetik asit, tribromoasetik asit, bromokloroasetik asit, bromodikloroasetik asit ve klorodibromoasetik asit olmak üzere başlıca 9 adet HAA vardır [9].

Düzenli olarak küçük miktarlarda maruz kalınan dezenfeksiyon yan ürünlerinin insan sağlığına olumsuz etkileri vardır [10]. THM grubunda kloroform, klorodibromometan, bromodiklorometan ve bromoform bileşiklerinin, HAA grubundan monokloroasetik asit, dikloroasetik asit, trikloroasetik asit, monobromoasetik asit, dibromoasetik asit bileşiklerinin kanser, sitotoksik, genotoksik, üreme anomalileri, doğum kusurları, böbrek ve karaciğer hasarı, sinir sistemi hasarı gibi sağlık etkileri ortaya çıkardığı bildirilmiştir [11-14].

Literatür çalışmaları incelendiğinde dezenfeksiyon yan ürünlerinin, su kaynaklarında, içme sularında ve içme suyu arıtma tesislerinde araştırıldığı görülmektedir. Örneğin THM'ler; Yunanistan da içme suyu dağıtım sisteminde 0.7-32.8 µg/L [15], Macaristan da içme suyu arıtma tesisinde 14.2-143 µg/L [16], İran da yüzeysel suda 92.9±43.7 µg/L [17], Hindistan da nehir suyunda 18.8 µg/L [18], Çin de yüzeysel sular da 35-228.4 µg/L [19], Pakistan da yeraltı sularında 189.97-431.26 µg/L [20], Katar da musluk sularında 0-89 µg/L [21] olarak tespit edilmiştir. Ülkemizde de DYÜ'ler ile ilgili yapılan çalışmalar mevcuttur. Örneğin, İzmir de içme suyunda toplam THM konsantrasyonu 2.86-183 µg/L aralığında tespit edilmiştir [22]. Aydın ve diğ., [23] Konya da yeraltı sularında THM konsantrasyonunu 20-295 µg/L aralığında tespit etmişlerdir. Ates ve diğ., [24] Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan yüzeysel su örneklerinde THM konsantrasyonunu 21-189 µg/L aralığında tespit etmişlerdir. Ankara içme suyu dağıtım şebekesinde THM konsantrasyonları, 25 farklı semtten alınan çeşme suyu örneklerinde incelenmiştir ve 25-105 µg/L aralığında tespit edilmiştir [25].

Dünya çapında ekonomik maliyeti ve çevresel zararlarına rağmen, şişelenmiş su kullanımı giderek artmıştır. Bu durum şişelenmiş suyun ulaşılabilirliği, sağladığı kolaylık, tat ve musluk suyundan daha güvenilir olduğu inancı ile bağlantılıdır [26]. Türkiye de 2020 yılında polietilen tereftalat (PET) ve cam şişelenmiş su üretimi 4.6 milyar litredir ve 2021 yılında ise 4.7 milyar litre olması beklenmektedir [27]. Şişelenmiş su üretiminde yüksek miktarda enerji ve kaynak kullanılmaktadır. Ayrıca şişelenmiş suyun ambalajlanması için PET yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle şişelenmiş suların en önemli çevresel etkileri üretim ve nakliyesinin yanı sıra ambalajlamadan kaynaklanan katı atıklardır [28]. Plastik ambalaj ürünleri sera gazları, partikül madde gibi çevreye

zararlı kimyasalların salınımda etkilidirler. Şişelenmiş suyun tüketiminin artması, dünya çapında plastik kirliliğinin de artmasına katkıda bulunmaktadır. Plastik kirliliği özellikle su ortamları için günümüzde ciddi çevre sorunları arasındadır [29]. Çevresel etkileri açısından değerlendirildiğinde, musluk suyu şişelenmiş suya göre daha iyi bir alternatiftir. İçme suyu kalitesi ile ilgili çalışmalar genellikle şebeke suyu için daha sık yapılmaktadır [30]. Şişelenmiş doğal kaynak suları ve doğal mineralli sular, işlenmemiş sular ve bu sebeple DYÜ'lerini içermedikleri var sayılır. Şişelenmiş sular da organik bileşiklerin varlığı kalitesinin sorgulanmasına sebep olur. Şişelenmiş sular da üç potansiyel organik kirlenme yolu vardır. Bunlar; akiferde kirlenici olarak bulunan bileşikler; şişeleme tesisinden kaynaklanan kontaminasyon ve ambalaj malzemesinden suya geçiş şeklinde sıralanabilir [31-33]. İsviçre'de yapılan çalışmalarda PET şişelerden organik bileşiklerin düşük konsantrasyonlarda da olsa suya geçtiği tespit edilmiştir [33]. Özellikle fitalatlar, şişelenmiş sular da PET şişelerden suya geçmesi beklenen kirlenici gruplarındadır. Şişelenmiş suların depolanma koşulları, sıcaklık, zaman, maruz kaldığı güneş ışığı yoğunluğu, suyun pH değeri ve şişenin boyutu ambalajdan suya geçişi etkileyen faktörlerdendir. Yüksek sıcaklık ve depolama süresindeki artışlar ile kirlenicilerin suya geçişi arasında pozitif korelasyon mevcuttur [34]. Dört yıl süren bir Amerikan araştırmasında, analiz edilen şişelenmiş su örneklerinin üçte birinin, sınırları aşan seviyelerde bakteri veya diğer kimyasal kirlenicileri içerdiği belirlenmiştir [33]. Şişelenmiş sular mikroplastikleri de içerebilirler, bu nedenle son zamanlarda şişelenmiş sular da mikroplastiklerin varlığı ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır [35]. Karaman ve diğ., [36] Yunanistan'da inceledikleri şişelenmiş su örneklerinde doğal radyo nüklidleri ve Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Se, Sn, Mo ağır metallerini tespit etmişlerdir. Aslında hem musluk suyu hem de şişelenmiş su sağlık ile ilgili zararlı maddeler içerebilir. Literatürde şişelenmiş sular da DYÜ'lerin araştırılması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda şişelenmiş sular da DYÜ'ler tespit edilmiştir [8, 26, 37, 33]. Yapılan bazı çalışmalarda ise şişelenmiş sular da DYÜ'lere rastlanmamıştır [38-40, 30].

Konya'da şişelenmiş su tüketiminin yanı sıra şehrin farklı yerlerinde bulunan tatlı su çeşmeleri ile de insanlar içme suyu ihtiyaçlarını karşılamaktadırlar. Tatlı su çeşmelerine Çayırbağı, Dutlukırı, Kırantaya, Mukabil ve Beypınarı tatlı su kaynaklarından su verilmektedir. Çayırbağı, Dutlukırı, Kırantaya, Mukabil ve Beypınarı kaynaklarından alınan su, dağıtım şebekesinde karışmaktadır. Çayırbağı, Dutlukırı kaynaklarından alınan su depo çıkışlarında klorlanarak dağıtım şebekesine verilmektedir. Mukbil, Beypınarı ve Kırantaya kaynaklarından alınan su doğrudan dağıtım şebekesine verilmektedir [41].

Bu çalışmada Konya'da bulunan market, büfe gibi yerlerden halkın satışına sunulan 24 adet şişelenmiş doğal kaynak suyu ve 4 adet şişelenmiş doğal mineralli su temin edilmiştir. Ayrıca Konya'da bulunan tatlı su çeşmelerinden 28 adet (11 adet Selçuklu ilçesi, 11 adet Meram ilçesi, 6 adet Karatay ilçesi) su numunesi alınmıştır. Alınan içme suyu

örneklerinde THM (kloroform, bromodiklorometan, klorodibromometan, bromoform) bileşiklerinin varlığı araştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Araştırılan bileşikler ve kullanılan kimyasallar

Kloroform, bromodiklorometan, klorodibromometan, bromoform bileşiklerini içeren 1000 µg/mL konsantrasyonundaki standart Absolute Standards'dan temin edilmiştir. Ekstraksiyon için kullanılan Metil Tert Butil Eter (MTBE) solventi ve sodyum sülfat kimyasalı Merck firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan deiyonize su Millipore marka safsu cihazından elde edilmiştir.

Tablo 1'de araştırılan THM bileşiklerin fiziko-kimyasal özellikleri verilmiştir

### 2.2 Su örnekleri

Çalışmada incelenen şişelenmiş su örnekleri, Konya'da marketlerde, büfelerde ve okul kantinlerinde sıklıkla satılan 500 mL hacminde 28 farklı marka şişelenmiş sudur. Çayırbağı, Dutlukırı, Kırantaya, Mukabil ve Beypınarı tatlı su kaynaklarından alınan sular tatlı su çeşmeleri ile halkın içme suyu ihtiyacı için kullanılmaktadır. Çayırbağı, Dutlukırı kaynaklarından alınan sular depo çıkışlarında klorlanarak tatlı su çeşmelerine verilmektedir. Selçuklu, Meram ve Karatay ilçelerinden bulunan tatlı su çeşmelerinden 28 adet su örneği alınmıştır.

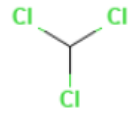
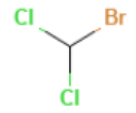
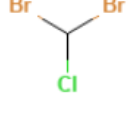
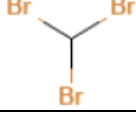
Şişelenmiş su numunelerinden doğal kaynak sularının alüminyum konsantrasyonları <0.02-19.08 µg/L, amonyum konsantrasyonları 0.01-13 µg/L, klorür konsantrasyonları 0.01-7.9 mg/L, iletkenlik değerleri 15-3000 µS/cm, pH değerleri 6.8-8.3, demir konsantrasyonları 1-16 µg/L, mangan konsantrasyonları 0.7-2.6 µg/L, oksitlenebilirlik

değerleri 0-5 mg/L, sülfat konsantrasyonları 0.005-29 mg/L, sodyum konsantrasyonları 0.008-73 mg/L aralığındadır. Doğal mineralli suların florür konsantrasyonları 0.03-0.096 mg/L, bikarbonat konsantrasyonları 85-176 mg/L, klorür konsantrasyonları 1-12 mg/L, sülfat konsantrasyonları 1.5-8 mg/L, kalsiyum konsantrasyonları 16-32 mg/L, mangan konsantrasyonları 3-8 mg/L, potasyum konsantrasyonları <0.2-6.7 mg/L, sodyum konsantrasyonları 2.2-9.6 mg/L, demir konsantrasyonları 0.007-0.028 mg/L ve toplam mineralizasyon konsantrasyonları 122-547.8 mg/L aralığındadır.

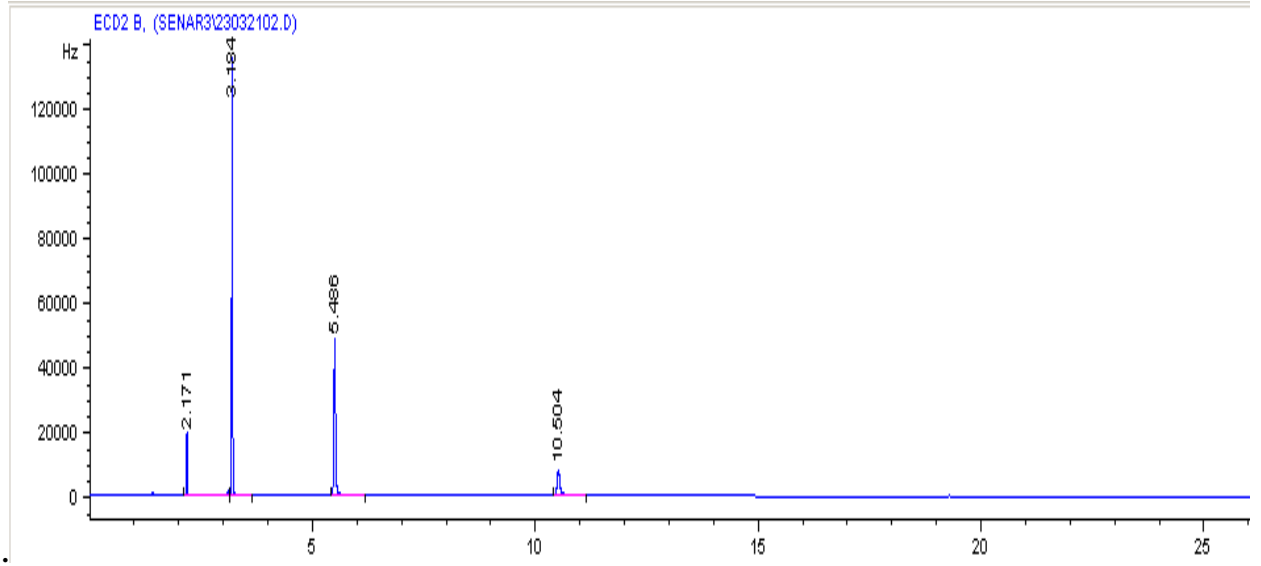
### 2.3 GC-µ-ECD analizleri

Metot optimizasyon çalışması için öncelikle GC-µ-ECD çalışma şartları optimize edilmiştir. Bunun için farklı sıcaklık programları ile çalışılmış ve en iyi pik ayrımı ve en iyi pik yüksekliğinin elde edildiği sıcaklık programı kullanılmıştır. Bu program için fırın sıcaklığı 35 °C'de 10 dakika tutulmuş, ardından 15 °C/dakika hızında 280 °C'ye çıkartılmış ve bu sıcaklıkta 1 dakika beklenmiştir. Toplam analiz süresi 27.33 dakika sürmüştür. Enjektör ve dedektör sıcaklıkları 200 °C olarak alınmıştır. Enjeksiyon miktarı 1 µL'dir. Taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta helyum, tamamlayıcı gaz olarak ise yüksek saflıkta nitrojen kullanılmıştır. GC-µ-ECD sisteminde HP-5 5% phenylmethyl siloxane fused silica capillary kolon (30 m uzunluğunda, 0.32 mm iç çapında ve 0.25 mm film kalınlığında) kullanılmıştır. Şekil 1'de optimum çalışma şartlarında elde edilen 1 ng/µL konsantrasyonuna sahip THM standardının piki görülmektedir. Şekilde görülen pikler çıkış sırası ile kloroform, bromodiklorometan, klorodibromometan, bromoform bileşiklerine aittir. Tablo 2'de araştırılan bileşikler için GC-µ-ECD sisteminde elde edilen analitik parametreler verilmiştir.

Tablo 1. Araştırılan THM bileşiklerinin fiziko-kimyasal özellikleri

THM'ler	Kimyasal formül	Molekül ağırlığı (g/mol)	Kaynama noktası (°C)	Molekül yapısı
Kloroform	CHCl <sub>3</sub>	119.4	62	
Bromodiklorometan	CHBrCl <sub>2</sub>	163.8	90	
Klorodibromometan	CHBr <sub>2</sub> Cl	208.2	117	
Bromoform	CHBr <sub>3</sub>	252.7	149	





Şekil 1. THM standardı piki (çıkış sırası: kloroform, bromodiklorometan, klorodibromometan, bromoform)

Tablo 2. Araştırılan bileşikler için GC- $\mu$ -ECD sisteminde elde edilen analitik parametreler

z	Dedeksiyon limiti (dl) (ng/ $\mu$ L)	Lineer aralık ( $\mu$ g/L)	R <sup>2</sup>	RSD (%) (n=5)
Kloroform	0.001	0.001-10	0.996	2.31
Bromodiklorometan	0.0001	0.001-10	0.997	1.25
Klorodibromometan	0.0004	0.001-10	0.998	1.42
Bromoform	0.001	0.001-10	0.999	2.23

Tablo 3. Gerçekleştirilen ekstraksiyon deneylerinin şartları

	Ekstraksiyon metodu 1	Ekstraksiyon metodu 2	Ekstraksiyon metodu 3
Numune hacmi (mL)	20	10	30
MTBE (mL)	8	3	2
Sodyum sülfat (g)	8.5	10	4

#### 2.4 Ekstraksiyon çalışması

Ekstraksiyon metodunda bileşiklere ait geri kazanım değerlerinin belirlenmesi için THM bileşikleri ile spike yapılmış deiyonize su farklı ekstraksiyon metodları için çalışılmıştır. Kullanılan metotlarda farklı numune hacmi, MTBE hacmi ve sodyum sülfat miktarı kullanılarak hedef bileşiklere ait geri kazanım verimi hesaplanmıştır. Denenen üç farklı ekstraksiyon metodu ile ilgili kullanılan deneysel şartlar Tablo 3’de verilmiştir.

Ekstraksiyon için 1.0 ng/ $\mu$ L konsantrasyonun da THM bileşiklerini içeren numuneler 40 mL EPA vialı içerisine konulduktan sonra üzerine MTBE ve sodyum sülfat eklenmiş ve 4 dk hızlı bir şekilde çalkalanmıştır. Daha sonra solvent faz ayrımının gerçekleşmesi için 2 dk beklenildikten sonra ayrılan solvent fazdan 1 mL alınarak GC/ $\mu$ -ECD analizi için vial içerisine aktarılmıştır.

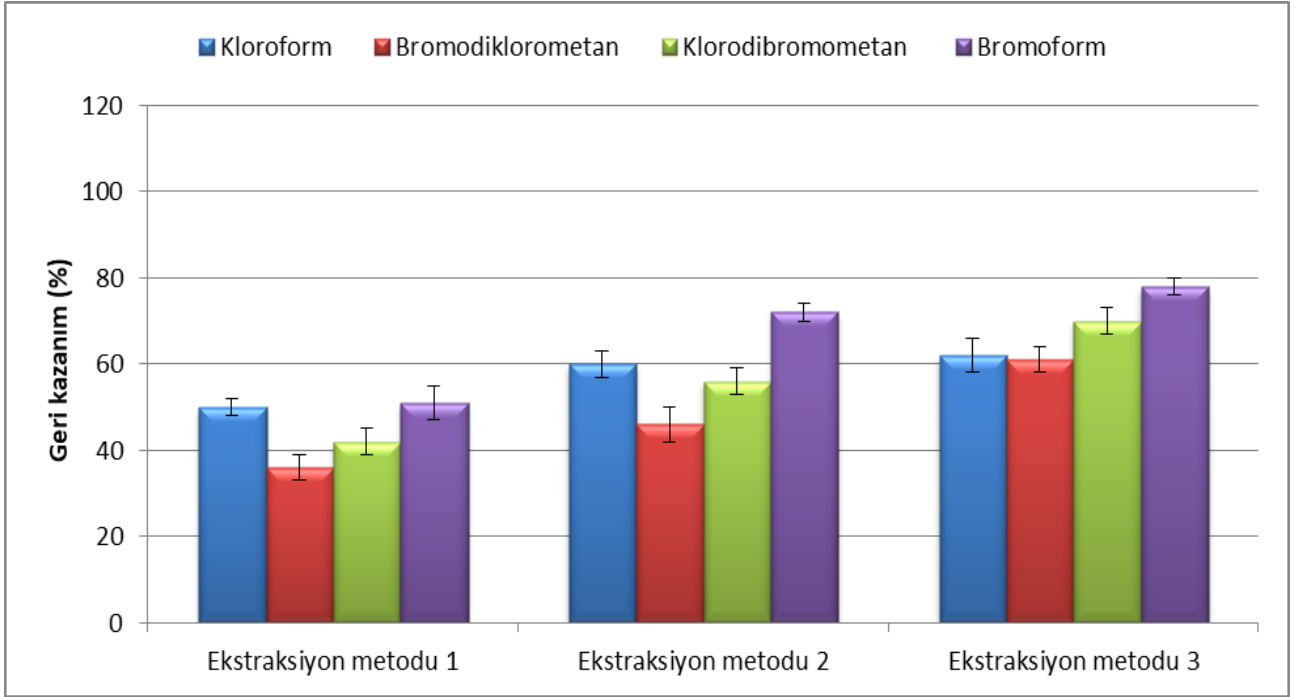
Analizler sonucunda hedef bileşiklere ait metot geri kazanım verimleri Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2

incelendiğinde bileşiklerin geri kazanım verimlerinin 1. ekstraksiyon metodunda maksimum %50’lerde olduğu, 2. ekstraksiyon metodunda sadece bir bileşik için geri kazanım veriminin %60’ı geçtiği, 3. ekstraksiyon metodunda ise bütün bileşiklerde %60-80 arasında geri kazanım verimi sağlandığı görülmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak ekstraksiyon metot optimizasyon çalışmalarına 3 nolu metot ile devam edilmiştir.

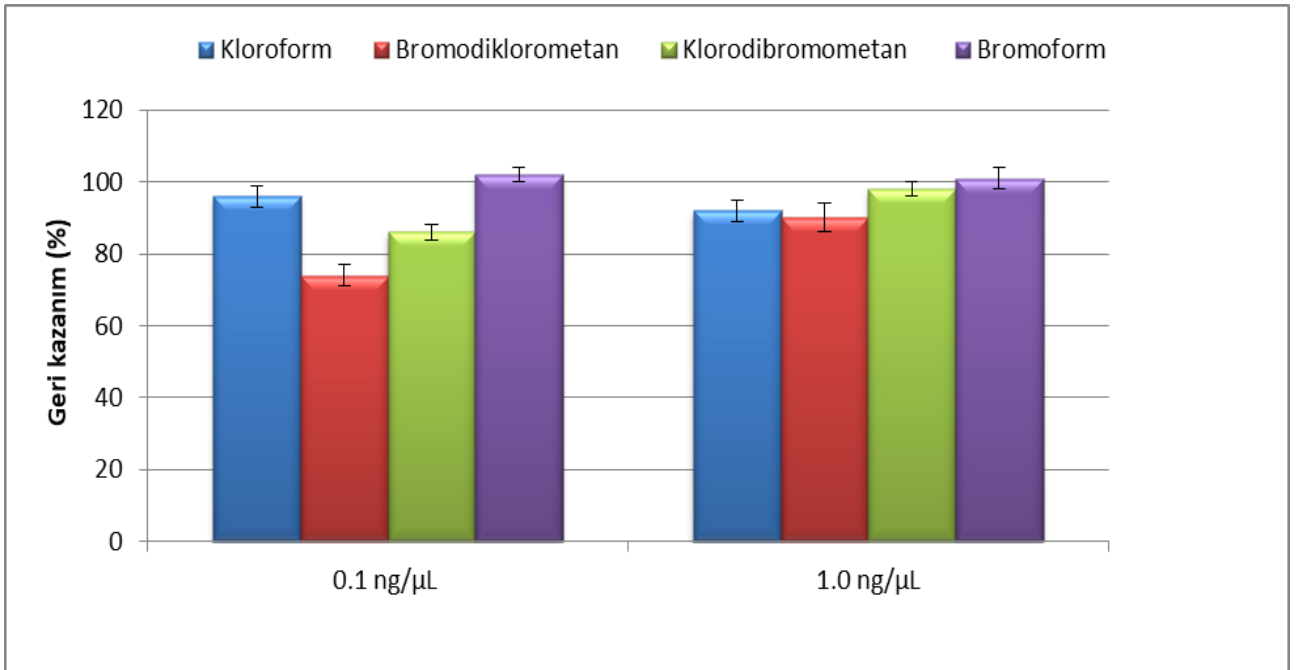
Farklı bileşik konsantrasyonlarının metot üzerindeki etkisini belirlemek için farklı fortifikasyon seviyelerinde çalışılmıştır ve ayrıca geri kazanım verimini iyileştirmek için modifiye edilmiştir. Bu amaçla 0.1 ng/ $\mu$ L ve 1.0 ng/ $\mu$ L konsantrasyonunda THM bileşikleri içeren 30 mL numune 40 mL EPA vialı içerisine konulmuştur. İçerisine 2 mL MTBE ve 4 g sodyum klorür konulduktan sonra 4 dk hızlı bir şekilde çalkalanmıştır. Daha sonra solvent faz ayrımının gerçekleşmesi için 2 dk bekletilmiştir. Ayrılan solvent faz vial içerisinden alınmıştır. 2 mL MTBE eklenerek ekstraksiyon bir kez daha tekrarlanmıştır.

Ve alınan solvent faz daha önceki solvent faz ile birleştirilerek GC'ye enjeksiyon gerçekleştirilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki fortifikasyonlar için elde edilen metot geri kazanım sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde ekstraksiyon metodunda yapılan modifikasyonlar ile metot geri kazanım veriminin arttığı (%90-101) görülmektedir. Ayrıca araştırılan bileşik

konsantrasyonlarındaki değişimin ekstraksiyon metodu üzerine negatif etkisi olmadığı belirlenmiştir. Ekstraksiyon çalışmalarında GC/ $\mu$ -ECD sisteminde çalışılan lineer aralık 0.001-10  $\mu$ g/L'dir.



Şekil 2. Farklı ekstraksiyon metodları için THM bileşiklerine ait metot geri kazanım değerleri



Şekil 3. Farklı THM konsantrasyonları için THM bileşiklerine ait metot geri kazanım değerleri

### 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada incelenen şişelenmiş su numunelerinde THM bileşikleri tespit edilmemiştir. İncelenen şişelenmiş sular ozonla zenginleştirilmiş hava yöntemi ile oksijenleme işlemine tabi tutulmuştur. Klor ile dezenfeksiyon işlemi yapılmadığı için THM bileşiklerinin oluşmadığı düşünülmüştür. Tatlı su çeşmelerinden alınan su numunelerinde tespit edilen THM bileşiklerinin konsantrasyonları **Tablo 4** de verilmiştir.

Konya da tatlı su çeşmelerine su sağlanan beş kaynaktan ikisi klor ile dezenfeksiyon işleminden sonra dağıtım şebekesine verilmektedir. Diğer üç su kaynağına herhangi bir dezenfeksiyon işlemi uygulanmamaktadır. Hangi tatlı su çeşmesine hangi kaynaktan su verildiğine dair bir bilgi yoktur. Beş su kaynağından alınan su, dağıtım şebekesinde karışarak tatlı su çeşmelerine ulaşmaktadır. **Tablo 4** incelendiğinde bromoform bileşiğinin bütün numunelerde dedeksiyon limitinin altında tespit edildiği, klorodibromometan bileşiğinin bir numune dışında diğer numunelerde dedeksiyon limitinin altında tespit edildiği görülmektedir. İncelenen bileşikler için dedeksiyon limiti değerleri **Tablo 2** de verilmiştir. İncelenen 28 tatlı su çeşmesi numunesinin 20 tanesinde kloroform bileşiği, 8 tanesinde bromodiklorometan tespit edilmiştir. Kloroform bileşiği maksimum 43.7 µg/L, bromodiklorometan bileşiği maksimum 5.4 µg/L olarak tespit edilmiştir. Tatlı su kaynaklarından alınan suların klorlaması sonucu, genellikle oluşan THM'ler içinde ana bileşik kloroform bileşiğidir. Deniz suyundan içme suyu üretim proseslerinde ise bromürün fazla olmasından dolayı genellikle bromlu THM'ler baskın tür olarak bulunmaktadır [42, 43]. Bromoform genellikle klorlanmış içme sularında düşük konsantrasyonlarda bulunur [44]. Kaynak sularında değişen koşullara bağlı olarak reaksiyona girebilecek çözülmüş organik maddeler bulunabilir. Örneğin Leivarada ve diğ., [33] kloroform bileşiğini ilk numune alma sırasında tespit etmemelerine rağmen, soda numunelerinde dış ortam koşullarına maruz bırakıldığında kloroform tespit etmişlerdir. Sıcaklık ve güneş ışığı nedeniyle suda büyüyen mikroorganizmaların zamanla THM konsantrasyonlarında artışa sebep olduğu sonucuna varmışlardır.

Bu çalışmada en sık ve en yüksek konsantrasyonlarda kloroform bileşiği tespit edilmiştir. Tatlı su kaynaklarında bromür konsantrasyonlarının düşük olduğu bilinmektedir. Tatlı su çeşmelerine su sağlayan kaynaklardan ikisinin klor ile dezenfekte edilmesinden dolayı kloroform bileşiğinin yüksek konsantrasyonlarda tespit edildiği öngörülmektedir. Kloroform bileşiğinden sonra en sık ve en yüksek konsantrasyonlarda tespit edilen bileşik bromodiklorometan bileşiği olmuştur. S-7 ve K-27 nolu numunelerde bromodiklorometan bileşiği yüksek konsantrasyonlarda tespit edilmiştir. Klorla dezenfekte edilen ve hiçbir dezenfeksiyon işlemine tabi tutulmayan sular, tatlı su çeşmelerine su dağıtım şebekesinde karışmaktadır. Hangi tatlı su çeşmesine hangi kaynaktan su geldiği bilinmemektedir. S-7 ve K-27 nolu numuneler de kloroform

bileşiği konsantrasyonu da yüksek tespit edilmiştir. Klorodibromometan bileşiği ise sadece S-7 nolu numunede tespit edilmiştir. Bu iki çeşmeye verilen suyun klorlanmış su kaynaklarından olabileceği bu yüzden konsantrasyonların yüksek olduğu öngörülmektedir.

**Tablo 5**'te ülkemizde ve dünyada toplam THM bileşikleri için belirlenen sınır değerler görülmektedir. Şişelenmiş sulara bütün THM bileşikleri dedeksiyon limitinin altında tespit edilmiş olup sınır değerlerin aşılmadığı belirlenmiştir. Tatlı su çeşmelerinde toplam THM konsantrasyonları <dl-43.7 µg/L arasındadır. **Tablo 5**'teki sınır değerler ile kıyaslandığında, tespit edilen konsantrasyonların sınır değerleri aşmadığı görülmektedir.

Şişelenmiş sulara THM bileşiklerinin varlığı ile ilgili literatürde bazı çalışmalar mevcuttur. Avusturalya da en yaygın tüketilen 6 farklı marka şişelenmiş sudaki DYÜ konsantrasyonları incelenmiştir. Tespit edilen en yüksek THM konsantrasyonu 30 µg/L olarak tespit edilmiştir. Şişelenmiş sulara da DYÜ'lerin bulunabileceği ispatlanmıştır [8]. Ikem [26], süpermarketten alınan kaynak, arıtılmış, damıtılmış ve meyve aromalı şişelenmiş sulara THM'lerde dahil olmak üzere uçucu organik kirleticileri araştırmıştır. Şişelenmiş su numunelerinde toplam THM konsantrasyonları 0-17.86±0.35 ng/L aralığında tespit edilmiştir. Khan ve diğ., [37] Suudi Arabistan da yerel süper marketlerden toplanan 11 adet şişelenmiş kaynak suyunda DYÜ'lerden perkloratı 5.33-32.74 mg/L, bromatı 7.52-16.43 mg/L aralığında bulmuşlardır. Çalışma da Türkiye'den alınan bir şişelenmiş kaynak suyu da incelenmiştir. Türkiyeden alınan numunede perklorat 22.64 mg/L, bromat 8.34 mg/L olarak bulmuşlardır. Yunanistan da doğal mineralli ve karbonize 13 adet şişelenmiş suda THM'ler maksimum 21.7 µg/L olarak tespit edilmiştir [33]. Yapılan bazı çalışmalarda ise şişelenmiş sulara THM'lere rastlanmamıştır [38-40, 30]. Farklı ülkelerde şişelenmiş sulara tespit edilen THM bileşikleri, şişelenmiş sulara uygulanan dezenfeksiyon işlemleri sonucu oluşabilirler, depolama, paketleme süreçlerinde bulaş yolu ile geçmiş olabilirler.

### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada incelenen şişelenmiş su numunelerinde araştırılan THM bileşikleri tespit edilmemiştir. Fakat şişelenmiş sularla ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde farklı ülkelerde şişelenmiş sulara THM bileşikleri ve farklı diğer kirleticilerin tespit edildiği görülmüştür. Şişelenmiş sular ile ilgili standart parametreler dışında uçucu organik ve inorganik kirleticilerin de takibinin yapılması gerekmektedir. Konya da içme suyu olarak halkın sıklıkla tükettiği tatlı su çeşmelerinin suları incelendiğinde ise THM bileşiklerine rastlanmıştır. Tatlı su çeşmelerine su temini yapılan beş kaynaktan ikisinin klorla dezenfekte edildiği, diğer üç su kaynağında dezenfeksiyon yapılmadığı bilinmektedir. Tespit edilen THM konsantrasyonları yönetmeliklerde belirlenen sınır değerleri aşmamaktadır. Kanserojen olarak sınıflandırılan THM bileşiklerinin insan sağlığı üzerine olumsuz etkileri bilinmektedir. İnsanların

THM'lere sadece içme suyu kullanımında değil, aynı zamanda yemek pişirme, duş alma, temizlik yapma ve benzeri durumlarda da maruz kaldığı dikkate alınmalıdır.

Düşük konsantrasyonlarda sürekli maruziyetin oluşturabileceği sağlık etkileri göz önünde bulundurulmalıdır.

**Tablo 4.** Tatlı su çeşmelerinden alınan içme suyu örneklerinde tespit edilen THM konsantrasyonları ( $\mu\text{g/L}$ )

No	Kloroform	Bromodiklorometan	Klorodibromometan	Bromoform	Toplam THM
S-1	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
S-2	2.0	<dl	<dl	<dl	2.0
S-3	8.2	1.0	<dl	<dl	9.2
S-4	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
S-5	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
S-6	3.9	<dl	<dl	<dl	3.9
S-7	11.7	3.6	1.1	<dl	16.4
S-8	0.87	<dl	<dl	<dl	0.9
S-9	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
S-10	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
S-11	3.1	<dl	<dl	<dl	3.1
M-12	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
M-13	5.6	2.7	<dl	<dl	8.2
M-14	7.1	<dl	<dl	<dl	7.1
M-15	3.8	<dl	<dl	<dl	3.8
M-16	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
M-17	3.7	0.04	<dl	<dl	3.8
M-18	43.7	<dl	<dl	<dl	43.7
M-19	2.5	<dl	<dl	<dl	2.5
M-20	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
M-21	6.3	0.6	<dl	<dl	6.9
M-22	10.2	0.7	<dl	<dl	10.9
K-23	11.6	1.1	<dl	<dl	12.7
K-24	2.7	<dl	<dl	<dl	2.7
K-25	5.2	<dl	<dl	<dl	5.2
K-26	3.1	<dl	<dl	<dl	3.1
K-27	24.1	5.4	<dl	<dl	29.5
K-28	4.6	<dl	<dl	<dl	4.6

S: Selçuklu, M: Meram, K: Karatay <dl: dedeksiyon limitinin altında

**Tablo 5.** THM konsantrasyonları için sınır değerler (µg/L)

	IBWA	EU	EPA	İTASHY
Toplam THM'ler (Kloroform, Bromodiklorometan, Klorodibromometan, Bromoform)	10 <sup>1</sup>	100 <sup>2</sup>	80 <sup>3</sup>	100 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>: IBWA (Uluslararası Şişelenmiş Su Birliği) tarafından şişelenmiş suların kalite standartları için verilen değerdir.

<sup>2</sup>: EU (Avrupa Birliği) tarafından içme sularının kalite standartları için verilen sınır değerdir.

<sup>3</sup>: EPA (Çevre Koruma Ajansı) tarafından içme sularının kalite standartları için verilen sınır değerdir.

<sup>4</sup>: İTASHY (İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik)'te kaynak suları, içme suları ve içme-kullanma sularının kalite standartları için verilen sınır değerdir.

### Çıkar çatışması

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %5

### Kaynaklar

- [1] T. Karanfil, S.W. Krasner, P. Westerhoff and Y. Xie, In Recent Advances in Disinfection By-Products; ACS Symposium Series. American Chemical Society: Washington, DC, 2015.
- [2] V. Eroğlu, Su Tasfiyesi. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayınları, Türkiye, 2008.
- [3] S. Chowdhury, M.J. Rodriguez, R. Sadiq and J. Serodes, Modeling DBPs formation in drinking water in residential plumbing pipes and hot water tanks. *Water Research*, 45 (1), 337-347, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.002>.
- [4] A.R. Pardakhti, G.R.N. Bidhendi, A. Torabian, A. Karbassi and M. Yunesian, Comparative cancer risk assessment of THMs in drinking water from well water sources and surface water sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 179, 499-507, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1752-5>.
- [5] S. D. Richardson, Tackling unknown disinfection by-products: Lessons learned. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2, 100041, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.10004>.
- [6] S.M. Gordon, M.C. Brinkman, D.L. Ashley, B.C. Blount, C. Lyu, J. Masters and P.C. Singer, Changes in breath trihalomethane levels resulting from household water-use activities. *Environmental Health Perspectives*, 114, 514-521, 2006. <https://doi.org/10.1289/ehp.8171>.
- [7] M. Valdivia-Garcia, P. Weir, D.W. Graham and D. Werner, Predicted impact of climate change on trihalomethanes formation in drinking water treatment. *Scientific Reports*, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46238-0>.
- [8] J. Stanhope, K. McAuley, A. Cook and P. Weinstein, Estimating Trihalomethane Concentrations in Bottled Spring Water. *Exposure and Health*, 12:877-881, 2020, <https://doi.org/10.1007/s12403-020-00350-z>.
- [9] X. Zhang, C. Saini, C. Pohl and Y. Liu, Fast determination of nine haloacetic acids, bromate and

dalapon in drinking water samples using ion chromatography–electrospray tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1621 (2020) 461052, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461052>.

- [10] C.J. Mills, R.J. Bull, K.P. Cantor, J. Reif, S.E. Hrudey and P. Huston, Workshop report. Health risks of drinking water chlorination by-products: report of an expert working group. *Chronic diseases in Canada*, 19, 91-102, 1998.
- [11] S.H. Ewaid, A.M. Rabee and S.K. Al-Naseri, Carcinogenic risk assessment of trihalomethanes in major drinking water sources of Baghdad City. *Water Resources*, 45 (5), 803-812, 2018. <https://doi.org/10.1134/S0097807818050202>.
- [12] D. Stalter, E. O'Malley, U. von Gunten and B.I. Escher, Mixture effects of drinking water disinfection by-products: implications for risk assessment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6 (9), 2341-2351, 2020. <https://doi.org/10.1039/C9EW00988D>.
- [13] E.D. Wagner and M.J. Plewa, CHO cell cytotoxicity and genotoxicity analyses of disinfection by-products: an updated review. *Journal of Environmental Sciences*, 58, 64-76, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.04.021>.
- [14] R. Mompremier, O.A. Fuentes Mariles, J.E. Becerril Bravo and K. Ghebremichael, Study of the variation of haloacetic acids in a simulated water distribution network. *Water Supply*, 19 (1), 88-96, 2019. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.055>.
- [15] L. Kurajica, M.U. Bosnjak, M.N. Stankov, A.S. Kinsela, J. Stiglic, D.T. Waite and K. Capak, Disinfection by-products in Croatian drinking water supplies with special emphasis on the water supply network in the city of Zagreb. *Journal of Environmental Management*, 276, 111360, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111360>.
- [16] D. Stefan, N. Erdelyi, B. Izsak, G. Zaray and M. Vargha, Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination. *Microchemical Journal*, 149, 104008, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104008>.
- [17] S. Dobaradaran, E.S. Fard, A. Tekle-Rottering, M. Keshtkar, V.N. Karbasdehi, M. Abtahi, R. Gholamnia

- and R. Saeedi, Age-sex specific and cause-specific health risk and burden of disease induced by exposure to trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) from drinking water: an assessment in four urban communities of Bushehr Province. *Environmental Research*, 182, 109062, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109062>.
- [18] R.K. Padhi, S. Subramanian and K.K. Satpathy, Formation, distribution, and speciation of DBPs (THMs, HAAs, ClO<sub>2</sub>, and ClO<sub>3</sub>) during treatment of different source water with chlorine and chlorine dioxide. *Chemosphere*, 218, 540-550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.100>.
- [19] R. Hao, Y. Zhang, T. Du, L. Yang, A.S. Adeleye and Y. Li, Effect of water chemistry on disinfection by-product formation in the complex surface water system. *Chemosphere*, 172, 384-391, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.034>.
- [20] S. Abbas, I. Hashmi, M.S.U. Rehman, I.A. Qazi, M.A. Awan, and H. Nasir, Monitoring of chlorination disinfection by-products and their associated health risks in drinking water of Pakistan. *Journal of Water and Health*, 13 (1), 270-284, 2014. <https://doi.org/10.2166/wh.2014.096>.
- [21] F. Al-Otoum, M.A. Al-Ghouti, T.A. Ahmed, M. Abu-Dieyeh and M. Ali, Disinfection by-products of chlorine dioxide (chlorite, chlorate, and trihalomethanes): occurrence in drinking water in Qatar. *Chemosphere*, 164, 64-656, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.008>.
- [22] D. Baytak, A. Sofuoglu, F. Inal and S.C. Sofuoglu, Seasonal variation in drinking water concentrations of disinfection by-products in Izmir and associated human health risks. *Science of The Total Environment*, 407 286-296, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.019>.
- [23] M. E. Aydın, A. Tor, G. Kara ve S. Yıldız, Konya Yeraltısuyunda Dezenfeksiyon Yan Ürünleri. *Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20, 4, 2005.
- [24] N. Ates, S.S. Kaplan, E. Sahinkaya, M. Kitis, F. B. Dilek ve U. Yetis, Occurrence of disinfection by-products in low DOC surface waters in Turkey. *Journal of Hazardous Materials* 142, 526-534, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.076>.
- [25] B. Tokmak Cangir, G. Çapar, F. B. Dilek ve Ü. Yetiş, Ankara içme suyu dağıtım şebekesinde trihalometanlar. *Çevre, Bilim ve Teknoloji*, 1,3, 39-46, 2003.
- [26] A. Ikem, Measurement of volatile organic compounds in bottled and tap waters by purge and trap GC-MS: Are drinking water types different?. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23, 70-77, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.05.005>.
- [27] Genel yapı ve rakamsal büyüklük. <https://suder.org.tr/ambalajli-su/istatistik/>, Accessed 18 October 2021.
- [28] M. Garfi, E. Cadena, D. Sanchez-Ramos and I. Ferrera, Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137, 20, 997-1003, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.218>.
- [29] R. Geyer, J.R. Jambeck and K.L. Law, Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782, 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- [30] C.M. Villanueva, B. Gagniere, C. Monfort, M.J. Nieuwenhuijsen and S. Cordier, Sources of variability in levels and exposure to trihalomethanes. *Environmental Research*, 103:211-220, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2006.11.001>.
- [31] N. Casajuana and S. Lacorte, Presence and release of phthalicesters and other endocrine disrupting compounds in drinking water. *Chromatographia*, 57, 649-655, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02491744>.
- [32] J. Nawrocki, A. Dabrowska and A. Borcz, Investigation of carbonyl compounds in bottled waters from Poland. *Water Research*, 36, 4893-4901, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00201-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00201-4).
- [33] S.V. Leivadara, A.D. Nikolaou, and T.D. Lekkas, Analytical methods determination of organic compounds in bottled waters. *Food Chemistry*, 108, 277-286, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.031>.
- [34] Q. Luo, Z. Liu, H. Yin, Z. Dang, P. Wu, N., Zhu, Z. Lin and Y. Liu, Review Migration and potential risk of trace phthalates in bottled water: A global situation. *Water Research* 147, 362-372, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.002>.
- [35] S.M. Praveena and S. Laohaprapanon, Quality assessment for methodological aspects of microplastics analysis in bottled water – A critical review, *Food Control*. 130, 108285, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108285>.
- [36] D. Karamanis, K. Stamoulis and K.G. Ioannides, Natural radionuclides and heavy metals in bottled water in Greece. *Desalination*, 213, 90-97, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.604>.
- [37] M.R. Khan, M.S. Samdani, M. Azam and M. Ouladsmane, UPLC-ESI/MS analysis of disinfection by-products (perchlorate, bromate, nitrate, nitrite and sulfite) in micro-filtered drinking water obtained from spring, well and tap water (desalinated) sources. *Journal of King Saud University- Science*, 33, 101408, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101408>.
- [38] N. Iszatt, M.J. Nieuwenhuijsen, P. Nelson, P. Elliott and M.B. Toledano, Water consumption and use, trihalomethane exposure, and the risk of hypospadias. *Pediatrics*, 127: 389-397, 2011. <https://doi.org/10.1542/peds.2009-3356>.
- [39] E. Patelarou, S. Kargaki, E.G. Stephanou, M. Nieuwenhuijsen, P. Sourtzi, E. Garcia, L. Chatzi, A. Koutis and M. Kogevinas, Exposure to brominated trihalomethanes in drinking water and reproductive outcomes. *Occupational and Environmental Medicine*, 68:438-445, 2011. <https://doi.org/10.1136/oem.2010.056150>.

- [40] J.M. Wright, P.A. Murphy, M.J. Nieuwenhuijsen and D.A. Savitz, The impact of water consumption, point-of-use filtration and exposure categorization on exposure misclassification of ingested drinking water contaminants. *Science of the Total Environment*, 366: 65–73, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.010>.
- [41] Tatlı su kaynakları. <https://www.koski.gov.tr/sayfa/tatli-su-kaynaklari>, Accessed 18 October 2021.
- [42] W. Elshorbagy and M. Abdulkarim, Chlorination byproducts in drinking water produced from desalination in United Arab Emirates. *Environmental Monitoring and Assessment*, 123:313–31, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9199-4>.
- [43] H.F. Al-Mudhaf, F.A. Alsharifi and A.-S.I. Abu-Shady, A survey of organic contaminants in household and bottled drinking waters in Kuwait. *Science of the total environment*, 407, 1658-1668, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.057>.
- [44] M. Genisoglu, C. Ergi-Kaytmaz and S.C. Sofuoglu, Multi-route-Multi-pathway exposure to trihalomethanes and associated cumulative health risks with response and dose addition. *Journal of Environmental Management*, 233, 823-831, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.009>.





## Biyomedikal uygulamaları için vücut içi geniş bantlı İD-EDDK beslemeli SBT bant anten analizi

### In-body wideband CB-CPW Fed ISM band antenna analysis for biomedical applications

Seda Habergötüren Ateş<sup>1,\*</sup>  Tayfun Okan<sup>2</sup>  Nursel Akçam<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe/Ankara/Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada biyomedikal uygulamalarında kullanılmak üzere SBT (Sıma Bilimsel ve Tıbbi cihaz bandı) bantta çalışan geniş bantlı bir anten tasarlanmıştır. Antenin maksimum boyutlarını gösteren 11 x 12 x 0.6 mm<sup>3</sup> değerleri için Rogers-RO3210 ( $\epsilon_r = 10.2$ ) alıtış olarak belirlenmiştir. Bu alıtışın üzerine geleneksel dikdörtgen yama anten tasarlanıp içerisinde testere şeklinde bir yarı kazınmıştır. Tasarlanan antenin besleme tipi İD-EDDK (İletken Destekli Eş Düzlemsel Dalga Kılavuzu) olarak seçilmiş, toprak plakası azaltılarak kullanılmıştır. Antenin tasarımı ve analizleri CST-MWS programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan antenin empedans bant genişliği ( $S_{11} \leq -10$  dB) 0.71 GHz (1.97-2.68 GHz) olarak ölçülmüştür. Merkezi rezonans frekansı 2.36 GHz olan antenin yansıma katsayısı grafiği SBT bandını kapsar. Vücut içi uygulamalara uygun olarak tasarlanan antenin eğimli koşullardaki sonuçları da düzlemsel koşullardaki sonuçlarına kıyasla çok yakın performans göstermektedir ve ÖSO (Özgül Soğurma Oran) değerleri insan vücudu için zararsızdır.

**Anahtar kelimeler:** Biyomedikal uygulamaları, SBT bant, İD-EDDK

#### 1 Giriş

Gelişen teknoloji, günümüzde birçok farklı alanda insan hayatını olumlu yönde etkilemek için kullanılmaktadır. İnsan hayatını etkileyen en önemli alanlardan biri de bireylerin sağlık durumlarının takibidir. Yaşlı nüfusunun her geçen gün arttığı gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, hasta takibi ve hastalara ait verilerinin değerlendirilmesi için pratik yöntemlerin geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. Bunun için geliştirilen yöntemlerden biri, hastaya ait tıbbi verilerin vücut içi sensörler yardımıyla anlık olarak ölçülüp kablosuz şekilde bu verilerin doktora iletilmesidir. Uygun frekansta yüksek hızda ve bant genişliğinde tasarlanan anten sistemleri hasta bilgilerinin hızlıca iletilmesini sağlayacaktır [1-3]. Bu şekilde çalışan bir sistem sayesinde, gerektiğinde acil müdahale edilebilmesinin yanı sıra, doktorun iş yükünü

#### Abstract

In this study, a wideband antenna operating in the ISM (Industrial Scientific and Medical device) band was designed to be used in biomedical applications. Rogers-RO3210 ( $\epsilon_r = 10.2$ ) was determined as substrate for 11 x 12 x 0.6 mm<sup>3</sup> values which are maximum dimensions of the antenna. A traditional rectangular patch antenna was designed on this substrate, and a saw-shaped etched. The feeding type of the designed antenna was chosen as CB-CPW (Conductor Backed Coplanar Waveguide) and the ground plate reduced. The design and analysis of the antenna were made using the CST-MWS program. The impedance bandwidth ( $S_{11} \leq -10$  dB) of the designed antenna was measured as 0.71 GHz (1.97-2.68 GHz). The reflection coefficient graph of the antenna with a central resonant frequency of 2.36 GHz covers ISM band. The results of the antenna, which was designed for in-body applications, in bent conditions also showed very close performance compared to its results in planar conditions and SAR (Specific Absorption Rate) values were harmless for human body.

**Keywords:** Biomedical applications, ISM band, CB-CPW

azaltmasını, hastanın ise zamanını daha etkin kullanmasını sağlamaktadır.

Kablosuz vücut alan ağları, bazı çalışmalarda [4-15] vücut içine entegre antenler ile sağlanırken, bazı çalışmalarda [16,17] vücut üstüne konumlanmış antenler aracılığıyla oluşturulmaktadır. Geliştirilen biyotelemetri sistemlerde kullanılan frekans bantları ise Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union-ITU) ve Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission-FCC) tarafından atanan Tıbbi İmplant İletişim Hizmet Bandı (402-405 MHz) ve Sıma, bilimsel ve tıbbi cihaz (SBT) bandıdır (2.4-2.48 GHz). Hasta takibi amacıyla yapılan biyomedikal antenlerde daha önceki çalışmalarda yalnızca SBT bandında [4,6-10,12,15,18-20] ve yalnızca Tıbbi İmplant İletişim Hizmet bandında [5,21]

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sedahabergoturen@gazi.edu.tr (S. Habergötüren Ateş)  
Geliş / Received: 17.01.2022 Kabul / Accepted: 07.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1059091



tasarımlar yapılmasının yanı sıra her iki bantta da çalışabilen ikili bant antenler [13,14,16,17,22,23] de tasarlanmıştır. Ayrıca SBT bandında üçlü bant şeklinde tasarlanan bir çalışma da mevcuttur [24].

Daha önce yapılan diğer çalışmalarda hastaların uzun gözlem sürelerinde vücut içi antenin zarar görmemesi ve kısa devre olmaması için üst ve alt yüzeyi alttaş ile kaplanmıştır [4,5,17,19,21,23,25]. Tasarlanan antenlerin benzetimleri vücuttaki deri, yağ, kas dokuları dikkate alınarak, anten yağ dokusuna yerleştirilecek şekilde yapılmıştır. Bu dokuların çalışma frekansındaki farklı kalınlık ve çalışma frekansındaki göreceli dielektrik geçirgenliği değerleri göz önüne alınmıştır. Örneğin kanserli bir hücreye ait göreceli dielektrik geçirgenliği farklı olurken, sağlıklı dokularda farklı çalışma frekanslarında da farklı göreceli dielektrik geçirgenlik sabiti değerleri gözlemlenir. Kanserli doku teşhisi amacıyla da kullanılan biyomedikal uygulamalar da mevcuttur [7]. Biyomedikal antenin ölçümleri insan vücudunun dokularını taklit eden jeller içinde yapılmıştır [4,6,9,11,13,15,23,25].

İnsan vücudunda veri takibi için anten yapılarının bazıları akım yolunu artırmak için kullanılan menderes tip olarak tasarlanmıştır [22,25,19]. Tasarımların bazılarında anten boyunu kısaltma esnekliğine sahip olduğu için PIFA anten tercih edilmiştir [5,6]. Ancak PIFA anten tasarımı dar bant genişliği sebebiyle tercih edilme oranı düşük bir seçenektir. Anten boyunu kısaltıp akım yolunu uzatan serpantin tip anten tasarımları da kullanılmıştır [21,17]. Anten beslemelerinde yüksek frekans tepkileri için önerilen antenin geri ışınmasını azaltan EDDK (Eş düzlem dalga kılavuzu) kullanılmıştır [9,10,12].

EDDK besleme tekniği kullanmak yüksek bant genişliği sebebiyle avantajlı bir tercihtir [4,26]. EDDK beslemenin geniş bant etkisini sağlayan geçirgenliğinin dağılıma özelliği mikro şerit hattan daha iyidir [27]. Sistemlerde devre bütünlüğünü koruyarak diğer mikrodalga cihazlarla entegre edilebilir [27]. EDDK besleme, anten üretimini basitleştirir, delik ve kaplama ihtiyacını ortadan kaldırır [28]. Aktif ve pasif cihazların seri yüzey montajının yanı sıra akım yolunu kolaylaştırır ayrıca radyasyon kaybını azaltır [28]. EDDK besleme tek ve çift modlarda iletilebilir böylece anten tasarımı esnek bir hale gelir [27]. Bir EDDK beslemesinin bu özelliği, bitişik hatlar arasındaki ortak etkileşim etkisini en aza indirdiğinden, anten dizilerinin tasarımında da kullanışlıdır [29].

Bu çalışmada SBT bandından çalışan vücut içi, İD-EDDK beslemeli anten yapısı tasarlanmıştır. İD-EDDK yapısında anten ön kısmındaki EDDK plakalarının yanı sıra arka yüzeyde de toprak plakasına sahiptir. Tasarlanan anten, dikdörtgen yama anten içerisinde testere şeklinde bir yarık barındıran bir yapıya sahiptir. Anten boyutları optimize edilmiştir. Tasarlanan antenin vücut içi uygulamalarda

kullanılmak üzere eğimli koşullardaki sonuçları ve SAR sonuçları da çalışmada yer almıştır.

## 2 Anten tasarımı

SBT bandında tasarlanan İD-EDDK beslemeli anten geometrisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Turuncu ile gösterilen kısım 0.035 mm kalınlığındaki bakır tabakayı, mor kısım ise alttaş gösterir. Alttaş olarak göreceli dielektrik geçirgenliği  $\epsilon_r = 10.8$  olan 0.6 mm kalınlığında Rogers-RO3210 kullanılmıştır. Ön yüzeyde şeklinde iki adet toprak dikdörtgen plaka kullanılırken, arka yüzeyde azaltılmış toprak plaka kullanılarak İD-EDDK besleme oluşturulmuştur. Anten boyutları geleneksel dikdörtgen yama antenin denklemleri göz önüne alınarak seçilmiştir. Antenin çalışma alanı deri, yağ ve kas ortamı olacak şekilde tasarlanmıştır. Dikdörtgen yama anten içerisinde testere şeklinde bir yarık, SBT bandında çalışmak üzere boyutları ayarlanarak kazanmıştır. Anten beslemesi olarak yüksek bant genişliği avantajı nedeniyle İD-EDDK tercih edilmiştir.

Tablo 1’de tasarlanan İD-EDDK beslemeli SBT Bant antenin optimum boyutları verilmiştir. Antenin maksimum boyutları 11 x 12 x 0.6 mm<sup>3</sup> (0.086λ x 0.094λ x 0.0047λ), dalga boyu λ merkezi rezonans frekansı için, olarak elde edilmiştir. Rezonans frekansı S<sub>11</sub> değeri en düşük olan Anten benzetimleri vücut içi kullanım amacıyla tasarlandığından CST-Microwave Studio programıyla, kas-yağ-deri dokuları içerisinde yapılmıştır

**Tablo 1:** İD-EDDK SBT bant anten yapısının ve vücut içi ortamın dokularının boyutları

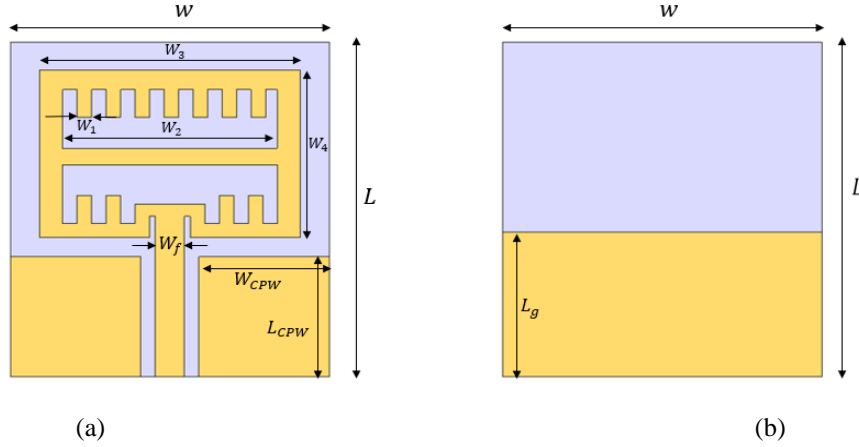
Parametre	W	L	L <sub>g</sub>	W <sub>CPW</sub>	L <sub>CPW</sub>	T	W <sub>3</sub>
Değer(mm)	11	12	5.2	4.5	4.3	0.6	9
Parametre	T <sub>skin</sub>	T <sub>fat</sub>	T <sub>muscle</sub>	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>f</sub>	W <sub>4</sub>
Değer(mm)	4	7	10	0.5	7.4	1	6

Tablo 2’de antenin ve antenin vücut içi tasarlandığı ortamın dokularının elektrik sabitleri, yoğunlukları, kalınlıkları ve iletkenlikleri verilmiştir.

**Tablo 2:** İnsan vücudu dokularının özellikleri

Doku	ε (Göreceli Dielektrik Sabiti)	Yoğunluk (kg/m)	Kalınlık (mm)	İletkenlik (S/m)
Deri	38	1010	4	1.46
Yağ	5.28	920	7	0.10
Kas	52.7	1040	10	1.73

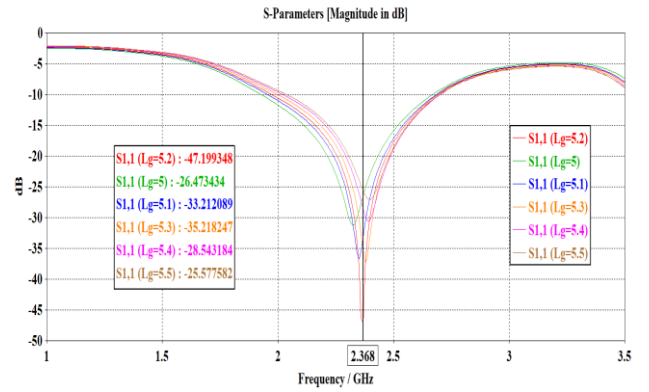
Antenin çalışma ortamı, vücut içi uygulamalara uygun olabilmesi için gerçek deri, yağ ve kas ortamında ve ortamların kalınlıkları dikkate alınarak tasarlanmıştır.



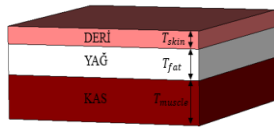
Şekil 1. SBT bandında kullanılan İD-EDDK antenin yapısı a). Ön yüzey b). Arka yüzey

Şekil 2’de gösterildiği gibi tasarlanan SMA konnektörlü anten yağ dokusunun alt kısmına kas dokusunun bitişine yerleştirilmiştir.

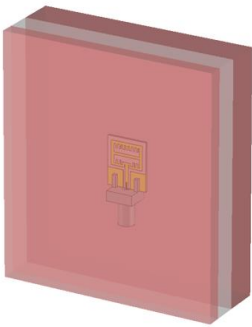
İD-EDDK SBT Bant anten yapısının parametrik çalışmalarıyla en uygun sonuca ulaşması sağlanmıştır. Antenin toprak yüzeyinin azaltılması yansıma katsayısının değerinin azalmasına ve bant genişliğine neden olur. Bu nedenle anten tasarımı çalışmaları tercih edilen bir yöntemdir. İD-EDDK SBT Bant Antenin toprak yüzeyinin azaltılması parametrik olarak gözlemlenmiştir. Şekil 3’te gösterilen grafiğe göre  $L_g$  için 5.2 mm en uygun değerdir.



Şekil 3. İD-EDDK SBT Bant antenin toprak yüzeyinin azaltılması ile ilgili parametrik çalışma



(a)



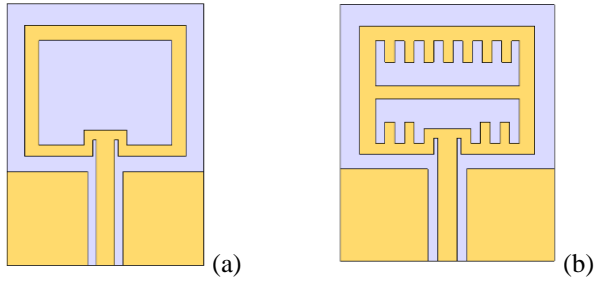
(b)

Şekil 2. Antenin a). Vücut içi ortamının dokuları ve kalınlıkları b). Vücut içinde konumlandırılması

Şekil 4’te geleneksel yarık anten üzerine testere dişleri eklenerek elde edilen yapının anten üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4 (a)’da geleneksel dikdörtgen yarık anten yapısı gösterilmiştir. Şekil 4 (b)’de geleneksel dikdörtgen yarık antene testere dişleri eklenmiş ve orta kısmından bir bağlantı yapılmıştır. Bunun sonucunda Şekil 4 (c)’de gösterilen yansıma katsayısı karşılaştırma grafiğine göre yansıma katsayısı değeri -26.59 dB değerinden -47.19 dB değerine düşmüştür. Ayrıca -10 dB bant genişliği 0.62 GHz değerinden 0.71 GHz değerine yükselmiştir. Tasarımda yapılan eklemeler antenin karakteristiğini iyileştirmiştir.

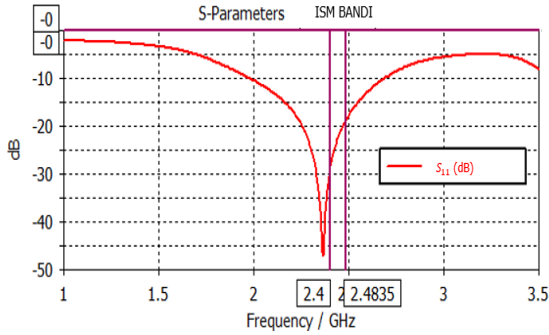
### 3 Benzetim sonuçları

Vücut içi olarak tasarlanan antenin benzetim işlemleri vücut ortamında olacak şekilde deri, yağ, kas dokuları içinde yapılmıştır. Üç tabakalı vücut ortam modeli sırasıyla deri, yağ ve kas dokuları için 4,7 ve 10 mm olarak seçilmiştir. Benzetimlerde SMA konnektör kullanılmıştır. Şekil 5’te verilen yansıma katsayısı grafiğine göre SBT bandını (2.4-2.48 GHz) tamamen içine alır. -10dB bant genişliği 1.97 GHz ile 2.68 GHz arasında 0.71 GHz olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4. a).** Geleneksel yarık anten yapısı **b).** Testere dişli yarık anten yapısı **c).** Testere dişinin anten üzerindeki etkisinin yansıma katsayısı üzerinden karşılaştırılması

2.36 GHz rezonans frekansı için yansıma katsayısı değeri -47.2 dB olarak gözlemlenmiştir.

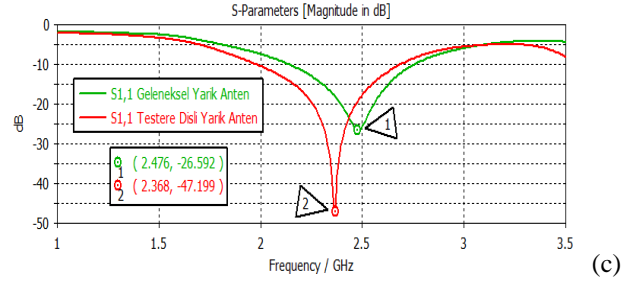


**Şekil 5.** Yansıma katsayısı grafiği merkez frekansı  $f=2.36$  GHz

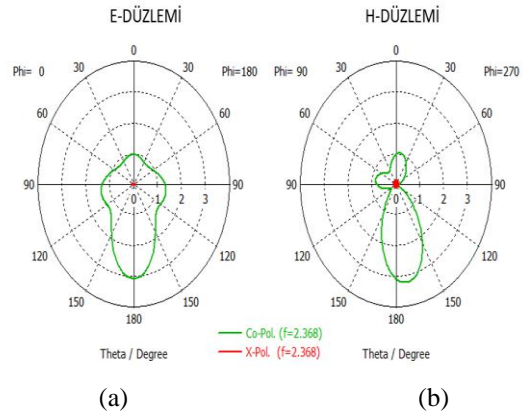
Tasarlanan SBT bant İD-EDDK beslemeli antenin iki boyutlu ışınma örüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Rezonans frekansı 2.36 GHz için Şekil 6 (a)'da elektrik alan yüzeyi, Şekil 6 (b)'da manyetik alan yüzeyi grafiği verilmiştir. Anten ışınma örüntüsünde 2.36 GHz rezonans frekansı için maksimum yönlülükte ana kulakçığının büyüklük değeri sırasıyla elektrik alan için 3.06, manyetik alan için 3.21 olarak ölçülmüştür.

Şekil 7'de tasarlanan antenin frekans değişimine karşılık kazanç grafiği ve 2.36 GHz rezonans frekansındaki 3 boyutlu ışınma örüntüsü verilmiştir. Vücut içi antenlerde anten kazancının negatif çıkması beklenen bir sonuçtur. Çünkü antenin enerjisi vücut dokusu içerisinde soğurur. Şekil 7 (a)'da görüldüğü gibi çalışma frekansı aralığında negatif kazanç görülmektedir. Şekil 7 (b)'de  $f=2.36$  GHz rezonans frekansında 3 boyutlu ışınma örüntüsünde anten kazancı gösterilmiştir.

Tasarlanan antenin 2.36 GHz frekans değeri için yüzey akım yoğunluğu Şekil 8 (a)'da gösterilmiştir. Şekle göre akım yoğunlukları sağ ve sol taraftaki testere dişleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca yama antenin çevresinde de yoğun bir akım gözlemlenmektedir. Vücut içi veya vücut üzerinde konumlandırılmış anten yapılarının gerçek hayatta ticari



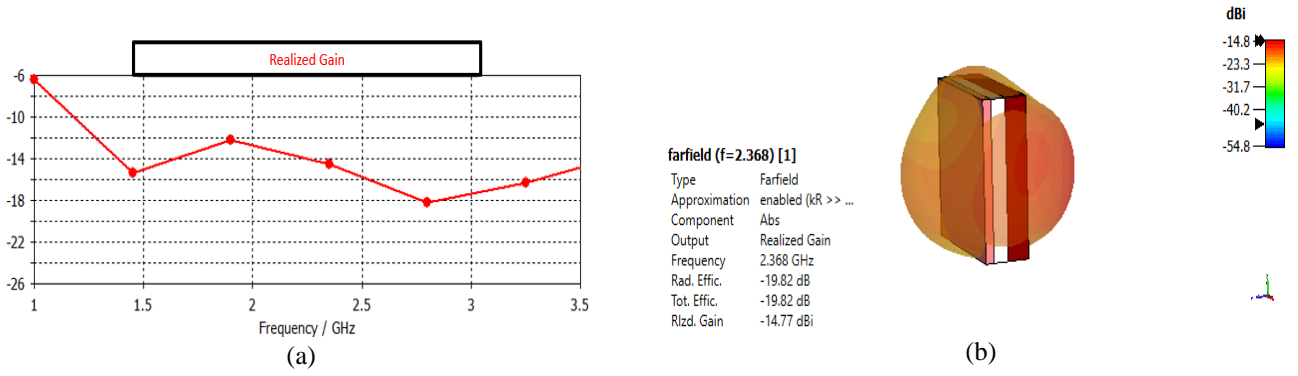
amaçla kullanılabilirliklerini değerlendirmek amacıyla Özgül Soğurma Oranı (ÖSO) değeri ölçülmelidir. ÖSO analizi sonucu, Birleşik Devletler standardı gereği (FCC) 1.6 W/kg'dan düşük olmalıdır [30]. Simülasyon yardımıyla yapılan ÖSO ölçümünde 1 mW giriş gücü için ölçülen maksimum ÖSO değeri Şekil 8(b)'de de görüleceği üzere 0.025 W/kg olmuştur. Dolayısıyla sınır değerinin üzerine çıkmadan, antene uygulanabilecek maksimum giriş gücü 63.5 mW olarak belirlenebilmektedir.



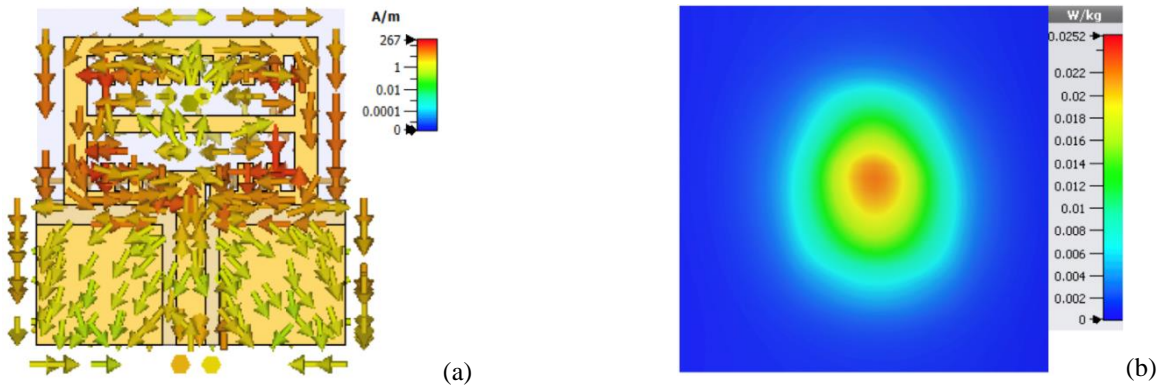
**Şekil 6.**  $f=2.36$  GHz için antenin uzak alan sonuçları a. E Düzleminde  $\Phi=0^\circ$  b. H Düzleminde  $\Phi=90^\circ$

Vücut içi uygulamalarda insan vücudunun kıvrımlı yapısı da göz önüne alınmalıdır. Buna göre ortamın dokuları ve anten yapısı eğimli koşullarda da doğrulanmalıdır. Tasarlanan antenin bükülmüş koşullardaki sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. 50 mm yarıçaplı silindirik eğimle yapılan işlemlerde düzlemsel sonuçlara çok yakın bir grafik elde edilmiştir. Antenin rezonans frekansı düzlemselde olan 2.368 GHz değerinden 2.404 değerine kaymıştır ancak hala SBT bandı grafiğinin içerisinde kalır. Böylece tasarlanan vücut içi antenin eğimli insan dokularında da iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

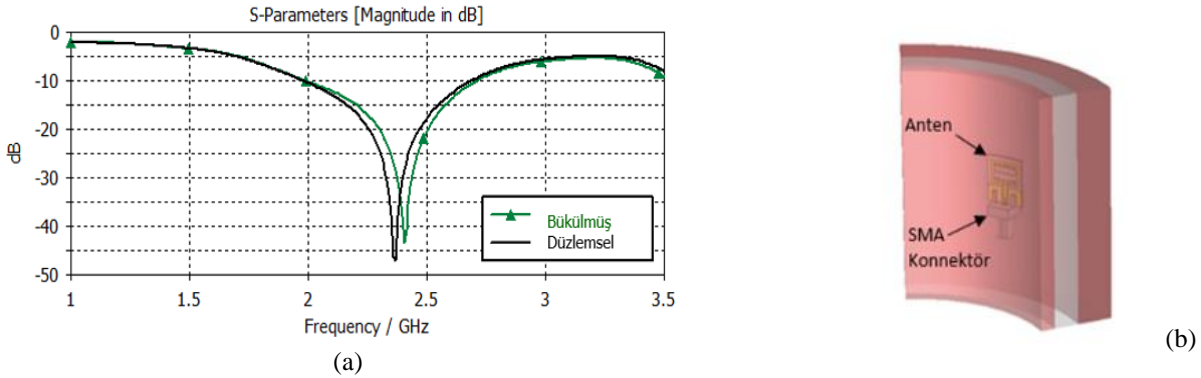
Önceki çalışmalarda SBT bandında çalışan vücut içi anten tasarımlarıyla karşılaştırılması Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan antenin a. frekans değişimine karşılık kazanç grafiği b.  $f=2.36$  GHz frekansındaki 3B ışınma örüntüsü



Şekil 8. Antenin 2.368 GHz çalışma frekansı için (a) yüzey akım, (b) ÖSO analizi sonucu



Şekil 9. İD-EDDK SBT Bant Antenin 50 mm yarıçaplı silindirik bir eğimle yapılan a. Yansıma katsayısı grafiği b. Eğimli vücut ortamının anten yapısı ve SMA konnektörün gösterimi

Tablo 3: SBT bantta çalışan vücut içi diğer anten tasarımı çalışmalarıyla karşılaştırma

Çalışma	Bant Genişliği (GHz)	Boyut (mm <sup>2</sup> )	Altaş malzemesi
[3]	0.406	16x13	RO3210( $\epsilon_r = 10.2$ )
[7]	0.18	10x11	Seramik ( $\epsilon_r = 9.8$ )
[11]	0.19	26x22	Seramik ( $\epsilon_r = 9.8$ )
[12]	0.3	14x14	RO3210( $\epsilon_r = 10.2$ )
[13]	0.36	15x15	RO3210( $\epsilon_r = 10.2$ )
[14]	0.682	41.5x29	FR-4 ( $\epsilon_r = 4.4$ )
Önerilen Çalışma	0.7152	11x12	RO3210( $\epsilon_r = 10.2$ )

Tablo 3'e bakıldığında bu çalışmada önerilen tasarımın bant genişliği açısından en yüksek ve anten boyutları açısından [7] numaralı çalışma hariç en küçük olarak görülmektedir. [7] ve [11]'deki çalışmalarda dar bantlı anten tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan geniş bantlı anten SBT bandını tamamen kapsar. Vücut içi uygulamalarda anten boyutlarının küçük olması uzun süreli uygulanabilirlik açısından önemlidir.

#### 4 Sonuç

SBT bandında çalışan 2.36 GHz rezonans frekansına sahip İD-EDDK beslemeli maksimum boyutları 11 x 12 x 0.6 mm<sup>3</sup> olan testere yarıklı bir anten tasarımı önerilmiştir. Anten tasarımında alttaş olarak Rogers-RO3210 ( $\epsilon_r = 10.2$ ) kullanılmıştır. CST-MWS programı ile tasarlanan antenin ön yüzeyinde toprak plakalarının yanı sıra arka yüzeyinde de azaltılmış toprak plaka kullanılmıştır. Arka yüzeyde azaltılan toprak plakada, parametrik çalışma ile en uygun değer bulunmuştur. İnsan dokuları ortamında deri, kas ve yağ tabakası içerisinde yapılan benzetim sonuçlarına göre, merkez rezonans frekansı -10 dB bant genişliği 0.71 GHz (%30.2) olarak ölçülmüştür. Yansıma katsayısı grafiği SBT bandını tamamen kapsar. SBT bandında çalışan İD-EDDK antenin uzak alan sonuçları ve yüzey akım değerleri verilmiştir. Antenin eğimli vücut içi dokularındaki benzetim sonuçlarıyla düzlemsel anten sonuçları karşılaştırılmış neredeyse benzer performans gösterdikleri görülmüştür. SBT bandındaki benzer vücut içi anten çalışmalarına kıyasla en yüksek bant genişliğine sahiptir. Ayrıca vücut içi anten tasarımının boyutları, benzer çalışmaların neredeyse hepsinden daha küçüktür. Yüksek bant genişliği sayesinde vücut içi uygulamalarda farklı dokularda ve farklı kalınlıklarda da kullanışlı bir tasarım elde edilmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %1

#### Kaynaklar



- [1] K. V. Babu, S. Das, S. Lakrit, S. K. Patel, B. T. Madhav and H. Medkour, Compact Dual-Band Printed MIMO Antenna with Very Low Mutual Coupling for WLAN, Wi-MAX, Sub-6 GHz 5G and X-Band Satellite Communication Applications. Progress In Electromagnetics Research C, 117, 99-114, 2021.
- [2] M. Ciydem and E. A. Miran, Dual-polarization wideband sub-6 GHz suspended patch antenna for 5G base station. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19(7), 1142-1146, 2020. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.2991967>
- [3] B. Dokmetas, G.O. Arican, N. Akcam and E. Yazgan, A novel millimeter-wave U-shaped radiating slot antenna with DGS structures for 5G cellular application. In 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 669-672, IEEE, November, 2019. <https://doi.org/10.23919/ELECO47770.2019.8990502>
- [4] T. Okan, A Wideband Conductor Backed Coplanar Waveguide Fed Implantable Antenna Operable in Different Tissues for Biotelemetry Applications. Radioengineering, 30(2), 2021. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0335>
- [5] J.Kim and Y. Rahmat-Samii, Implanted antennas inside a human body: Simulations, designs, and characterizations. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 52(8), 1934-1943, 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.832018>
- [6] M. M. Miran and F. Arifin, Design and performance analysis of a miniaturized implantable PIFA for wireless body area network applications. In 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), pp. 253-257, IEEE, January, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICREST.2019.8644216>
- [7] M. M. Abdelhamid and A.M. Allam, Detection of lung cancer using ultra wide band antenna. In 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), pp. 1-5, IEEE, November, 2016. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2016.7807452>
- [8] S. A. Kumar and T. Shanmuganatham, Design of implantable CPW fed monopole H-slot antenna for 2.45 GHz ISM band applications. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 68(7), 661-666, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.02.010>
- [9] S. A. Kumar, M. A. Raj and T. Shanmuganatham, Analysis and design of CPW fed antenna at ISM band for biomedical applications. Alexandria Engineering Journal, 57(2), 723-727, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.008>
- [10] M. L. Scarpello, D. Kurup, H. Rogier, D. V. Ginste, Axisa, F., J. Vanfleteren and G. Vermeeren, Design of an implantable slot dipole conformal flexible antenna for biomedical applications. IEEE transactions on antennas and propagation, 59(10), 3556-3564, 2011. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2163761>
- [11] S. Bhattacharjee, S. Maity, S. K. Metya and C. T. Bhunia, Performance enhancement of implantable medical antenna using differential feed technique. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(1), 642-650, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2015.09.001>
- [12] S. A. Kumar and T. Shanmuganatham, Design and analysis of implantable CPW fed bowtie antenna for ISM band applications. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 68(2), 158-165, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2013.08.003>
- [13] E. Doğanç, M. H. B. Ucar and A. Sondas, Preparation of a Human Skin-Mimicking Gels for In Vitro Measurements of the Dual-Band Medical Implant Antenna. Journal of the Turkish Chemical Society

- Section A: Chemistry, 3(3), 583-596, 2016. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.72855>
- [14] M. Palandoken, Compact bioimplantable MICS and ISM band antenna design for wireless biotelemetry applications. *Radioengineering*, 26(4), 917-923, 2017.
- [15] S. Sukhija and R.K. Sarin, Design and performance of two-sleeve low profile antenna for bio-medical applications. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(1), 49-61, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.10.013>
- [16] A. Kiourti, J. R. Costa, C. A. Fernandes and K. S. A. Nikita, Broadband implantable and a dual-band on-body repeater antenna: Design and transmission performance. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 62(6), 2899-2908, 2014. <https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2310749>
- [17] P. Soontornpipit, A dual-band compact microstrip patch antenna for 403.5 MHz and 2.45 GHz on-body communications. *Procedia Computer Science*, 86, 232-235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.105>
- [18] S. A. Kumar, T. Shanmuganantham and G. Sasikala, Design and development of implantable CPW fed monopole U slot antenna at 2.45 GHz ISM band for biomedical applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(7), 1604-1608, 2015. <https://doi.org/10.1002/mop.29151>
- [19] M. K. Magill, G. A. Conway and W. G. Scanlon, Tissue-independent implantable antenna for in-body communications at 2.36–2.5 GHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(9), 4406-4417, 2017. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2708119>
- [20] W. Xia, K. Saito, M. Takahashi, and K. Ito, Performances of an implanted cavity slot antenna embedded in the human arm. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(4), 894-899, 2009. <https://doi.org/10.34385/proc.34.1A2b-2>
- [21] P. Soontornpipit, C. M. Furse and Y. C. Chung, Design of implantable microstrip antenna for communication with medical implants. *IEEE Transactions on Microwave theory and techniques*, 52(8), 1944-1951, 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.831976>
- [22] S. Hashemi and J. Rashed-Mohassel, Design and miniaturization of dual band implantable antennas. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 38(4), 868-876, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2018.06.008>
- [23] T. Karacolak, A. Z. Hood and E. Topsakal, Design of a dual-band implantable antenna and development of skin mimicking gels for continuous glucose monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56(4), 1001-1008, 2008. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2008.919373>
- [24] J. Mathew, M. Abraham and T. Mathew, Triple band printed modified bow-tie antenna for RFID reader/ISM applications. *procedia computer science*, 93, 48-52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.180>
- [25] A. Sani, M. Rajab, R. Foster and Y. Hao, Antennas and propagation of implanted RFIDs for pervasive healthcare applications. *Proceedings of the IEEE*, 98(9), 1648-1655, 2010. <https://doi.org/10.1109/JPR OC.2010.2051010>
- [26] R. K. Garg, S. Singhal and R. Tomar, A CPW Fed Clown-Shaped Super Wideband Antenna. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 99, 159-168, 2021.
- [27] Z. Ding, D. Zhang and C. Ma, Broadband antenna design with integrated CB-CPW and parasitic patch structure for WLAN, RFID, WiMAX, and 5G applications. *IEEE Access*, 8, 42877-42883, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977616>
- [28] R. Simons, N. Coplanar waveguide circuits, components, and systems. John Wiley & Sons, 2004.
- [29] R. Garg, P. Bhartia, I. J. Bahl and A. Ittipiboon, *Microstrip antenna design handbook*. Artech house, 2001.
- [30] G. E. Kis and T. Okan, Compact Power-Symbol Shaped Microstrip Antenna for Healthcare Monitoring Systems. *El-Cezeri*, 9(1), 232-240, 2022. <https://doi.org/10.31202/ecjse.959265>





## Yeni bir otomatik yüz tanıma sistemi A novel automatic face recognition system

Engin Cemal Mengüç<sup>1,\*</sup> , Nurettin Acır<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Kayseri Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye  
<sup>2</sup> Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34149, İstanbul, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, yakın zamanda geliştirilen Lyapunov kararlılık teorisi (LKT) tabanlı yapay sinir ağı (YSA) algoritması kullanılarak yeni bir otomatik yüz tanıma sistemi önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak en bilgilendirici öznelikleri çıkarmak ve hesap karmaşıklığını azaltmak için temel bileşen analizi (TBA) metodu kullanılmıştır. Ardından, çıkarılan öznelikler ile LKT tabanlı YSA yapısı bir sınıflandırıcı olarak beslenmiştir. Önerilen yüz tanıma sisteminin başarımı, diğer sistemlerle karşılaştırılabilir olarak ORL yüz veri kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yüz tanıma sisteminin, adaptif adaptasyon kazanç oranı parametresi yardımıyla, daha yüksek eğitim hızının yanı sıra daha yüksek eğitim ve test tanıma oranları sağladığını kanıtlamıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yüz tanıma, Yapay sinir ağı, Lyapunov kararlılık teorisi

### 1 Giriş

Otomatik yüz tanıma sistemleri, insan-bilgisayar arayüzleri, biyomedikal görüntüleme, güvenlik, kontrol teknolojisi gibi birçok mühendislik uygulamasında odak noktası haline gelmiştir [1-16]. Yüz tanıma yaklaşımları genelde, öznelik-tabanlı yaklaşım [1-4] ve bütünsel yaklaşım [5, 6] olarak iki guruba ayrılır [9]. Öznelik-tabanlı yaklaşımlar mekânsal yüz tanıma için lokal öznelikler (örneğin; burun, ağız, göz vb.) çıkarırken, bütünsel yaklaşımlar, tanıma görevlerini yerine getirmek için tüm yüzlerle eşleştirme gerçekleştirir [7].

Yapay sinir ağları (YSA) diğer kural tabanlı sistemlere göre önemli başarımlar kazanımları sağlamak için istatistiksel ve yapısal bilgiyi kullandıklarından [15], hala yüz tanıma problemlerinde tercih edilen ilk sistem bileşenleri arasındadır [8-14]. YSA genellikle gradyan iniş algoritmaları ile eğitilir [16] fakat bu algoritmalar yavaş yakınsama probleminden dolayı YSA'nın eğitim süresini artırmaktadır. Hatta bu tür algoritmalar, hata başarımlar yüzeyinde yerel minimum noktalara takılabilmektedir [9]. Geleneksel gradyan tabanlı eğitim algoritmalarının yakınsama oranını hızlandırmak amacıyla literatürde; momentum terimi, standart eniyileme teknikleri ve adaptif öğrenme oranları (yinelemeli en küçük kare, eşlenik gradyan, yarı-Newton, Levenberg-Marquardt gibi) dahil olmak üzere çeşitli yöntemler önerilmiştir [17-20]. Bu yöntemler, geleneksel

### Abstract

In this study, a new automatic face recognition system is proposed using the recently developed Lyapunov stability theory (LST) based artificial neural network (ANN) algorithm. For this purpose, the principal component analysis (PCA) method is first used to extract the most informative features and reduce computational complexity. Then, LST based ANN structure as a classifier is fed by the extracted features. The performance of the proposed face recognition system is evaluated on the ORL face dataset in comparison with other systems. Experimental results prove that the proposed face recognition system provides higher training and test recognition rates as well as higher training speed with the help of the adaptive adaptation gain rate parameter.

**Keywords:** Face recognition, artificial neural network, Lyapunov stability theory

gradyan tabanlı algoritmalarından daha hızlı bir yakınsama oranı sergilemelerine rağmen, yüksek depolama, yüksek bellek gereksinimleri, yüksek hesaplama karmaşıklığı, sezgisel bilgi gereksinimi gibi ciddi problemler içerir [21, 22].

Son zamanlarda, bu tür problemlerin üstesinden gelmek için LKT tabanlı algoritmalar [8, 9, 23-29] popüler hale gelmiştir. Gradyan tabanlı eğitim algoritmalarının aksine, bu algoritmalar, ağırlık katsayılarını güncelleyerek hata başarımlar yüzeyi boyunca küresel minimum noktayı bulmayı amaçlar ve bu durumu gerçekleştirirken her zaman Lyapunov anlamında kararlılığı sağlarlar. Bu algoritmaların anahtar parametresi, yakınsama hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan adaptasyon kazanç oranı parametresidir. [8, 9, 23]'de yer alan çalışmalarda LKT tabanlı algoritmalar tasarlanırken, aday Lyapunov fonksiyonu olarak hata sinyali tabanlı fonksiyonlar yaygın olarak kullanılmış ve bu algoritmaların adaptasyon kazanç oranı parametresi sabit bir değer olarak seçilmiştir. Bu yaklaşımlarda [8, 9, 23], en iyi adaptasyon kazanç oranı parametresini belirlemek için çok sayıda deneme yapılmasına ihtiyaç vardır.

Bu amaçla, [24]'te yer alan çalışmada, adaptasyon kazanç oranının kendisini adaptif olarak güncellediği LKT tabanlı YSA algoritması geliştirilmiştir. Bu çalışmada [24], ilk olarak  $a_1 > 1$  durumu için aday Lyapunov fonksiyonu,

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: enginmenguc@kayseri.edu.tr (E.C. Mengüç)  
Geliş / Received: 27.03.2022 Kabul / Accepted: 28.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1094160

$V_t(k) = a_t^k e_t^2(k)$  seçilmiştir, burada  $a_t$ , adaptasyon kazanç oranıdır. Ardından ise LKT'nin [30] kesin negatiflik koşulunun kısıt olarak yer aldığı bir kısıtlı eniyileme problemi tanımlanmıştır. Tanımlanan bu problemin çözümünün sonucunda ise [24]'de yer alan LKT tabanlı YSA algoritması türetilmiştir. Önerilen algoritma Lyapunov anlamında kararlılığı her zaman sağlayarak YSA'nın ağırlık katsayılarını etkin bir şekilde güncellemiştir. Buna ek olarak, [24]'te önerilen algoritmanın diğer dikkat çekici özelliklerini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Önerilen algoritma, giriş bozukluğunun etkilerini ortadan kaldırarak YSA'nın eğitim hatasını asimptotik olarak sifira yaklaştırmaktadır [24].
- Gradyan tabanlı tekniklerden farklı olarak, önerilen algoritma hata başarımlı yüzeyi boyunca küresel minimum noktayı bulmayı amaçlamaktadır [24].
- Adaptasyon kazanç oranı parametresi YSA'nın öğrenme kabiliyetini önemli ölçüde geliştirmektedir [24].

Bu çalışmada, LKT tabanlı YSA algoritması [24] kullanılarak yeni otomatik bir yüz tanıma sistemi önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak en bilgilendirici öznelikler çıkarmak ve hesap karmaşıklığını ortadan kaldırmak için temel bileşen analizi (TBA) metodu [10, 11] kullanılmıştır. Ardından, çıkarılan öznelikler ile LKT tabanlı YSA bir sınıflandırıcı olarak beslenmiştir. Önerilen yüz tanıma sisteminin başarımlı, diğer sistemlerle karşılaştırılabilir olarak ORL veri kümesi [31] üzerinde test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yüz tanıma sisteminin diğer sistemlere kıyasla daha hızlı bir eğitim hızı ve daha yüksek bir tanıma oranı sağladığını açık bir şekilde göstermiştir.

## 2 Materyal ve metot

Bu bölümde, sırasıyla TBA yöntemi ile öznelik çıkarımı ve LKT tabanlı YSA algoritmasının [24] tasarımı sunulacaktır.

### 2.1 Öznelik çıkarımı için TBA metodu

Önerilen sistemde her hangi bir yüz görüntüsüne ait öznelikler çıkarmak için TBA metodu [10, 11] kullanılmıştır. Bilindi üzere,  $q \times q$  yoğunluk değerleri dizisine sahip bir yüz görüntüsü, 2 boyutlu bir matris formundan oluşmaktadır. Yüz tanıma sisteminde sınıflandırıcı olarak kullanılacak olan bir YSA yapısının eğitim süreci göz önüne alındığında, yüz görüntüsü önce  $q^2$  boyutuna sahip bir vektör formuna dönüştürülmelidir. Böylece,  $p$  adet yüz görüntüsüne ait eğitim kümesi  $\mathbf{Z} = \mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_p \subset \mathbb{R}^{q^2 \times p}$  olarak tanımlanmış olur, burada her bir vektör yüz tanıma sistemi tarafından sınıflandırılacak bir sınıfı temsil etmektedir.

Bu durumlar sağladıktan sonra, TBA metodunu kullanmak için önce kovaryans matrisinin aşağıdaki gibi tanımlanması gerekir:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^T - \bar{\mathbf{z}} \bar{\mathbf{z}}^T \quad (1)$$

burada  $\bar{\mathbf{z}} = (1/p) \sum_{i=1}^p \mathbf{z}_i$  ortalama görüntü vektörüdür.

Ardından ise kovaryans matrisi  $\mathbf{C}$ 'nin özdeğerleri ve özvektörleri hesaplanarak,  $r$  adet en büyük özdeğerlerle ilişkili  $r$  adet özvektörden oluşan  $\mathbf{U} = \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r \subset \mathbb{R}^{q^2 \times r}$  ( $r < p$ ) matrisi tanımlanır.

Eğitim sürecinde kullanılacak olan orijinal  $\mathbf{Z} \subset \mathbb{R}^{q^2 \times p}$  yüz görüntülerinin  $\mathbf{X} \subset \mathbb{R}^{r \times p}$  özyüz-tabanlı öznelikleri, kendine karşılık gelen özyüz uzayı  $\mathbf{Z}$ 'ye yansıtılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}^T \mathbf{Z} \quad (2)$$

Eğer yeni bir yüz görüntü olan  $\mathbf{z}_{new}$  ile sistem test edilmek istenirse, bu yeni görüntü özyüz uzayına aşağıda verilen ifade kullanılarak yansıtılır:

$$\mathbf{X}_{new} = \mathbf{U}^T (\mathbf{z}_{new} - \bar{\mathbf{z}}) \quad (3)$$

burada  $\mathbf{X}_{new}$  ifadesi sisteme test için uygulanan yeni görüntünün özyüz temelli özneliğini temsil etmektedir. Burada TBA metodu ile ilgili daha fazla bilgi için [10, 11]'deki çalışmalar incelenebilir.

#### 2.1.1 LKT tabanlı YSA algoritmasının tasarımı

Burada, LKT tabanlı YSA algoritmasının [24] tasarımından kısaca bahsedilecektir. Tasarımda kullanılan YSA yapısı,  $\mathbb{R}^n$ 'den  $\mathbb{R}^m$ 'e olan giriş-çıkış ilişkisi dikkate alınarak modellenmiştir, burada  $n$  ve  $m$  sırasıyla giriş ve çıkış sayısını temsil etmektedir. YSA yapısının ağırlık katsayılarını içeren  $M$ -boyutlu ağırlık vektörü  $\mathbf{w}_t(k)$  ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\mathbf{w}_t(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_t^{(2,1)}(k) \\ \mathbf{w}_1^{(1,0)}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{w}_u^{(1,0)}(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

burada  $u$  gizli katmandaki nöron sayısını temsil ederken,  $M = u(n+1) + (u+1)$  ve  $t = 1, 2, \dots, m$ 'dir.

YSA yapısına ait durum ve istenen çıkış denklemleri ise aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [8, 24, 32]:

$$\mathbf{w}_t(k) = \mathbf{w}_t(k-1) + \mathbf{v}_t(k) \quad (5)$$

$$d_t(k) = f(\mathbf{w}_t(k-1), \mathbf{x}(k)) + c_t(k) \quad (6)$$



burada  $\mathbf{w}_t(k)$  ve  $\mathbf{x}(k) = \{x_t(k)\} \in \mathfrak{X}^n$  ifadeleri sırasıyla YSA yapısının  $k$  anındaki durum ve giriş vektörlerini temsil ederken,  $f(\cdot): \mathfrak{X}^n \rightarrow \mathfrak{X}^m$  ifadesi YSA yapısının doğrusal olmayan fonksiyonunu temsil etmektedir. Ayrıca, (5) ve (6)'da yer alan  $\mathbf{v}_t(k)$  ve  $c_t(k)$  ifadeleri sıfır ortalamaya sahip rastgele Gauss süreçler olarak tanımlanmaktadır.

Bu tanımlamaların ardından, [8, 24]'de yer alan yöntem kullanılarak, YSA yapısı doğrusallaştırma işlemine tabi tutulur. Böylece doğrusallaştırılmış YSA çıkışı  $\tilde{y}_t(k)$  aşağıdaki gibi elde edilmiş olur:

$$\tilde{y}_t(k) = \mathbf{h}_t^T(k) \mathbf{w}_t(k) \quad (7)$$

burada  $\mathbf{h}_t(k)$  ifadesi doğrusallaştırma sürecinde elde edilen Jacobian matrisinin  $t$ 'inci sütun vektörünü temsil etmekte olup aşağıda tanımlanmıştır:

$$\mathbf{h}_t(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_t(k)}{\partial \mathbf{w}_t^{(2,1)}(k)} \\ \frac{\partial y_t(k)}{\partial \mathbf{w}_1^{(1,0)}(k)} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_t(k)}{\partial \mathbf{w}_u^{(1,0)}(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G'(z_t^{(2,1)}(k)) \mathbf{s}^{(2,1)}(k) \\ G'(z_t^{(2,1)}(k)) w_{t,1}^{(2,1)}(k) F_1'(z_1^{(1,0)}(k)) \mathbf{s}^{(1,0)}(k) \\ \vdots \\ G'(z_t^{(2,1)}(k)) w_{t,u}^{(2,1)}(k) F_u'(z_u^{(1,0)}(k)) \mathbf{s}^{(1,0)}(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

burada  $G'(z_t^{(2,1)}(k)) = 1 - (z_t^{(2,1)}(k))^2$  ve  $F'(z_u^{(1,0)}(k)) = 1 - (z_u^{(1,0)}(k))^2$  'dir,  $\mathbf{s}^{(1,0)}(k)$  giriş katmanından gizli katmana olan giriş vektörünü,  $\mathbf{s}^{(2,1)}(k)$  gizli katmandan çıkış katmanına olan giriş vektörünü,  $z_t^{(1,0)}(k)$  ve  $z_u^{(1,0)}(k)$  fonksiyonları her bir nöronun toplanmış çıkışlarını,  $F(\cdot) = G(\cdot) = (1 - e^{-\beta(\cdot)}) / (1 + e^{-\beta(\cdot)})$  fonksiyonları tanjant sigmoid fonksiyonlarını,  $F'(\cdot)$  ve  $G'(\cdot)$  ise sırasıyla  $F(\cdot)$  ve  $G(\cdot)$  'nin türevlerini temsil etmektedir.

Yapılan bu doğrusallaştırma işleminin ardından, LKT dikkate alınarak, YSA'nın  $t$ 'inci çıkışı için öncelikle aday Lyapunov fonksiyonu olarak  $V_t(k) = a_t^k e_t^2(k)$  ( $a_t > 1$  için) fonksiyonu seçilir. Ardından, LKT'nin kesin negatiflik şartının [30] kısıt fonksiyonu olarak kullanıldığı bir kısıtlı eniyileme problemi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\begin{aligned} & \text{Argmin} \left( \frac{1}{2} \delta \mathbf{w}_t^T \delta \mathbf{w}_t \right) \\ & \text{subject to} \\ & (a_t^k e_t^2(k) - a_t^{k-1} e_t^2(k-1)) < 0, \forall k \end{aligned} \quad (9)$$

burada  $\delta \mathbf{w}_t = \mathbf{w}_t(k) - \mathbf{w}_t(k-1)$  'dir ve  $e_t(k) = d_t(k) - \mathbf{h}_t^T(k) \mathbf{w}_t(k)$  ifadesi YSA'nın hata sinylidir. Denklem (9)'da yer alan kısıt fonksiyonu sayesinde, eniyileme işleminin Lyapunov anlamında kararlılığı her zaman garanti edilecektir. Denklem (9), Lagrange çarpanlar teoremi kullanılarak çözülecek olur ise YSA için aşağıdaki ağırlık vektörü güncelleme kuralı [24] elde edilmiş olur:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_t(k) &= \mathbf{w}_t(k-1) \\ &+ \frac{\mathbf{h}_t(k)}{\|\mathbf{h}_t(k)\|^2} \left( 1 - \frac{|e_t(k-1)|}{(a_t(k-1))^{k/2} |\alpha_t(k)|} \right) \alpha_t(k) \end{aligned} \quad (10)$$

burada  $\alpha_t(k) = d_t(k) - \mathbf{h}_t^T(k) \mathbf{w}_t(k-1)$  ve  $a_t(k) = 1 + e_t^2(k-1) / e_t^2(k)$  sırasıyla ön kestirim hatası ve adaptasyon kazanç oranıdır. Adaptasyon kazanç oranı  $a_t(k)$  'nın, ardışık eğitim hata oranlarına bağlı olarak güncellendiği ve dolayısıyla eğitim sürecini önemli ölçüde iyileştirdiği unutulmamalıdır [24]. Ayrıca bu parametre başlangıçta  $a_t(0) > 1$  [24] olarak ayarlanmıştır. Bununla birlikte temel sebebi Lyapunov anlamında eğitim hatası  $e_t(k)$  'nin asimptotik yakınsamasının her zaman sağlanması içindir.

Ayrıca, Denklem (10)'un payda kısımlarında oluşabilecek tekillik problemleri, başarıyı etkilemeyecek kadar küçük bir  $\lambda$  pozitif değişkeni ile aşağıdaki gibi ortadan kaldırılabılır.

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_t(k) &= \mathbf{w}_t(k-1) + \frac{\mathbf{h}_t(k)}{\lambda + \|\mathbf{h}_t(k)\|^2} \\ &\times \left( 1 - \frac{|e_t(k-1)|}{\lambda + (a_t(k-1))^{k/2} |\alpha_t(k)|} \right) \alpha_t(k) \end{aligned} \quad (11)$$

Sonuç olarak, LKT tabanlı YSA algoritması bu bölümde kısaca sunulmuştur. Bu algoritma hakkında daha fazla bilgi için [24]'te yer alan çalışma incelenebilir.

### 3 Önerilen otomatik yüz tanıma sistemi

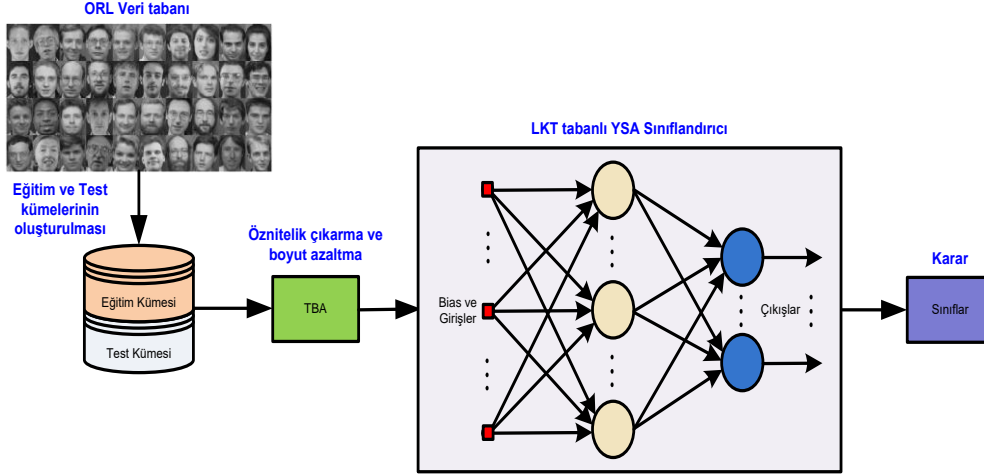
Bu bölümde, önerilen otomatik yüz tanıma sisteminin nasıl çalıştığından bahsedilmiştir. Şekil 1, önerilen otomatik tanıma sisteminin blok diyagramını göstermektedir. Şekil 2, önerilen yüz tanıma sisteminin adımları aşağıdaki gibidir.

- i. **Eğitim ve Test Kümesinin Oluşturulması:** Bu adımda, veri kümesi üzerinde istenilen oranlarda rastgele olmak kaydıyla eğitim ve test kümesi oluşturulmuştur.
- ii. **Öznitelik Çıkarımı ve Boyut Azaltma:** ORL yüz veri tabanı [31] görüntülerinin yüksek boyutluluğunu azaltmanın yanı sıra en bilgilendirici öznitelikleri çıkarmak için TBA metodu [10, 11] kullanılmıştır.
- iii. **LKT Tabanlı YSA Sınıflandırıcısı:** Bu adımda, bir önceki adımda çıkarılan öznitelikler ile LKT tabanlı

YSA sınıflandırıcısı [24] beslenerek eğitim süreci gerçekleştirilmiştir.

- iv. **Karar:** Bu adımda, eğitilmiş yüz görüntülerinin her biri kendi sınıfına ayrılmıştır.

Ayrıca eğitim sürecinin bitmesinin ardından ise yeni test görüntüsünün özyüz temelli özniteligi çıkarılıp eğitilmiş olan YSA'ya uygulanıp hangi sınıfa ait olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. Önerilen yüz tanıma sistemi

Tablo 1. Uygulama 1 için algoritmaların test tanıma başarımı

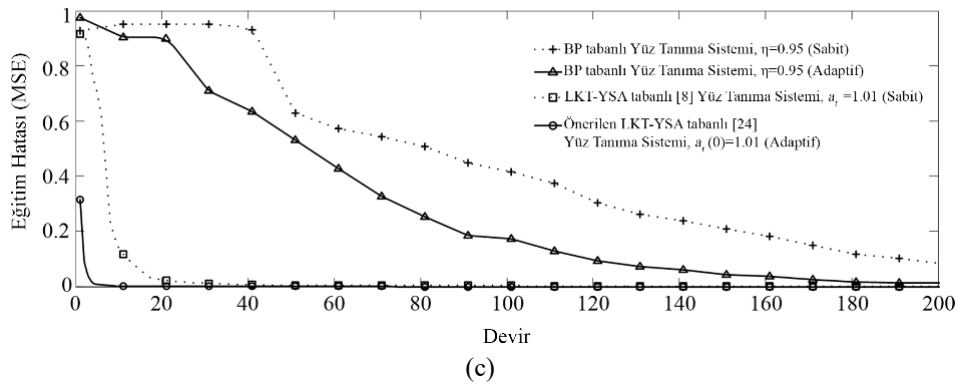
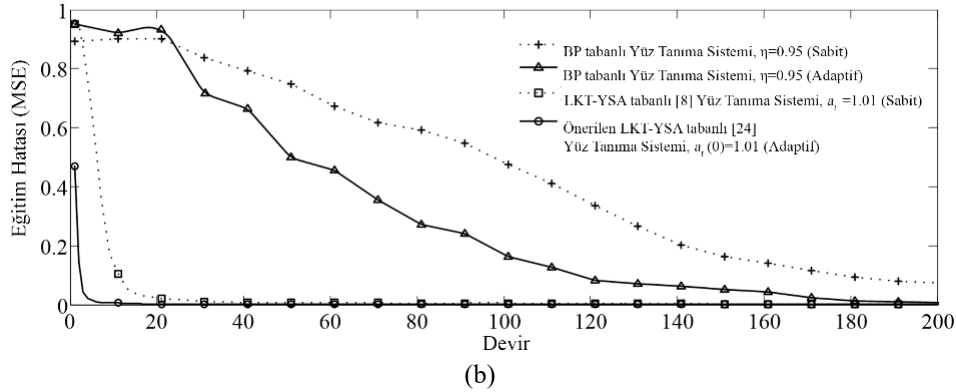
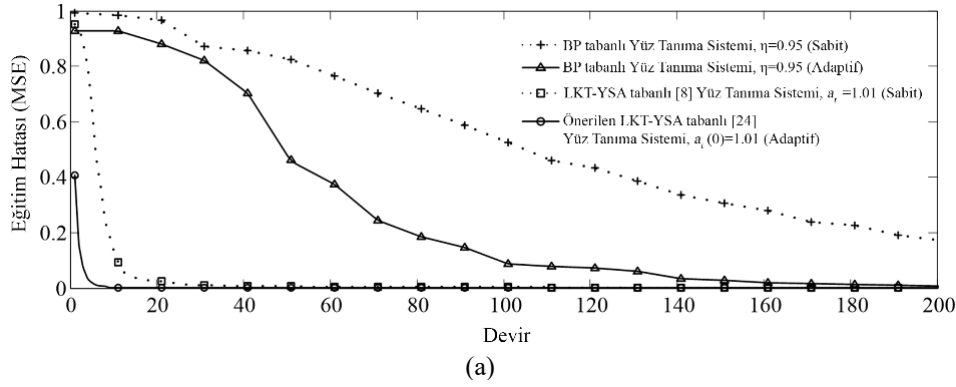
Öznitelik Sayısı	Test Tanıma Oranı (%)			
	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , sabit)	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , adaptif)	LKT-YSA Tabanlı [8] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i = 1.01$ , sabit)	Önerilen LKT-YSA Tabanlı [24] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i(0) = 1.01$ , adaptif)
20	67.50	76.87	74.37	84.30
40	78.12	85.00	81.25	85.62
60	79.37	86.25	82.50	90.00
80	76.87	83.75	83.12	88.75
100	75.62	80.62	76.25	88.75
120	75.62	80.00	73.12	87.50
180	75.00	79.50	62.50	85.62
240	74.37	78.79	61.75	85.00

Tablo 2. Uygulama 2 için algoritmaların test tanıma başarımı

Öznitelik Sayısı	Test Tanıma Oranı (%)			
	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , sabit)	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , adaptif)	LKT-YSA Tabanlı [8] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i = 1.01$ , sabit)	Önerilen LKT-YSA Tabanlı [24] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i(0) = 1.01$ , adaptif)
20	70.5	73.75	74.0	84.0
40	77.0	79.50	80.0	84.5
60	78.5	83.00	81.5	89.0
80	76.5	82.00	80.0	88.5
100	74.5	81.00	77.0	88.5
150	72.5	76.5	74.5	88.0
200	72.0	75.0	70.0	87.0

**Tablo 3.** Uygulama 3 için algoritmaların test tanıma başarımı

Öznitelik Sayısı	Test Tanıma Oranı (%)			
	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , sabit)	BP Tabanlı Yüz Tanıma Sistemi ( $\eta = 0.95$ , adaptif)	LKT-YSA Tabanlı [8] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i = 1.01$ , sabit)	Önerilen LKT-YSA Tabanlı [24] Yüz Tanıma Sistemi ( $a_i(0) = 1.01$ , adaptif)
20	67.50	79.58	69.58	81.66
40	74.58	82.08	79.58	83.33
60	75.41	82.50	81.00	84.41
80	71.25	80.50	80.83	84.16
100	70.41	76.25	77.91	83.75
120	68.75	75.83	71.66	82.08
140	67.79	71.66	70.00	81.00
160	64.45	70.83	66.25	79.16



**Şekil 2.** 60 adet TBA özniteligi için algoritmaların eğitim MSE başarımları (a) uygulama 1 (b) uygulama 2 (c) uygulama 3

## 4 Veri kümesi, uygulamalar ve ön işleme süreci

### 4.1 Veri kümesi

Bu çalışmada sunulan uygulamalar, ORL yüz görüntüsü veri kümesi üzerinde yapılmıştır [31]. Bu veri kümesinde farklı cinsiyet, yaş ve etnik gruplara sahip 40 kişinin her biri için 10 farklı resim bulunmaktadır. Veri kümesinde farklı zamanlarda elde edilmiş ve farklı özelliklere sahip toplam 400 yüz görüntüsü bulunmaktadır. Tüm orijinal resimler 92x112 piksel çözünürlüğe sahiptir ve gri seviyededir. Bu çalışmada, 40 kişinin tüm görüntüleri kullanmıştır.

### 4.2 Uygulamalar

Her uygulama için eğitim ve test kümesi şu şekilde oluşturulmuştur:

**Uygulama 1:** Eğitim süreci için kişi başına altı görüntü rastgele seçilirken, kalan dört görüntü eğitilmiş ağırları test etmek için uygulanmıştır (% 60 Eğitim ve % 40 Test).

**Uygulama 2:** Eğitim süreci için kişi başına beş görüntü rastgele seçilirken, kalan beş görüntü eğitilmiş ağırları test etmek için uygulanmıştır (% 50 Eğitim ve % 50 Test).

**Uygulama 3:** Eğitim süreci için kişi başına dört görüntü rastgele seçilirken, kalan altı görüntü eğitilmiş ağırları test etmek için uygulanmıştır (% 40 Eğitim ve % 60 Test).

Yukarıda verilen üç farklı uygulama ile veri kümesi üzerinde farklı oranlarda eğitim ve test kümelerinin değişimine göre algoritmaların davranışının daha açık bir şekilde gözlemlenebilmesi planlanmıştır.

### 4.3 Ön işleme

Bu çalışmada veriler, iki aşamadan oluşan bir ön işleme sürecinden geçirilmiştir. Bunlardan ilki, hem eşit bir yoğunluk dağılımı hem de yüz görüntülerinin kontrastını daha da iyileştirmek için yüz görüntülerine sırasıyla histogram eşitleme ile normalizasyon işleminin (1 ile -1 arasında) uygulanmasıdır. İkincisi ise, tüm uygulamalarda hem yüksek giriş boyutluluğunu azaltmak hem de öznelik çıkartmak için TBA'nın uygulanmasıdır. ORL veri kümesi dikkate alındığında, bir resim görüntüsünün boyutu 1x10304'dür. TBA sonrasında bu boyut, bu çalışmada 1x20 ile 1x240 arasında bir değere düşürülebilmektedir (Tablo 1, 2 ve 3'ten gözlemlendiği üzere).

## 5 Sonuçlar ve tartışma

Bu bölümde sunulan yüz tanıma sistemlerinde sınıflandırıcı olarak farklı öğrenme algoritmasına sahip dört tür YSA sınıflandırıcı kullanılmıştır. Kullanılan sınıflandırıcıya ait YSA yapısı, giriş, gizli ve çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Bu çalışmada, giriş katmanının boyutu TBA öznelik sayısına, çıkış katmanının boyutu ORL veri kümesinde 40 farklı sınıf olduğu için 40'a, gizli katmanının boyutu ise 60'a kurulmuştur. Sınıflandırıcılarda kullanılan algoritmalar sırasıyla, sabit bir öğrenme oranına sahip gradyan tabanlı BP algoritması, adaptif bir öğrenme oranına sahip gradyan tabanlı BP

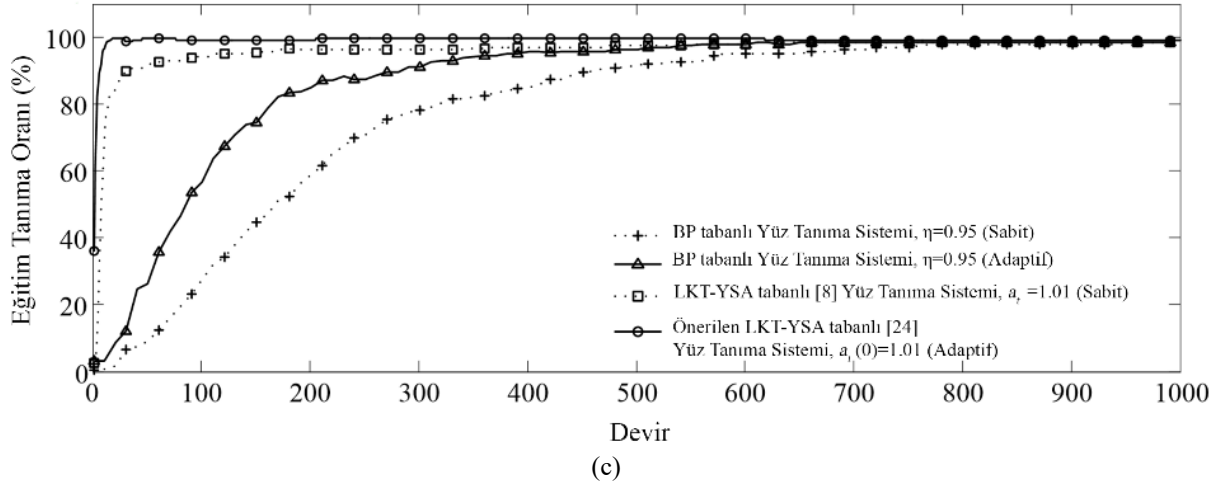
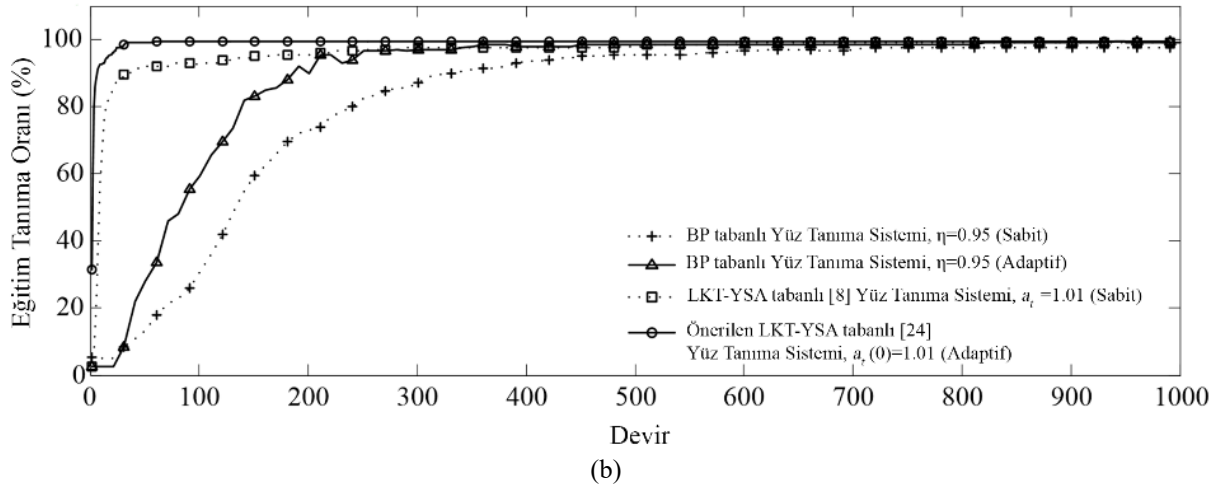
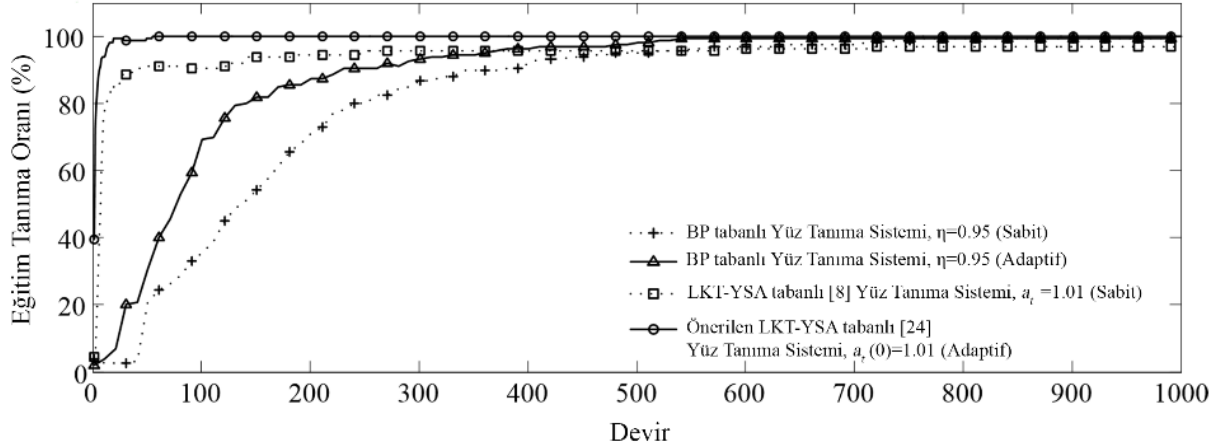
algoritması, sabit adaptasyon kazanç oranına sahip LKT tabanlı YSA algoritması [8] ve adaptif adaptasyon kazanç oranına sahip [24]'de önerilen LKT tabanlı YSA algoritmasıdır. Bu algoritmaların başarımları, eğitim hatası yakınsaması, eğitim tanıma oranı ve test tanıma oranı açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her algoritmanın eğitim ve test süreçleri 2.53 GHz CPU ve 4 GB RAM içeren bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Adil bir karşılaştırma için algoritmalara ait parametreler ise şu şekilde ayarlanmıştır. (i) Önerilen yüz tanıma sisteminde kullanılan LKT tabanlı YSA algoritmasının [24] adaptasyon kazanç oranı  $a_t(0) = 1.01$  değerine ayarlanırken, diğer LKT tabanlı algoritmasının [8] adaptasyon kazancı  $a_t = 1.01$  değerine ayarlanmıştır. (ii) Her iki LKT tabanlı YSA algoritması için hata sinyalinin başlangıç değeri  $e_t(0) = 0.01$  olarak ayarlanmıştır. (iii) Gradyan tabanlı BP algoritmalarının öğrenme oranları ise  $\eta = 0.95$  olarak seçilmiştir.

Tablo 1, 2 ve 3'te sırasıyla uygulama 1, 2 ve 3 için TBA ile çıkarılan özneliklere karşı her bir algoritmanın test tanıma oranları verilmiştir. Tablo 1, 2 ve 3'ten görüldüğü gibi, adaptif adaptasyon kazanç oranına [24] sahip önerilen yüz tanıma sistemi, test için kullanılan yüz görüntülerini yüksek doğrulukta tespit ederek kişileri tanımlamada diğer yüz tanıma sistemlerinden daha iyi bir başarımla sergilemiştir. Tablo 1, 2 ve 3'te sunulan sonuçlar, bu çalışmada önerilen sistemin tanıma başarımının diğerlerine kıyasla, öznelik sayısının değişimine karşı oldukça gürbüz olduğunu göstermiştir. Ayrıca en iyi başarımlar, 60 adet öznelik için gözlemlenmiştir. Bu yüzden de Şekil 2, 3 ve 4'de, en iyi başarımın elde edildiği bu öznelik sayısı dikkate alınarak, tüm yüz tanıma sistemlerinin hata, eğitim ve test başarımları devir sayısına göre çizdirilmiştir.

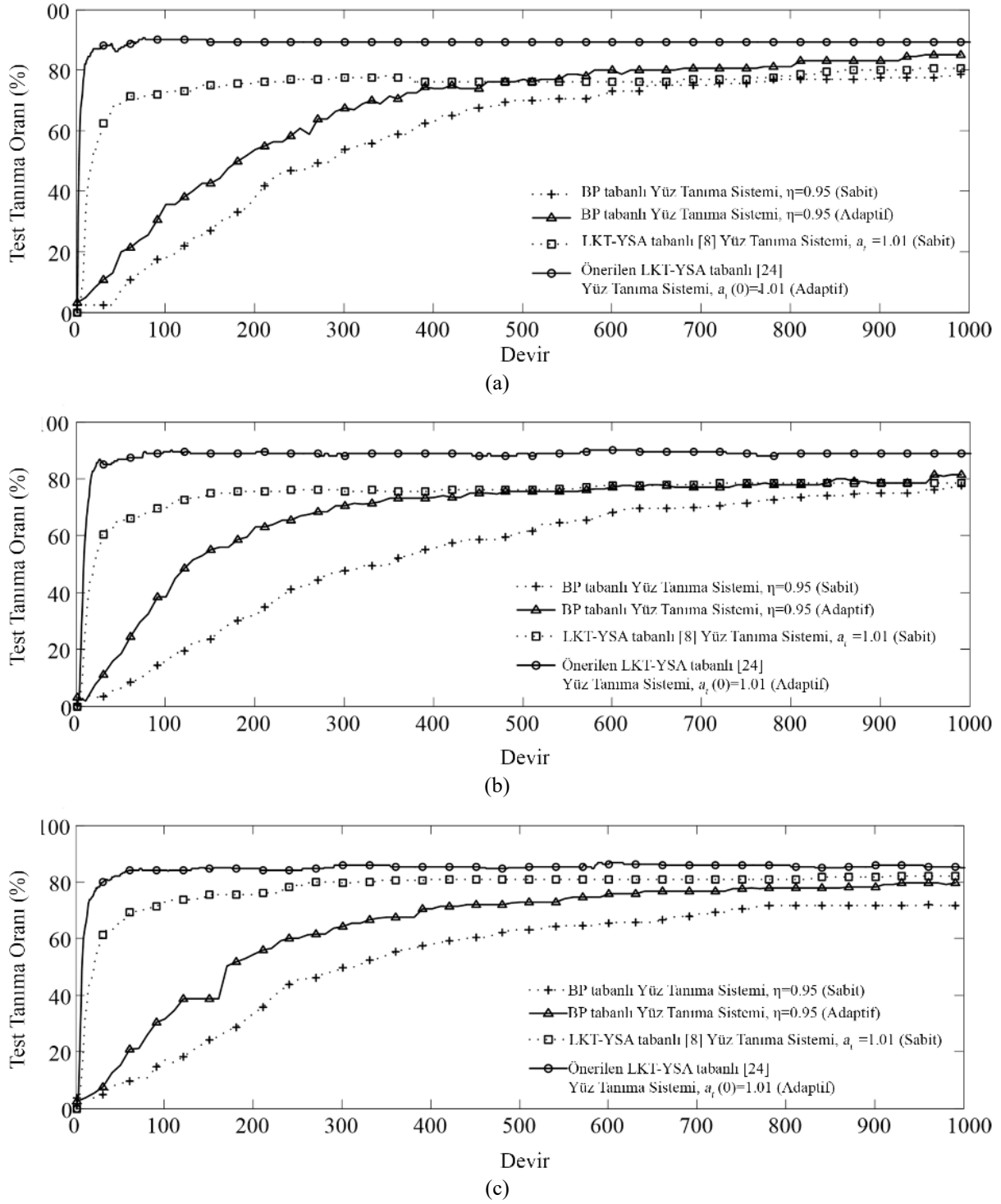
Şekil 2'de, önerdiğimiz yüz tanıma sistemi ile hata yakınsamasındaki gelişme açık bir şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, önerilen LKT-tabanlı yüz tanıma sistemi, üç uygulama için yaklaşık 20 devir içinde minimum ortalama kare hata (Mean Square Error, MSE) değerine ulaşmıştır. Bu nedenle önerilen sistemin eğitim hatası yakınsama oranı diğerlerinden çok daha hızlıdır.

Şekil 3'te, her üç uygulama için eğitim tanıma oranlarının değişimi verilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü gibi, tüm uygulamalar için, önerilen sistem 40 devir içinde eğitimin % 100'ünü tamamlamıştır.

Şekil 4'te ise eğitim aşaması tamamlanan yüz tanıma sistemlerinin test başarımlarının devir sayısına göre değişimine yer verilmiştir. Görüldüğü üzere, bu çalışmada önerilen yüz tanıma sistemi, bütün uygulamalar için diğer sistemlere kıyasla yaklaşık 100 devir içinde daha yüksek bir test tanıma oranı sağlamıştır. Sonuç olarak; önerilen yüz tanıma sisteminde LKT tabanlı YSA algoritmasının sınıflandırıcı olarak kullanılması başarımları önemli ölçüde artırmıştır. Yapılan bu çalışma, önerilen yüz tanıma sisteminin başarımının, diğer sağlam öznelik çıkarma yöntemleriyle birleştirilerek daha da geliştirilebileceğini doğrulamıştır.



Şekil 3. 60 adet TBA özneliği için algoritmaların eğitim tanıma oranı başarımları (a) uygulama 1 (b) uygulama 2 (c) uygulama 3



Şekil. 4. 60 adet TBA özneliği için algoritmaların test tanıma oranı başarımları (a) uygulama 1 (b) uygulama 2 (c) uygulama 3

## 6 Sonuç

Bu çalışmada, LKT tabanlı YSA algoritması [24] kullanılarak yeni otomatik bir yüz tanıma sistemi önerilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak en bilgilendirici öznelikleri çıkarmak ve hesap karmaşıklığını azaltmak için TBA metodu kullanılmıştır. Ardından, çıkarılan öznelikle LKT tabanlı YSA bir sınıflandırıcı olarak beslenmiştir. Önerilen yüz tanıma sisteminin

başarımı, diğer sistemlerle karşılaştırmalı olarak ORL veri kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yüz tanıma sisteminin, adaptif adaptasyon kazanç oranı parametresi yardımıyla, daha yüksek eğitim hızının yanı sıra daha yüksek eğitim ve test tanıma oranları sağladığını kanıtlamıştır.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %11

## Kaynaklar

- [1] P. N. Belhumeur, J. P. Hespanha and D. J. Kriegman, Eigenfaces vs. fisherfaces: Recognition using class specific linear projection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19 (7), 711–720, 1997. doi: [10.1109/34.598228](https://doi.org/10.1109/34.598228)
- [2] C. F. Bobis, R. C. Genezalez, J. A. Cancelas, I. Alvarez and J. M. Enguita, Face recognition using binary thresholding for features extraction. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP)*, pp. 1077-1080, IEEE, 1999. doi: [10.1109/ICIAP.1999.797742](https://doi.org/10.1109/ICIAP.1999.797742)
- [3] S. Cagnoni, A. Poggi, and G. L. Porcari, A modified modular eigenspace approach to face recognition. In *Proceedings of the 10th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP)*, pp. 490-495, IEEE, 1999. doi: [10.1109/ICIAP.1999.797643](https://doi.org/10.1109/ICIAP.1999.797643)
- [4] S. C. Yan, H. Wang, X. O. Tang and T. Huang, Exploring features descriptors for face recognition. In *Proceedings of the 32nd IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 629-632, 2007. doi: [10.1109/ICASSP.2007.365986](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.365986)
- [5] M. Kirby and L. Sirovich, Application of the Karhunen-Loeve procedure for the characterization of human faces. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12, 103–108, 1990. doi: [10.1109/34.41390](https://doi.org/10.1109/34.41390)
- [6] W. Hu, O. Farooq and S. Datta, Wavelet based subspace features for face recognition. In *Proceedings of the International Congress on Image and Signal Processing (ICSP)*, pp. 426-430, IEEE, 2008. doi: [10.1109/CISP.2008.618](https://doi.org/10.1109/CISP.2008.618)
- [7] A. S. Mian, M. Bennamoun and R. Owens, An efficient multimodal 2D-3D hybrid approach to automatic face recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29 (11), 1927–1943, 2007. doi: [10.1109/TPAMI.2007.1105](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1105)
- [8] K. H. Lim, K. P. Seng, L. Ang and S. W. Chin, Lyapunov theory-based multilayered neural network. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 56 (4), 305-309, 2009. doi: [10.1109/TCSII.2009.2015400](https://doi.org/10.1109/TCSII.2009.2015400)
- [9] L. Ang, K. H. Lim, K. P. Seng and S. W. Chin, A Lyapunov theory-based neural network approach for face recognition. *Intelligent Systems for Automated Learning and Adaptation*, IGI Global Press, pp. 23–48, 2010. doi: [10.4018/978-1-60566-798-0.ch002](https://doi.org/10.4018/978-1-60566-798-0.ch002)
- [10] M. J. Er, S. Wu, J. Lu and H. L. Toh, Face recognition with radial basis function (RBF) neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13 (3), 697–710, 2002. doi: [10.1109/TNN.2002.1000134](https://doi.org/10.1109/TNN.2002.1000134)
- [11] M. J. Er, W. L. Chen and S. Q. Wu, High-speed face recognition based on discrete cosine transform and RBF neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16 (3), 679–691, 2005. doi: [10.1109/TNN.2005.844909](https://doi.org/10.1109/TNN.2005.844909)
- [12] J. Zhou, Y. Liu and Y. H. Chen, Face recognition using kernel PCA and hierarchical RBF network. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management Applications (CISIM)*, 239-244, 2007. doi: [10.1109/CISIM.2007.28](https://doi.org/10.1109/CISIM.2007.28)
- [13] S. H. Lin, S. Y. Kung and L. J. Lin, Face recognition/detection by probabilistic decision-based neural network. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8, 114–132, 1997. doi: [10.1109/72.554196](https://doi.org/10.1109/72.554196)
- [14] S. A. Nazeer, N. Omar and M. Khalid, Face recognition system using artificial neural network approach. In *Proceedings of the International Conference on Signal Processing, Communication and Networking (ICSCN)*, 420-425, 2007. doi: [10.1109/ICSCN.2007.350774](https://doi.org/10.1109/ICSCN.2007.350774)
- [15] R. Chellappa, C. Wilson and S. Sirohey, Human and machine recognition of faces: A survey. *Proceedings of the IEEE*, 83 (5), 705–740, 1995. doi: [10.1109/5.381842](https://doi.org/10.1109/5.381842)
- [16] D. Valentin, H. Abdi, A. J. O’toole and G. W. Cottrell, Connectionist models of face processing: A survey. *Pattern Recognition*, 27, 1209–1230, 1994. doi: [10.1016/0031-3203\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0031-3203(94)90006-X)
- [17] J. Bilski and L. Rutkowski, A fast training algorithm for neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog Digital and Signal Processing*, 45 (6), 749-753, 1998. doi: [10.1109/82.686696](https://doi.org/10.1109/82.686696)
- [18] C. Charalambous, Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks. *IEE Proceedings*, 139 (3), 301–310, 1992. doi: [10.1049/ip-g-2.1992.0050](https://doi.org/10.1049/ip-g-2.1992.0050)
- [19] G. Lera and M. Pinzolas, Neighborhood based Levenberg-Marquardt algorithm for neural network training. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13 (5), 1200-1203, 2002. doi: [10.1109/TNN.2002.1031951](https://doi.org/10.1109/TNN.2002.1031951)
- [20] S. Osowski, P. Bojarczak and M. Stodolski, Fast second order learning algorithm for feedforward multilayer neural network and its applications. *Neural Networks*, 9 (9), 1583–1596, 1992. doi: [10.1016/S0893-6080\(96\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(96)00029-9)
- [21] L. Behera, S. Kumar and A. Patnaik, On the adaptive learning rate that guarantees convergence in feedforward networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 17 (5), 1116–1125, 2006. doi: [10.1109/TNN.2006.878121](https://doi.org/10.1109/TNN.2006.878121)
- [22] X. Jing and L. Cheng, An optimal-PID control algorithm for training feed-forward neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (6), 2273-2283, 2013. doi: [10.1109/TIE.2012.2194973](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194973)
- [23] K. P. Seng, Z. Man and H. R. Wu, Lyapunov theory-based radial basis function networks for adaptive filtering. *IEEE Transactions on Circuits Systems I: Fundamental Theory Applications*, 49 (8), 1215-1220, 2002. doi: [10.1109/TCSI.2002.801255](https://doi.org/10.1109/TCSI.2002.801255)
- [24] N. Acır and E. C. Mengüç, Lyapunov theory based adaptive learning algorithm for multilayer neural

- networks. *Neural Network World*, 24 (6), 619–636, 2014. doi: [10.14311/NNW.2014.24.035](https://doi.org/10.14311/NNW.2014.24.035)
- [25] E. C. Mengüç and N. Acır, A novel adaptive filter design using Lyapunov stability theory. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23 (3), 719-728, 2015. doi: [10.3906/elk-1212-29](https://doi.org/10.3906/elk-1212-29)
- [26] E. C. Mengüç and N. Acır, Real-time implementation of Lyapunov stability theory-based adaptive filter on FPGA. *IEICE Transactions on Electronics*, 99 (1), 129-137, 2016. doi: [10.1587/transele.E99.C.129](https://doi.org/10.1587/transele.E99.C.129)
- [27] E. C. Mengüç and N. Acır, An augmented complex-valued Lyapunov stability theory based adaptive filter algorithm. *Signal Processing*, 137, 10-21, 2017. doi: [10.1016/j.sigpro.2017.01.031](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.01.031)
- [28] E. C. Mengüç and N. Acır, A generalized Lyapunov stability theory-based adaptive FIR filter algorithm with variable step sizes. *Signal, Image and Video Processing*, 11 (8), 1567-1575, 2017. doi: [10.1007/s11760-017-1121-8](https://doi.org/10.1007/s11760-017-1121-8)
- [29] E. C. Mengüç and N. Acır, A novel adaptive filter algorithm for tracking of chaotic times series. 2011 IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 490-493, 2011. doi: [10.1109/SIU.2011.5929694](https://doi.org/10.1109/SIU.2011.5929694)
- [30] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Macmillan, New York, NY, 1992.
- [31] ORL Database of Faces, The database of faces Olivetti Research Laboratory. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/facedatabase.html>, Accessed 3 March 2015.
- [32] C. S. Leung, A. C. Tsoi and L. W. Chan, Two regularizes for recursive least squared algorithms in feedforward multilayered neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 12 (6), 1314-1332, 2001. doi: [10.1109/72.963768](https://doi.org/10.1109/72.963768)







## Ritmik desen üreticileri için Rayleigh osilatörünün fraksiyonel versiyonu ve devre sentezi

### The fractional version and the circuit synthesis of the Rayleigh oscillator for the rhythmic pattern generators

Nimet Korkmaz<sup>1,\*</sup>, İbrahim Ethem Saçu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kayseri Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Klinik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERKAM), 38039, Kayseri, Türkiye

#### Öz

Biyolojik yapıların fizyolojik karakteristiklerini ve bilgi transfer mekanizmalarını taklit ederek, hesaplamalı donanımlar geliştirilmesi konusunu ele alan araştırma alanı nöromorfik mühendisliktir. Merkezi desen üreticilerinin hesaplamalı donanımlarla taklit edilmesi de bu araştırma alanının konuları dâhilindedir. Bu çalışmada merkezi desen üretici dinamiklerinin taklidi için kullanılan osilatör modellerinden biri olan Rayleigh osilatörünün fraksiyonel tanımlaması üzerinde durulmuştur. Öncelikle sistemin kararlılık analizi yapılmış, ardından bu sistemin osilasyon sergileyebileceği en düşük fraksiyonel derece belirlenmiştir. En düşük fraksiyonel dereceden daha yüksek bir derece ile tanımlanan fraksiyonel sistemde ritmik osilasyon desenini gözlemlemek için sistemin nümerik simülasyonu yapılmıştır. Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün nümerik simülasyonu için Grünwald-Letnikov (G-L) fraksiyonel türev yöntemi kullanılmıştır. Ardından fraksiyonel Rayleigh osilatörünün ayrı donanım elemanları kullanılarak deneysel gerçekleştirimi yapılmıştır. Gerçekleştirim sürecinde Matsuda yaklaşıklık metodu ve FOSTER-I R-C ağ dönüşümünden yararlanılmıştır. Tasarlanan bu devre yapısının doğrulanması için SPICE devre simülasyon programı kullanılmıştır. Böylece fraksiyonel derece ile tanımlanan ve merkezi desen üreticilerinin ritmik desenlerinin elde edilmesinde sıklıkla kullanılan bir osilatör yapısının donanım gerçekleştirim sonuçları başarılı bir şekilde elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Rayleigh osilatörü, Fraksiyonel kapasitör, Devre sentezi, Matsuda yaklaşıklık yöntemi, FOSTER-I ağı.

#### 1 Giriş

Biyolojik yapıların fizyolojik karakteristiklerini ve bilgi transfer mekanizmalarını taklit ederek, hesaplamalı donanımlar geliştirilmesi konusunu ele alan araştırma alanı nöromorfik mühendisliktir. Merkezi desen üreticilerinin hesaplamalı donanımlarla taklit edilmesi de bu araştırma alanının konuları dâhilindedir. Merkezi desen üreticileri canlılardaki yürüme, yüzmeye, peristaltik hareket, kalp atışı gibi pek çok ritmik hareketin temelini oluşturmaktadır. Bahsi

#### Abstract

The research area that deals with the development of computational hardware is neuromorphic engineering by mimicking the physiological characteristics and the information transfer mechanisms of biological structures. The emulation of the central pattern generators with computational hardware is also within the scope of this research area. In this study, the fractional definition of the Rayleigh oscillator, which is one of the oscillator models used for emulation of the central pattern generator dynamics, is handled. First of all, the stability analysis of the system has been made and then, the lowest fractional order at which this system could oscillate is determined. The numerical simulation of this system is made in order to observe the rhythmic oscillation pattern in the fractional system that is defined by a higher fractional order than the lowest one. The Grünwald-Letnikov (G-L) fractional derivative method is used for the numerical simulation of the fractional Rayleigh oscillator. After that, the experimental implementation of the fractional Rayleigh oscillator is made by using the discrete hardware elements. It is utilized from the Matsuda approximation method and the FOSTER-I R-C network transformation in this implementation process. SPICE circuit simulation program is used to verify the functionality of this designed circuit structure. Therefore, the hardware realization results of a fractional-order oscillator structure, which is frequently used in obtaining the rhythmic patterns of the central pattern generators, have been obtained successfully.

**Keywords:** Rayleigh oscillator, Fractional capacitor, Circuit synthesis, Matsuda approximation method, FOSTER-I network.

geçen hareketlerin ritmik olarak üretilebilmesi için yüksek mertebeli kontrol merkezleri haricinde özelleşmiş ağ yapıları; merkezi desen üretici ağları olarak bilinmektedir. Bu ağ yapılarında bulunan nöronlar ile nöronlar arasındaki kuplajlama mekanizmalarının incelenmesi, karakteristiklerinin ortaya konması, matematiksel olarak modellenmesi, ilgili modellerden yararlanılarak sistemlerin elektronik donanımlarla taklit edilmesi nöromorfik merkezi

\* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: nimetkorkmaz@kayseri.edu.tr (N. Korkmaz)  
Geliş / Received: 21.12.2021 Kabul / Accepted: 27.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1039231

desen üreticileri alanında yapılan araştırma konularından bazılarıdır.

Canlı vücudunda harici bir geribesleme almaksızın üretilen ritmik merkezi desen üretici dinamikleri modellenirken; biyolojik anlamlılığa sahip biyofiziksel nöron modellerinden, ağ yapılarını modellemede etkin bir şekilde kullanılan nöral ağ yapılarından ve kendiliğinden üretilen ritmik işaretlerin temsil edilmesinin temeli olan osilatör modellerinden yararlanılmaktadır. Literatürde biyolojik anlamlılığı göz ardı edilerek osilasyon desenlerine odaklanılan çalışmaların bir kısmında; mutual inhibitör nöronlarla insansı kolları kontrol etme [1], çevirme kolunu döndürme [2], iki ayaklı yürüyüşü kontrol etme [3] gibi görevler için Hopf, Matsuoka, Van Der Pol ve Rayleigh gibi çeşitli osilatör modellerinden yararlanılmıştır [4-7].

Merkezi desen üreticilerinin ritmik desenlerinin taklidinde kullanılan osilatör modelleri genellikle diferansiyel denklem takımları ile tanımlanmaktadır. Osilatör modelleri tanımlanırken kullanılan yöntemin etkinliği sistem performansını da doğrudan etkilemektedir. Son yıllarda diferansiyel denklemlerin derecesini sadece tamsayılarla ifade etmek yerine, kesirli sayılarla ve hatta kompleks sayılarla da ifade edilebileceğini konu alan fraksiyonel hesaplama; klasik hesaplama yöntemlerine alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğrusal olmayan sistemlerin fraksiyonel olarak ifade edilmesi daha genel bir matematiksel tanımlama ortaya koymakta ve kontrol teorisi, mekanik, akustik gibi pek çok mühendislik probleminin çözümlerinde kullanılmaktadır [8-10].

Bu çalışmada merkezi desen üretici dinamiklerinin taklidi için kullanılan osilatör modellerinden biri olan İngiliz matematik ve fizikçi Lord Rayleigh tarafından müzik enstrümanlarının birleşimini tanımlamak için literatüre sunulan Rayleigh osilatörünün fraksiyonel tanımlaması üzerinde durulacaktır [11]. Öncelikle sistemin kararlılık analizi yapılmış, ardından bu sistemin osilasyon sergileyebileceği en düşük fraksiyonel derece belirlenmiştir. En düşük fraksiyonel dereceden daha yüksek bir derece ile tanımlanan fraksiyonel sistemde ritmik osilasyon desenini gözlemlemek için sistemin nümerik simülasyonu yapılmıştır. Fraksiyonel dereceli diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerinde tamsayı dereceli sistemlerin çözümleri için kullanılan yöntemlerden farklı analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Burada fraksiyonel Rayleigh osilatörünün nümerik simülasyonu için Grünwald-Letnikov (G-L) fraksiyonel türev yöntemi tercih edilmiştir.

Fraksiyonel dereceli sistemlerin çözümlerinde kullanılan nümerik analiz yöntemleri sistem yanıtlarının gözlemlenmesinde etkin bir şekilde kullanılmasına rağmen; bu yöntemlerin sistem analizlerinde geçmiş durum bilgilerine ihtiyaç duymaları nedeniyle elektronik donanım uygulamalarına aktarılması oldukça güçtür. İlgili yöntemlerin donanım gerçekleştirmeleri için her ne kadar farklı çözümler önerilse de [12, 13]; fraksiyonel dereceden tanımlı sistemlerin elektronik donanımlarla gerçekleştirmeleri için önerilen farklı yaklaşımlar, devre kurulum karmaşasının önüne geçme ve düşük donanım maliyeti sağlama gibi avantajları ile daha sık tercih edilmektedir [14, 15]. Fraksiyonel türev işlemini sınırlı bir

band aralığında karşılayacak şekilde bir yaklaşıklık fonksiyonu türetilmesine dayanan alternatif bir metot ile fraksiyonel dereceli sistemlerin donanım gerçekleştirmeleri yapılabilmektedir. Bu gerçekleştirmelerde, yaklaşıklık fonksiyonları R-C, R-L ya da R-L-C pasif devre elemanları kullanılarak donanımsal olarak taklit edilmektedir.

Bu çalışmada, fraksiyonel Rayleigh osilatörünün donanım gerçekleştirimi için; diferansiyel denklemlerin donanım gerçekleştirim çözümlerinde kullanılan integral alıcı devrelerde tamsayı dereceyi karşılayan kapasitörler yerine, fraksiyonel dereceyi karşılayan R-C elemanlarının kullanılması düşünülmektedir. Bu R-C elemanlarının değerinin belirlenmesi için öncelikle Matsuda yaklaşıklık metodu ile fraksiyonel Rayleigh osilatörünün fraksiyonel derecesine karşılık gelen dördüncü dereceden bir transfer fonksiyonunu elde edilmiştir. Ardından bu dördüncü dereceden yaklaşıklık fonksiyonu FOSTER-I R-C ağına dönüştürülmüştür. Böylece fraksiyonel Rayleigh osilatörünün donanım gerçekleştirimi için ayırık elemanlar ve işlemsel kuvvetlendiriciler kullanılarak tasarlanan devre yapısındaki integratör bloklarında kullanılması düşünülen R-C elemanlarının değerleri belirlenmiştir. Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün donanım gerçekleştirimi için tasarlanan bu devre yapısının doğrulaması SPICE devre simülasyon programı ile yapılmıştır. Böylece fraksiyonel derece ile tanımlanan ve merkezi desen üreticilerinin ritmik desenlerinin elde edilmesinde sıklıkla kullanılan bir osilatör yapısının donanım gerçekleştiriminin ortaya konması hedeflenmektedir. Ayrıca, Rayleigh osilatörünün fraksiyonel tanımlamasının donanım gerçekleştirimi sürecinde takip edilen aşamaların, fraksiyonel derece ile tanımlı farklı sistemlerin donanım gerçekleştirmeleri için de kullanılabilmesi sonucu da nümerik ve devre simülasyon sonuçları ile desteklenmektedir.

Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün tanıtılması, denge noktalarının belirlenmesi, kararlılık analizinin yapılması ve bu sistem için minimum fraksiyonel derecenin hesaplanması aşamaları Bölüm 2’de sunulacaktır. Sistemin G-L yöntemi ile yapılan nümerik simülasyon sonucu Bölüm 3’te verilirken, donanım gerçekleştirim sürecinde takip edilen adımlar Bölüm 4’te ele alınacaktır. Elde edilen sonuçlar son bölümde tartışılacaktır.

## 2 Fraksiyonel Rayleigh osilatörü

Osilatörler üzerine yapılan çalışmalar yüz yıl öncesi kadar eskiye dayanmaktadır. Bir insanın kalp atış ritmini modellemek için 1928 yılında önerilen Van Der Pol osilatörünün matematiksel tanımlamasına oldukça benzeyen [16]; fakat voltaj artışına karşılık frekans artış cevabı veren Van Der Pol osilatöründen farklı olarak, voltaj artışına karşılık genlik artışı cevabı veren Rayleigh osilatörü müzik enstrümanları modellenirken bir klarnetin osilasyonlarını simüle etmek için önerilmiştir. Rayleigh osilatörü fraksiyonel formda aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [7, 11]:

$$\begin{aligned} {}_0D_t^{q_1}x &= y \\ {}_0D_t^{q_2}y &= \zeta(1-ay^2)y - \Omega^2(x-x_0) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $\zeta$ ,  $q$  ve  $\Omega$  osilatörün kontrol parametreleridir ve bu parametrelerin değerleri bire eşit seçilmiştir. Diğer taraftan  $q_1$  ve  $q_2$  ( $0 < q_1, q_2 < 1$ ) ise fraksiyonel derecelerdir. İki adet diferansiyel denklem ile tanımlanan Rayleigh osilatörünün denge noktası, osilatörün durum değişkenlerinin sıfıra eşitlenerek çözülmesi ile  $E=(0,0)$  olarak hesaplanırken, Jacobian matrisi **Denklem (2)**'deki gibi hesaplanmıştır:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 1-3y^{*2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Doğrusal olmayan sistemlerin kararlılık analizleri yapılırken kullanılan Lyapunov üstellerini hesaplama yöntemleri gibi yöntemler, fraksiyonel dereceli sistemlerin kararlılık analizleri için kullanılamamaktadır. Bu analizlerin yerine Tavazoei ve Haeri tarafından doğrusal olmayan sistemin köklerinin hesaplanarak kararlılık durumunun belirlenmesini sağlayan bir metodun kullanımı daha yaygındır [17]. Bu metod kullanılarak fraksiyonel Rayleigh osilatörü için belirlenen denge noktasında özdeğerler  $\lambda_{1,2} = (0.5 \pm 0,866i)$  olarak hesaplanmıştır. Tavazoei ve Haeri tarafından önerilen kararlılık metoduna göre kararlılık şartı  $|\arg(\lambda_i)| > (\pi/2)$ 'dir. Buna göre, Rayleigh osilatörü için bu şartı sağlayan en düşük fraksiyonel derece " $q_{\min} > 0,667$ " olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında kullanılacak olan fraksiyonel derece en düşük dereceden daha büyük bir değer olan " $q_1=q_2=q=0,85$ " olarak seçilmiş ve nümerik simülasyonlar ile gerçekleştirim çalışmalarında bu değer kullanılmıştır.

### 3 Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün nümerik simülasyonu

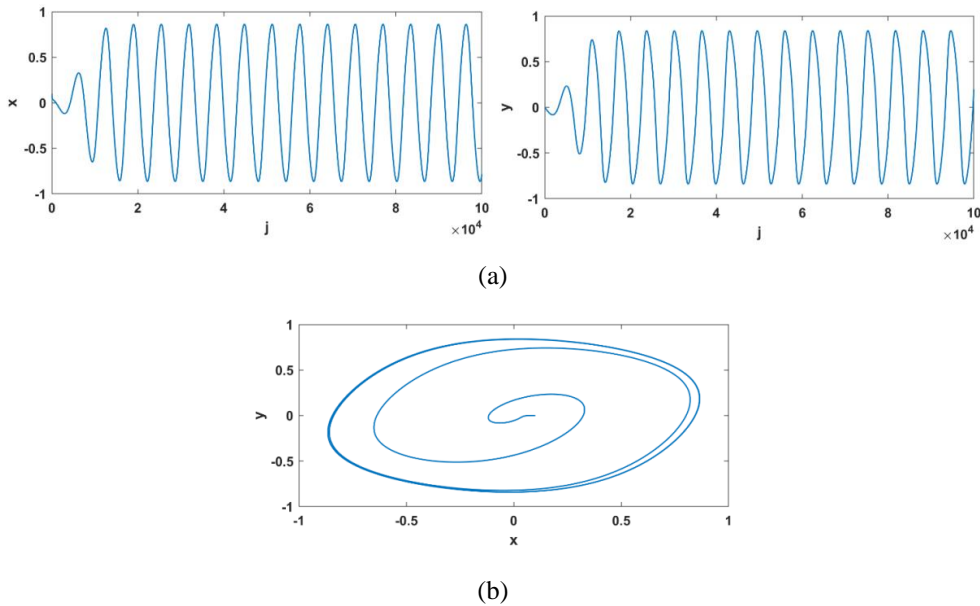
Caputo, Riemann-Liouville ve Grünwald-Letnikov (G-L) gibi farklı yöntemler fraksiyonel dereceden tanımlı sistemlerin nümerik çözümlerinde kullanılan yöntemlerden bazılarıdır [18]. Bu çalışmada fraksiyonel Rayleigh osilatörünün nümerik analizi için detayları aşağıdaki denklemde verilen G-L yöntemi kullanılmıştır:

$${}_{\alpha} D_{\tau}^q f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^q} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{\tau-\alpha}{h} \rceil} (-1)^j \binom{q}{j} f(t-jh) \quad (3)$$

Burada türev işlemlerinin sınırları  $\alpha$  ve  $\tau$  ile belirlenmiştir.  $h$  ise adım büyüklüğüdür. ' $\lceil \frac{\tau-\alpha}{h} \rceil$ ' işlemi sistemin tamsayı kısmını ifade ederken, bu tanımlamadaki binom ifadesinin açılımı aşağıdaki gibidir:

$$\binom{q}{j} = \frac{\Gamma(q+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(q-j+1)} \quad (4)$$

Burada  $\Gamma(q+1)$  Gamma fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün başlangıç koşulları  $[x(0)=0,1, y(0)=0]$  seçildikten sonra, **Denklem (3)**'te verilen G-L yöntemine ait parametre değerleri 'j' ve 'h' değerleri sırasıyla  $j=100000$  ve  $h=0,001$ 'e ayarlanarak yapılan nümerik simülasyon sonuçları **Şekil 1**'de verilmiştir. Sistemin durum değişkenlerine ait zaman domeni desenleri **Şekil 1a**'da sunulurken, dinamiklerin faz portresi gösterimi **Şekil 1b**'de verilmektedir.



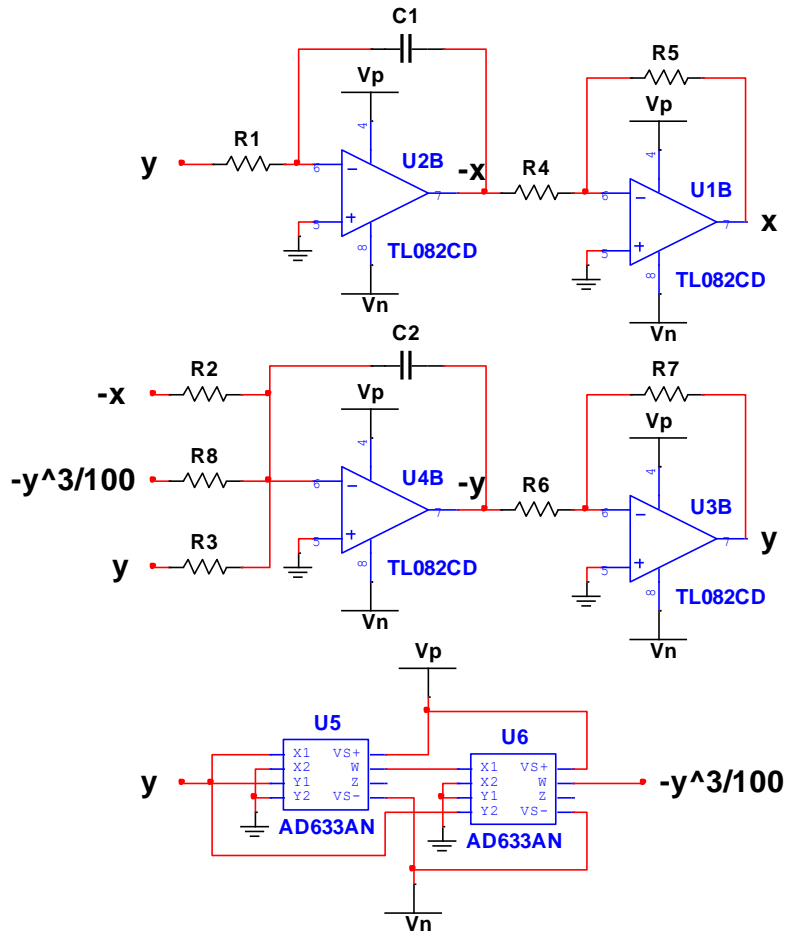
**Şekil 1.** Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün G-L yöntemi kullanılarak yapılan nümerik simülasyon sonucu, zaman domeni ve b) faz portresi.

a)

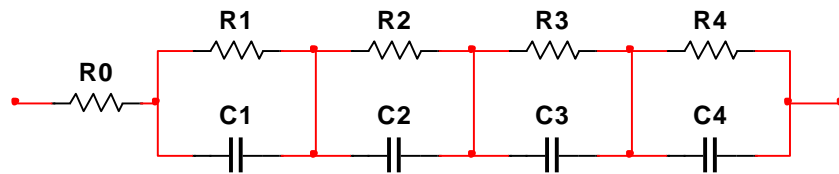
#### 4 Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün ayırık elemanlarla devre sentezi

Çalışmanın bu kısmında fraksiyonel Rayleigh osilatörünün ayırık elemanlar kullanılarak tasarlanan devre sentezi üzerinde durulacaktır. Bu devrenin tasarımında **Denklemler (1)**'deki sistemin "q=1" değerindeki tamsayı derecesinin elektronik gerçekleştirimi için **Şekil 2**'deki gibi bir devre tasarlanabilir. Bu devrede, modelde bulunan diferansiyel denklemlerin çözümü için işlemsel kuvvetlendiricilerin kullanıldığı integratör blokları kullanılmıştır. Bu integratör bloklarında giriş dirençleri ( $R_1=R_2=R_3=50k\Omega$ ,  $R_8=0,5k\Omega$ )

iken, geri besleme kısmında yer alan kapasitörlerin değerleri  $C_1=C_2=1nF$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca diğer dirençlerin değerleri ise  $R_4=R_5=R_6=R_7=10k\Omega$  şeklindedir. 'y' durum değişkenindeki üçüncü dereceden çarpım işlemi AD633 analog çarpım entegresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modeldeki toplama ve çıkarma işlemleri, toplayıcı ve fark alıcı devreler kullanılarak oluşturulmuştur. Burada, **Şekil 2**'de "q=1" değeri için nihai hali sunulan Rayleigh osilatör devresinin, fraksiyonel dereceli sistemlerin ayırık elemanlarla donanım gerçekleştirimlerinde kullanılacak alternatif bir konfigürasyon aşağıda açıklanan süreçler takip edilerek geliştirilmiştir.



Şekil 2. Rayleigh osilatörünün ayırık donanımlarla gerçekleştirim şeması.



Şekil 3. 'q=0.85' fraksiyonel dereceli ve  $1nF/s^{0.15}$  değerli fraksiyonel kapasitörün FOSTER-I R-C ağı yapısına uygun şekilde yapılan tasarım şeması.

Öncelikle, fraksiyonel türev işlemini sınırlı bir band aralığında karşılayacak şekilde bir yaklaşıklık fonksiyonu türetilmiştir. Yaklaşıklik fonksiyonları türetilirken; Matsuda, Carlson, Oustaloup ve Charef gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada detayları **Denklem (5)**'te verilen Matsuda yöntemi kullanılmıştır [19]:

$$s_q = d_0(2\pi f_0) + \frac{s - 2\pi f_0}{d_1(2\pi f_1) + \frac{s - 2\pi f_1}{d_2(2\pi f_2) + \frac{s - 2\pi f_2}{\dots}}} \quad (5)$$

$$d_0(2\pi f) = |(j2\pi f)^q|$$

$$d_{k+1}(2\pi f) = \frac{2\pi f - 2\pi f_k}{d_k(2\pi f) - d_k(2\pi f_k)} \quad k = 0, 1, \dots, N$$

**Denklem (5)**'te sıfırların ve kutupların yaklaşık toplam sayısı N derecesidir. Matsuda yöntemi ile 'q=0.85' fraksiyonel derecesini karşılamak için türetilen dördüncü dereceden yaklaşıklık fonksiyonu **Denklem (6)**'da verilmektedir.

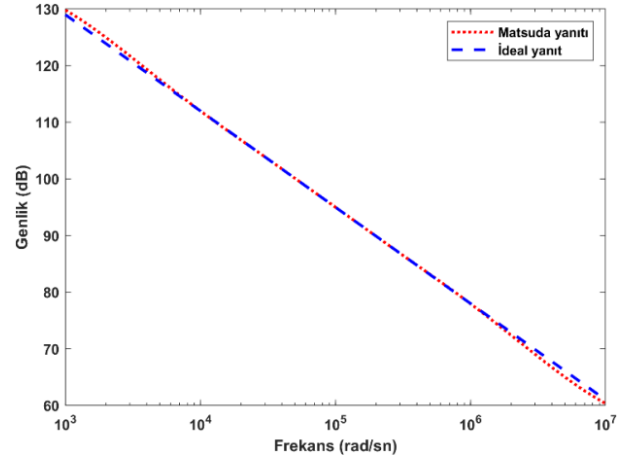
$$H(s)_{1n, Matsuda}^{0.85} = \frac{(a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0)}{(b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}$$

$$a_4 = 1, a_3 = 1.3987 \times 10^7, a_2 = 7.0983 \times 10^{12}, a_1 = 5.9205 \times 10^{17}, a_0 = 7.663 \times 10^{21} \quad (6)$$

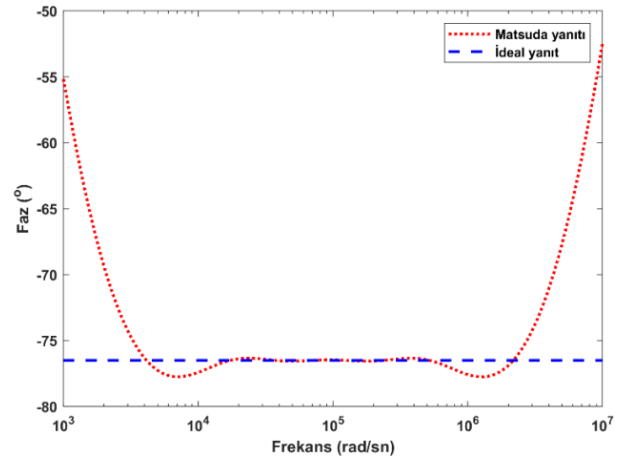
$$b_4 = 0.0016, b_3 = 1.1186 \times 10^3, b_2 = 1.207 \times 10^8, b_1 = 2.1406 \times 10^{12}, b_0 = 1.9773 \times 10^{15}$$

Fraksiyonel dereceyi karşılayacak yaklaşıklık fonksiyonunun türetilmesinin ardından, yaklaşıklık fonksiyonu pasif R ve C elemanlarının düzenli bir kombinasyonu ile donanımsal olarak gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, Rayleigh osilatörünün **Şekil 2**'deki devre tasarımı göz önünde bulundurularak, integratör bloğunda bulunan kapasitörün Laplace domenindeki empedans tanımlanmasında  $Z(s) = 1/s^q C_q$  şeklinde bir genelleştirme yapılmıştır. Bu genel ifade 'q=0.85' değeri yazıldığında Rayleigh osilatörünün fraksiyonel versiyonunun gerçekleştirimi başarılacaktır. Fraksiyonel kapasitör olarak nitelendirilebileceğimiz bu ifade **Denklem (6)** ile karşılanırken, **Denklem (6)**'daki dördüncü dereceden transfer fonksiyonu FOSTER-I RC ağ yapısı ile donanımsal olarak gerçekleştirilebilir [20]. Bu gerçekleştirim sonucu q=0.85 ve  $C_1=C_2=1nF$  değerleri göz önünde bulundurularak elde edilen R-C ağ yapısı **Şekil 3**'te görülmektedir. Bu dönüşüm sonrası **Şekil 3**'teki direnç ve kapasitörlerin değerleri şu şekilde hesaplanmıştır:  $R_0=621,63\Omega$ ,  $R_1=3,793K\Omega$ ,  $R_2=11,648K\Omega$ ,  $R_3=56,62K\Omega$ ,  $R_4=5.491M\Omega$ ,  $C_1=464,88pF$ ,  $C_2=808,21pF$ ,  $C_3=830, 85pF$  ve  $C_4=272,43pF$ .  $1nF/s^{0.15}$  değerli ideal bir fraksiyonel dereceli kapasitör ile **Denklem (6)**'daki ilgili fraksiyonel dereceyi karşılayan transfer

fonksiyonunun genlik ve faz yanıtları karşılaştırılırsa; **Şekil 4a**'dan da görülebileceği gibi bu yapıların genlik yanıtları oldukça yakındır. Bu iki yapının faz yanıtları ise **Şekil 4.b**'de verilmektedir. Buna göre, ideal fraksiyonel kapasitörde "faz açısı= $\pi q/2$ " ifadesini karşılayacak şekilde '-76,5' derecede iken; türetilen transfer fonksiyonu belirli frekanslar dışında bu değerden sapma eğilimi göstermektedir.



(a)



(b)

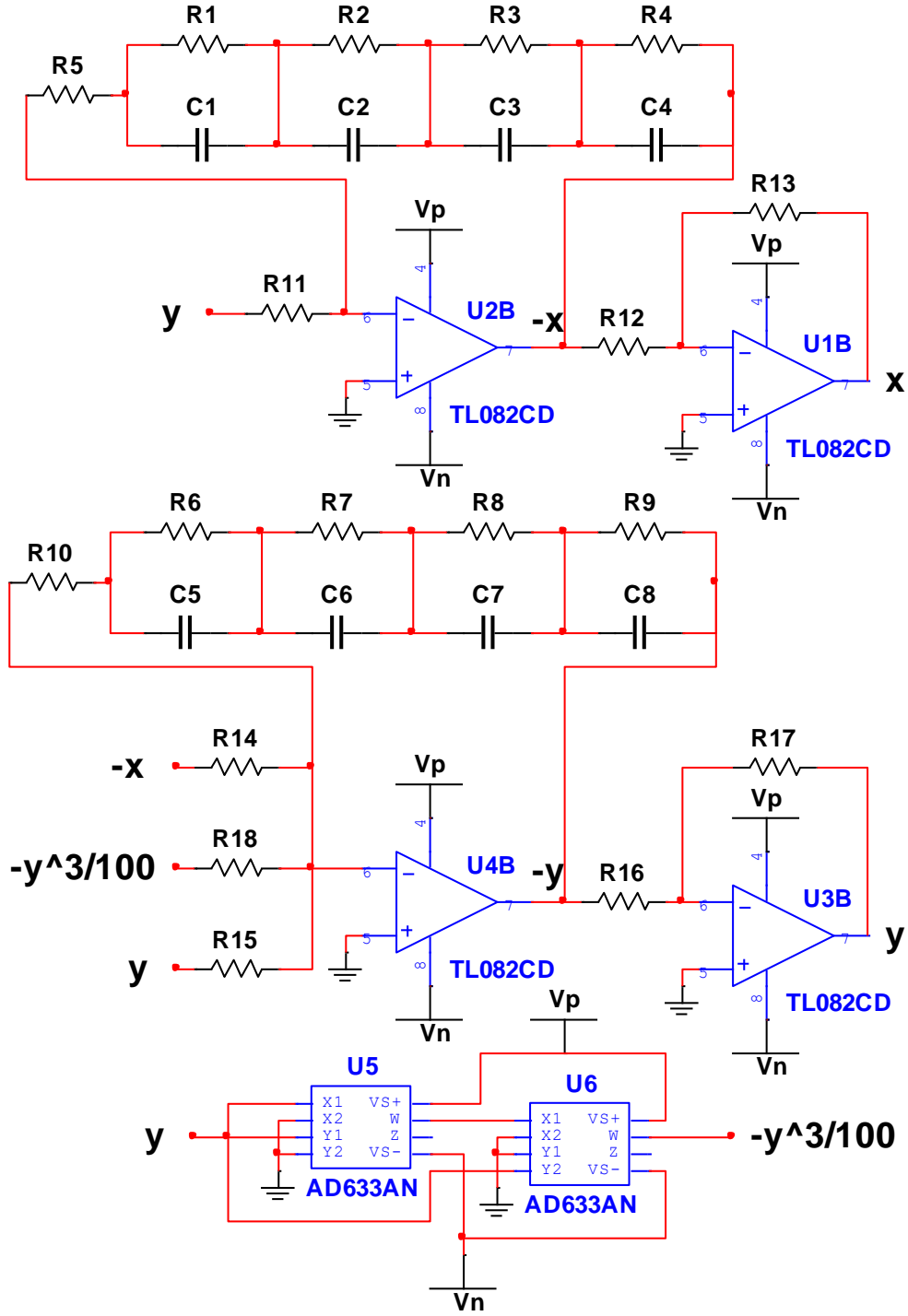
**Şekil 4.** Değeri  $1nF/s^{0.15}$  olan fraksiyonel dereceli ideal kapasitör ile yaklaşıklık fonksiyonunun a) genlik ve b) faz yanıtlarının karşılaştırılması.

Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün donanım gerçekleştirimi sürecindeki son aşamada, **Şekil 3**'teki R-C ağ yapısı **Şekil 2**'deki ayrık elemanlarla tasarlanmış devre yapısındaki integratör bloğunda bulunan kapasitör elemanlarının yerine **Şekil 5**'te görüldüğü gibi adapte edilmiştir. **Şekil 5**'te verilen ve q=0.85 değerli fraksiyonel Rayleigh osilatörü için tasarlanan devrenin gerçekleştirimine ait SPICE simülasyon sonucu **Şekil 6**'da sunulmaktadır.

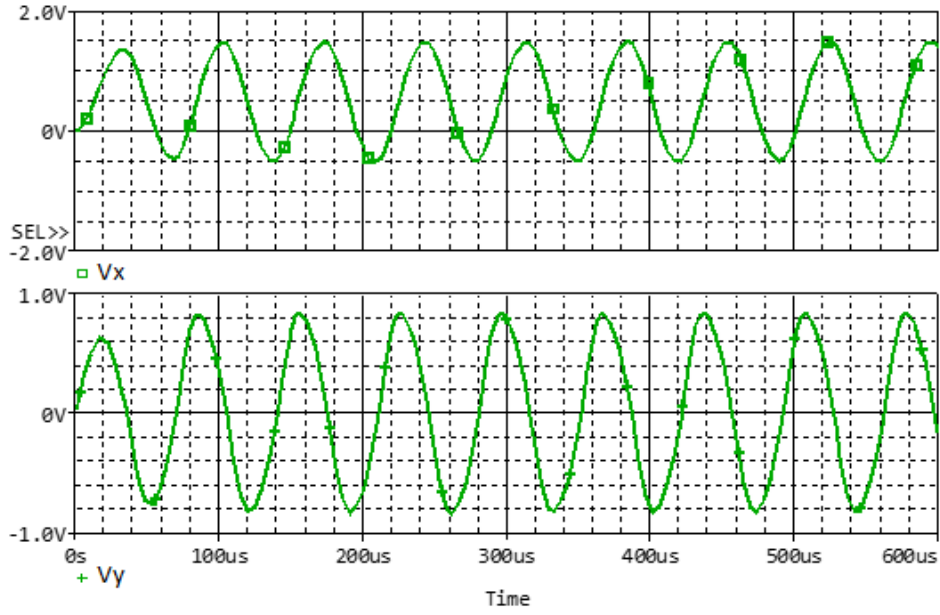
Sonuç olarak, **Şekil 6**'da verilen simülasyon sonuçlarından da görüleceği gibi; fraksiyonel dereceli sistemlerin ayrık

donanımlarla gerçekleştirmeleri için takip edilen süreçle, başarılı bir gerçekleştirim sonucu elde edilmiştir. Bu sebeple fraksiyonel dereceli sistemlerin donanım gerçekleştirimlerinde, genellikle programlanabilir cihazların kullanımı daha fazla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu

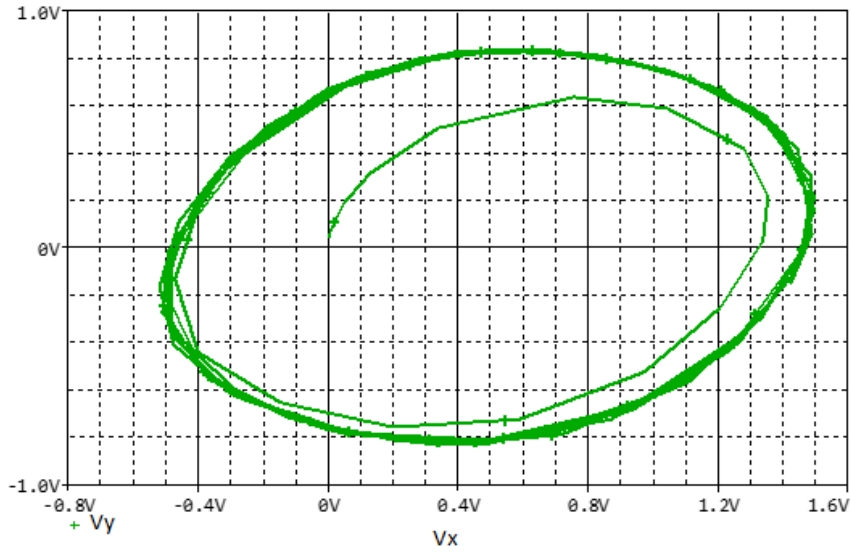
çalışmada takip edilen sürecin farklı prosedürlerle yapılan gerçekleştirim çalışmalarının çeşitli aşamaları için bir ön çalışma olduğu da görülmektedir.



Şekil 5. Fraksiyonel Rayleigh osilatörünün ayrı donanımlarla gerçekleştirim şeması.



(a)



(b)

**Şekil 6.** ‘ $q=0.85$ ’ fraksiyonel dereceli Rayleigh osilatörünün FOSTER-I R-C ağı kullanılarak yapılan devre sentezine ait SPICE simülasyon sonuçları, a) zaman domeni ve b) faz portresi.

## 5 Sonuçlar

Fraksiyonel Rayleigh osilatörü için FOSTER-I R-C ağ yapısı kullanılarak bir taklit devresinin tasarımının hedeflendiği bu çalışmada, fraksiyonel dereceli sistemler için ayırık donanımlarla yapılan gerçekleştirim çalışmalarında takip edilebilecek bir süreç ayrıntılı olarak işlenmiştir. Bu kapsamda öncelikle fraksiyonel Rayleigh osilatörünün kararlılık analizi yapılarak sistemin ritmik desenler üretebileceği en düşük fraksiyonel derecenin hesabı yapılmıştır. Ardından, en düşük fraksiyonel dereceden daha yüksek değerlerde seçilen ( $q=0,85$ ) bir fraksiyonel derecede sistem cevabının kontrolü için Grünwald–Letnikov yönteminden yararlanılarak nümerik simülasyon sonuçları

başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Belirlenen fraksiyonel dereceyi karşılayacak bir yaklaşıklık fonksiyonu Matsuda yöntemi kullanılarak türetilmiştir. Dördüncü dereceden türetilen bu yaklaşıklık fonksiyonu, FOSTER-I R-C ağ yapısı ile pasif elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Son olarak fraksiyonel dereceyi karşılayan bu R-C ağ yapısı, tamsayı dereceli Rayleigh osilatörü için tasarlanan devre yapısındaki integratör bloklarında bulunan kapasitörlerin yerine kullanılmıştır. Elde edilen devre yapısının etkinliği SPICE simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır. Böylece belirli bir fraksiyonel derecedeki bir sistemin ayırık elemanlarla gerçekleştirimi için takip edilebilecek bu süreç, başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

## Çıkar çatışması

Yazar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %13

## Kaynaklar

- [1] C.H. He, D. Tian, G.M. Moatimid, H.F. Salman, ve M.H. Zekry, Hybrid rayleigh–van der pol–duffing oscillator: Stability analysis and controller, *J. Low Freq. Noise. V. A.*, 14613484211026407, 2021. <https://doi.org/10.1177/14613484211026407>
- [2] P. Veskos, ve Y. Demiris, Experimental comparison of the van der Pol and Rayleigh nonlinear oscillators for a robotic swinging task. In proceedings of the AISB 2006 Conference, Adaptation in Artificial and Biological Systems, pp. 197-202, Bristol, 2006.
- [3] A.C. Filho, M.S. Dutra ve L.S. Raptopoulos, Modeling of a bipedal robot using mutually coupled Rayleigh oscillators, *Biol. Cybern.*, 92(1), 1–7, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00422-004-0531-1>
- [4] P.G. Drazin, *Nonlinear Systems*, (Cambridge Texts in Applied Mathematics), Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1992.
- [5] K. Matsuoka, Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators, *Biol. Cybern.*, 56: 345–353, 1987. <https://doi.org/10.1007 / BF00319514>
- [6] T. Zielinska, Coupled oscillators utilized as gait rhythm generators of a two-legged walking machine. *Biol. Cybern.*, 74(3): 263–273, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF00652227>
- [7] K. Maleknejad ve L. Torkzadeh, Application of hybrid functions for solving oscillator equations. *Rom. Journ. Phys.*, 60(1-2), 87-98, 2015.
- [8] I. Podlubny, Fractional-order systems and PI $\lambda$ D $\alpha$ -controllers, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 44(1), 208-214, 1999. <https://doi.org/10.1109/9.739144>
- [9] T.J. Freeborn, A Survey of Fractional-Order Circuit Models for Biology and Biomedicine, *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, 3(3), 416–424, 2013. <https://doi.org/10.1109/JETCAS.2013.2265797>
- [10] İ.E. Saçu ve M. Alci, Low-power OTA-C based tunable fractional order filters, *Electronic Components and Materials*, 48(3), 135-144, 2018.
- [11] M.J. Brennan, B. Tang, B. ve J.C. Carranza, Insight into the dynamic behavior of the Van der Pol/Raleigh oscillator using the internal stiffness and damping forces. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 744, No. 1, p. 012122). IOP Publishing, (2016, September).
- [12] A. Silva-Jua´rez, E. Tlelo-Cuautle, L.G. de la Fraga ve R. Li, FPAA-based implementation of fractional-order chaotic oscillators using first-order active filter blocks. *J. Adv. Res.* 25, 77–85 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.05.014>.
- [13] İ.E. Saçu ve N. Korkmaz, An effective method for the reduction of the device utilization amount in experimental realization of a fractional-order system. *Nonlinear Dyn.*, 108(3), 2369-2384, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07340-7>.
- [14] N. Korkmaz ve İ.E. Saçu, Fraksiyonel dereceli FitzHugh-Nagumo nöron modelinin devre sentezi için alternatif bir yaklaşım, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 248-254, 2022. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.09382>.
- [15] J. Yao, K. Wang, P. Huang, L. Chen ve T.J. Machado, Analysis and implementation of fractional-order chaotic system with standard components. *J. Adv. Res.* 25, 97–109 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.05.008>.
- [16] B. Van Der Pol ve J. Van Der Mark, LXXII. The heartbeat considered as a relaxation oscillation, and an electrical model of the heart. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 6(38), 763-775, 1928. <https://doi.org/10.1080/14786441108564652>.
- [17] M.S. Tavazoei ve M. Haeri, A note on the stability of fractional order systems, *Math. Comput. Simul.*, 79(5), 1566-1576, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.07.003>
- [18] I. Podlubny, *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*, Elsevier, 1998.
- [19] K. Matsuda ve H. Fujii, H (infinity) optimized wave-absorbing control-Analytical and experimental results, *J. Guid. Control. Dyn.*, 16(6), 1146-1153, 1993. <https://doi.org/10.2514/3.21139>
- [20] O. Elwy, S.H. Rashad, L.A. Said ve A.G. Radwan, Comparison between three approximation methods on oscillator circuits, *Microelectronics J.*, 81, 162-178, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2018.07.006>







# Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi

## Investigation of the parameters affecting the total efficiency of solar energy panels designed with half and full photovoltaic cells

Sevgi Duman<sup>1,\*</sup> , Mustafa Alçı<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri Türkiye

### Öz

Güneş enerjisi (GE), küresel çevre endişelerini azaltmak ve artan enerji talebini karşılamak için en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur. Güneş enerjisinden farklı şekillerde yararlanılmaktadır. Bunlardan biride fotovoltaik (PV) hücrelerdir. Fotovoltaik hücreler güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerdir. Geleneksel fotovoltaik modüller tam PV hücreler ile modellenmektedir. Günümüzde ise yeni bir teknoloji olan yarım hücreli modül kullanımı hızla artmaktadır. Yarım PV hücrelerin tam PV hücrelere göre çeşitli avantajları olmasına rağmen, bazı üretim dezavantajları da vardır. Bu çalışmada kapsamlı bir literatür incelemesi sonucu yarım ve tam hücreli PV modüllerin toplam verimliliğini etkileyen parametreler karşılaştırılarak yarım hücreli PV modüllerin, düşük güç kaybı, azaltılmış gölge duyarlılığı, fiyat performans oranının yüksek olması, daha az sıcak nokta etkisi ve iyileştirilmiş ısı dağılımı gibi tam hücrelere göre üstünlüklerinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak yarım ve tam PV hücrelerinin verimlilikleri, üretim süreçleri ve diğer bazı dezavantajları hakkında da bilgiler verilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Güneş enerjisi paneli (GEP), Fotovoltaik, Yarım PV hücre, Sıcak nokta etkisi

### Abstract

Solar power (SP) has been one of the most promising renewable energy sources to alleviate global environmental concerns and meet growing energy demand. Solar energy is used in different ways. One of them is photovoltaic (PV) cells. Photovoltaic cells are semiconductor materials that convert solar energy directly into electrical energy. Conventional photovoltaic modules are modeled with full PV cells. Today, the use of half-cell modules, which is a new technology, is increasing rapidly. Although half PV cells have several advantages over full PV cells, there are also some manufacturing disadvantages. In this study, as a result of a comprehensive literature review, the parameters affecting the total efficiency of half and full cell PV modules are compared. With this comparison, it is aimed to show the advantages of half-cell PV modules over full-cells, such as low power loss, reduced shade sensitivity, high price-performance ratio, less hot spot effect and improved heat dissipation. In addition to these, information is given about the efficiency, production processes and some other disadvantages of half and full PV cells.

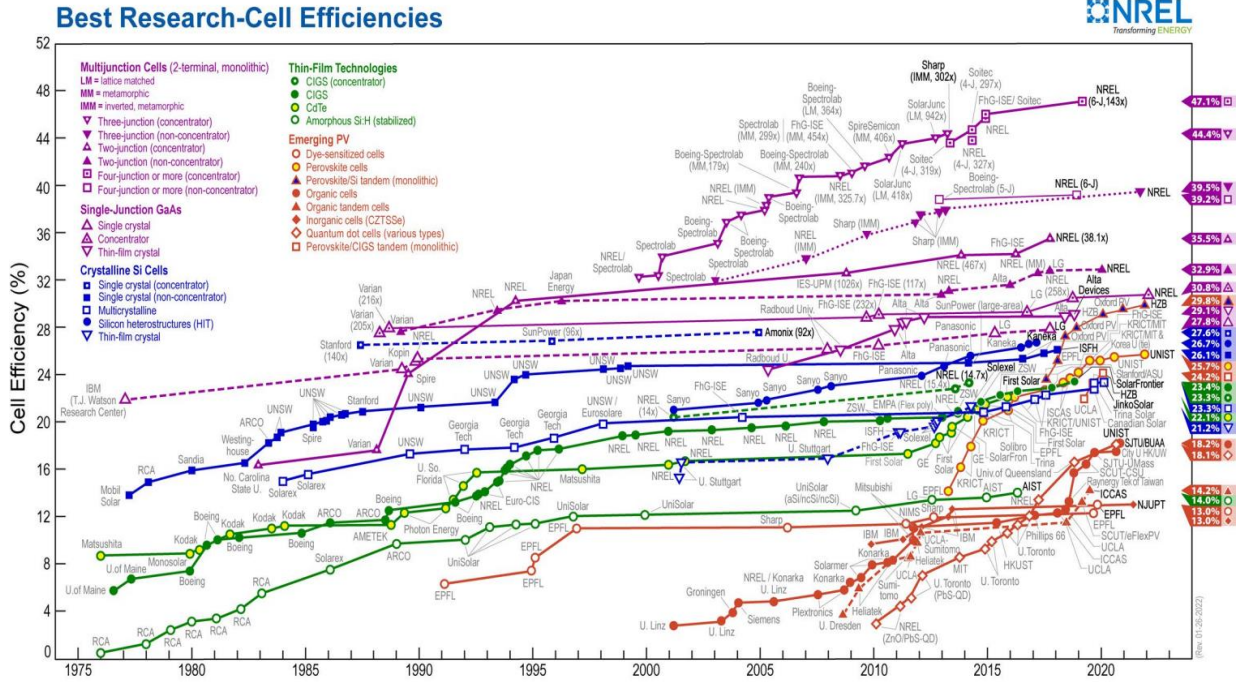
**Keywords:** Solar energy panel (SEP), Photovoltaic, Half PV cell, Hot spot effect

### 1 Giriş

Dünyada insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası ve toplumsal refahın sağlanmasındaki en önemli faktör olan enerjiye yönelik ihtiyaç sürekli artmaktadır. Fakat ne yazık ki günümüzde üretilen enerjinin %85'i fosil yakıtlardan (petrol, kömür, doğalgaz vb.) elde edilmektedir. Fosil yakıtların neden olduğu aşırı CO<sub>2</sub> salınımı ise dünyadaki canlı yaşamını tehdit eden küresel ısınma sorununun başlıca nedeni olarak gösterilmektedir. Bunun yanında, bu yakıtların rezervlerinin sınırlı olduğu ve dünyayı yeni enerji krizlerinin beklediği düşüncesiyle tüm dünyada temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgi ve araştırmalar her geçen gün hızla artmaktadır. Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemlerle güneşten elde edilen enerji, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir.

Fotovoltaik teknolojisindeki gelişmelerle hedeflenen en az maliyetle en fazla güç elde edebilmektir. Bu amaçla, araştırmacılar ilk güneş hücresinin ticarileştirildiği 1954 yılından bu yana çeşitli hücre teknolojileri geliştirmişlerdir [1]. Şekil 1'de bu güne kadar geliştirilen hücre teknolojilerinin verimliliklerini gösteren grafik verilmektedir. Görüldüğü gibi çok eklemli yoğunlaştırılmış güneş hücrelerinin günümüzde verimlilikleri %47'lere kadar ulaşmıştır. Fotovoltaik sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan silisyum tabanlı polikristal güneş hücrelerinin verimlilik değeri ise %22 civarındadır [2].

Standart fotovoltaik modüller genellikle 15.6 x 15.6 cm<sup>2</sup> lik boyutlara sahip tam PV hücreler ile modellenmektedir [3]. Tam hücreli güneş panellerindeki hücreden modüle (CTM) güç kaybı faktörleri ve uyumsuzluk kayıpları modülün çıkış gücü üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır [4].



Şekil 1. Farklı güneş hücresi teknolojilerine ait verimlilik çizelgesi [2]

Bu olumsuz etkileri minimize ederek PV modülün güç çıkışını iyileştirmek amacıyla çoklu bara çözümlerinden, akıllı kablo ve birleştirilmiş arka kontak (IBC) tasarımlarına kadar birçok yenilikçi hücre tasarımı geliştirilmiştir. Yenilikçi hücre tasarımlarının yanı sıra bara gölgenmelerini azaltmak ve modül verimliliğini arttırmak için yenilikçi ara bağlantı tasarımları da geliştirilmektedir. Bu tasarımlardan biri de 2014 yılında REC tarafından tanıtılan [5] ve günümüzde kullanımı hızla artan yarım hücreli PV modüllerdir.

Yarım hücreli PV modüllerin daha düşük direnç kaybı ve artırılmış optik kazançları nedeniyle hücreden modüle enerji verim kaybını azalttığı bildirilmektedir [6]. Bu modüllerin 2018'de %5 olan pazar payının 2028'de %40'a çıkması beklenmektedir [7]. Yarım hücreli PV modüller, standart modüllere göre bir dizi avantaj sağlamaktadır. Bu modüllerin, az ışık koşullarında dahi yüksek performans sunması, gölgenmelerden diğer standart tam hücreli modüllere göre daha az etkilenmesi, daha yüksek güç çıkışı sağlaması ve çalışma sıcaklık değerlerinin daha yüksek olması sonucu sıcak bölgelerde dahi yüksek verim ile enerji üretmeye devam etmesi gibi avantajları vardır [8]. Bu avantajlar, onların PV hücreler ile elektrik üretiminde tercih edilmesine ve araştırılmaya değer bir konu olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, GEP tasarımında kullanılan yarım ve tam PV hücreler toplam verimlilik değerleri açısından karşılaştırılmalı olarak incelenmektedir.

## 2 Yarım ve tam PV hücrelerde ribon dirençleri ve hücre akımlarının incelenmesi

Fotovoltaik panellerdeki komşu hücreleri birbirine bağlayan ribonlar (şerit) boyunca taşınan akım nedeniyle modüllerde direnç güç kayıpları oluşmaktadır. PV

modüllerdeki direnç güç kayıplarını azaltmak için birçok yenilikçi hücre ve ara bağlantı tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarımlardan biride standart tam boyutlu hücrelerin lazer ile baralara dik bir yönde ortadan ikiye kesilmesiyle üretilen yarım PV hücrelerdir. Güneş hücrelerinden üretilen akım, hücrenin alanıyla orantılıdır. Yarım PV panellerdeki her bir hücre standart paneldeki tam hücreye nazaran yarı boyutta olduğu için aynı voltajda akımın yarısını üretmektedir [9].

Silikon tabanlı tam PV hücrelerdeki toplam seri direnç ( $R_{s(tam)}$ ), ribonun seri direnci ( $R_r$ ) ve hücrenin seri direncinin ( $R_c$ ) toplamından oluşmaktadır [6]. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen çıkış gücünün en yüksek değere ulaşabilmesi için bu direnç değerinin mümkün olduğunca küçük olması istenmektedir. Bir güneş hücresinin seri direnci hücrenin alanıyla ters orantılı, ribon direnci ise ribonun uzunluğu ile doğru orantılı olduğundan, seri bağlı  $n$  tane kesik hücrenin seri direnci ve ribon direnci aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{c(kesik)} = nR_{c(tam)} \quad (1)$$

$$R_{r(kesik)} = \frac{1}{n} R_{r(tam)} \quad (2)$$

$n$  parçaya kesilmiş hücrenin toplam seri direnci ( $R_{s(kesik)}$ ), hücre ve ribonun seri dirençleri toplanarak bulunur;

$$R_{s(kesik)} = n[R_{c(kesik)} + R_{r(kesik)}]$$

$$= n[nR_{c(tam)} + \frac{1}{n} R_{r(tam)}] \quad (3)$$

Yukarıda verilen eşitliklerden yararlanarak iki parçaya kesilmiş ( $n=2$ ) yarım PV hücrenin toplam seri direnci ( $R_n$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_h = [2^2 R_{c(tam)} + R_{r(tam)}] \quad (4)$$

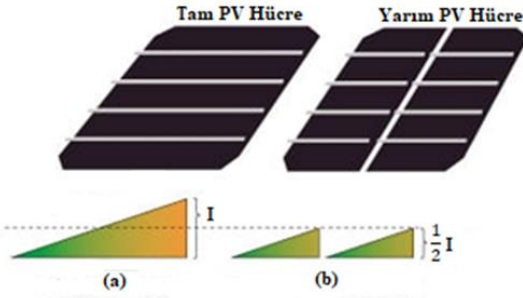
Şimdi de  $n$  parçaya kesilmiş hücrenin akım ( $I_c$ ) formülünü elde edelim. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen akım hücrenin alanıyla doğru orantılı olduğundan  $n$  parçaya kesilmiş hücrenin akımı tam boyutlu hücrenin akımının ( $I$ ),  $\frac{1}{n}$  katına eşittir.

$$I_c = \frac{1}{n} I \quad (5)$$

Denklem (5)' den hareketle iki parçaya kesilmiş ( $n=2$ ) yarım PV hücrenin akımı ( $I_h$ ) aşağıda verilen Denklem (6) ile hesaplanır. Şekil 2' de tam ve yarım PV hücrelerin akımları gösterilmektedir.

$$I_h = \frac{1}{2} I \quad (6)$$

Görüldüğü gibi yarım hücrelerden elde edilen akım tam hücrelere göre yarı yarıya azalmaktadır [10]. Bu da, dört kat daha düşük omik kayıplara ve daha iyi bir doldurma faktörüne yol açmaktadır [11,12,13].



Şekil 2. Fotovoltaik hücrelerin akımları. (a) Tam PV hücrenin, (b) Yarım PV hücrenin

### 3 Yarım ve tam PV hücrelerin güç kayıplarının incelenmesi

Genellikle optik ve elektriksel kayıplar şeklinde karşımıza çıkan CTM kayıpları fotovoltaik modül üreticileri için sorunlu bir konu olmuştur [14]. Optik kayıplar iç gölgeleme, kaplama camı ve kapsül elemanlarındaki yansımaya ve emilim vb. nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Elektriksel kayıplar ise fotovoltaik modüllerdeki komşu hücreleri birbirine bağlayan ribonlar boyunca taşınan akım nedeniyle oluşan direnç güç kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar modülün çıkış gücünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Geçmişte ribonlardan kaynaklanan direnç kayıplarının azaltılmasına yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. Van Dyk ve Meyer [15] parazitik seri ve şönt dirençlerin PV modül performansı üzerindeki etkisini tartışmıştır. Caballero vd. [16] ön metal ızgara yapısını optimize etmek için PV modüllerin seri direnç modellemesini gerçekleştirmiştir. Kumar vd. [17] bakır şeridin kalınlığının artırılmasının ve hücreden hücreye boşluğun azaltılmasının direnç güç kaybını azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermiştir.

Öte yandan, modüllerin yansımaya önleyici katmanlarının optimize edilmesi, bir arka levha reflektörü kullanılarak çıkış gücünün iyileştirilmesi gibi optik kayıpların olumsuz etkilerinin minimize edilmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır [17, 18].

Tüm bu çalışmalara ek olarak son birkaç yıldır güneş modülleri için yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin, hücreden modüle kayıpları azalttığı bildirilmektedir [19, 20, 21]. Bu teknoloji direnç kayıplarına neden olan akımı yarıya indirmektedir. Ayrıca yarım hücreli modüllerdeki ek hücre boşlukları ışık toplanmasını iyileştirerek optik kazancın artmasını sağlamaktadır [22, 23]. Mittag vd. [24] tarafından elen alınan çalışmada, yarım hücre kullanan bir PV modül için %3.6'ya varan güç kazancı ve %0.5'lik verimlilik artışı hesaplanmıştır

Yarım PV hücreler kullanılarak yapılan deneysel bir çalışmada direnç ve optik faydalarının birleşiminin hücreden modüle güç kazancını %4.7 arttırdığı gösterilmiştir [25]. Ayrıca hücrelerin direnç kaybının hücrenin kısa devre akım yoğunluğuna bağlı olması nedeniyle farklı kısa devre akım yoğunluğuna sahip hücreleri yarıya kesmenin faydası da farklı olacaktır. Özellikle günümüzde kısa devre akım yoğunluğu fazla olan yüksek teknoloji panellerde (Perc, 5 bb, 9 bb) yarım hücre teknolojisi kullanmanın faydası büyük olacaktır. Aşağıda verilen denklemlerde tam ve yarım PV hücrelerin güç kayıpları formülize edilmiştir.

Güneş hücrelerindeki direnç güç kaybı ( $P_{kayıp}$ ), akımın karesinin toplam seri dirençle çarpımı olduğundan,  $n$  parçaya kesilmiş hücre için aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$P_{kayıp(tam)} = I^2 [R_{c(tam)} + R_{r(tam)}] \\ P_{kayıp(kesik)} = I^2 [R_{c(tam)} + (\frac{1}{n^2}) R_{r(tam)}] \quad (7)$$

Görüldüğü gibi, kesik hücreli modüller için hücre direnç ( $R_c$ ) kaybında herhangi bir değişimin olmadığı ve güç kaybındaki azalmanın azaltılmış ribon direnci ( $R_r$ ) kaybindan kaynaklandığı gözlemlenmektedir. Böylece, ribon üzerindeki nispi güç kaybı düşüşü ( $P_{R_r}$ ) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [6]. Burada  $P_{R_r}$  değerinin olabildiğince düşük olması istenmektedir.

$$P_{R_r} = \frac{P_{ribon\ kayıp\ (tam)} - P_{ribon\ kayıp\ (kesik)}}{P_{ribon\ kayıp\ (tam)}} \\ = 1 - \frac{1}{n^2} \quad (8)$$

Denklem (7),  $n$  parçaya kesilmiş hücre için ribondaki güç kaybının  $\frac{1}{n^2}$  faktörü ile ölçüldüğünü göstermektedir. Böylece yarım hücreli PV modül için ribon direncinin güç kaybına katkısı  $\frac{1}{4}$  olarak belirlenmektedir. Yani ribon direncinden kaynaklanan güç kaybında %75 azalma olmaktadır.

Denklem (7), bir hücre daha fazla parçaya bölünürse ribon üzerindeki güç kaybının daha da azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak Denklem (8)'de görüldüğü gibi  $n$  büyüdükçe güç kaybı düşüşü artmaktadır. Dolayısıyla güç kaybı düşüşünün faydası azalmaktadır. Bunun sebebi

hücreden elde edilen çıkış gücünün hücre alanıyla orantılı olmasıdır [26]. Ayrıca kesilmiş hücre sayısının fazla olması hücreleri birbirine bağlayan ribon maliyetini arttırmakta ve hücreler arası uyumsuzluk sorunlarına sebep olmaktadır.

Ribon direncinin azalmasının yanı sıra ribon yapılarının optimize edilmesi de modül verimliliğini arttıran faktörler arasında yer almaktadır. Tam hücreli standart PV modüller referans alınarak, farklı ışınım seviyelerinde yarım hücreli PV modüllerdeki ribon yapısı ve ribon genişliğinin optimize edilmesi ile enerji verimliliğinde %1.52 ila %4.97'lik ekstra artışlar meydana geldiği saptanmıştır [27]. Çalışma [25] ile, farklı ribon yapılarının tam ve yarım hücreli PV modüllerin çıkış gücü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda üçgen ribonlu yarım hücreli modülün çıkış gücünün dikdörtgen ribonlu tam hücreli modüle göre %4.74 lük bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir

#### 4 Yarım ve tam PV hücrelerde gölge etkisinin karşılaştırılması

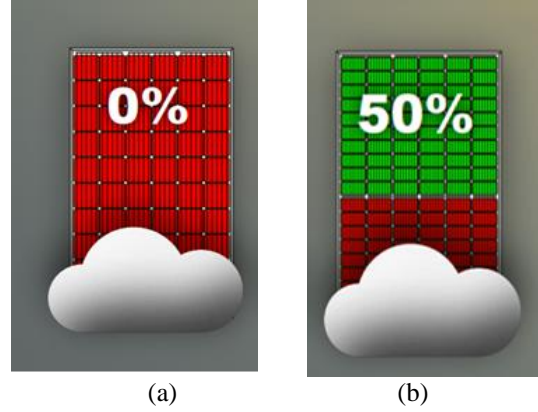
Fotovoltaik panellerin enerji verimi, modül sıcaklığının artmasının yanında en çok tam ve kısmi gölgelenmeden etkilenmektedir. Tam gölgeleme yalnızca enerji verimini azaltırken, kısmi gölgeleme ayrıca modüllerin bozulmasını hızlandırabilir ve erken arızalara yol açabilir. Açık ve geniş alanlara kurulan PV sistemlerde gölgelenme koşulları genellikle sorunlu değildir. Çünkü kendi kendine gölgelenme PV panellerin doğru konumlandırılmasıyla hafifletilebilmektedir [28, 29]. Ancak yerleşim alanlarındaki baca, çatı pencereleri, antenler veya ağaç gibi komşu nesnelerin oluşturduğu kısmi gölgelenmeler önlenemez ve bu gölgelenmeler PV panellerin performansını olumsuz etkilemektedir. PV modül performansı üzerine olumsuz etkileri olan bu gölgelenme davranışını minimize eden bazı alternatif panel teknolojileri sunulmuştur. Bu teknolojilerden bir tanesi yarım hücreli PV panellerdir.

Yarım hücreli PV paneller gölge etkilerine karşı geleneksel tam hücreli PV panellerden daha avantajlıdır. Bunun nedeni bir paneldeki yarım PV hücreleri bağlamak için kullanılan kablolama yöntemidir. Tam hücrelerle kurulmuş geleneksel güneş panellerindeki hücreler, seri kablolama olarak bilinen sıralar halinde birbirine bağlanmaktadır [30]. Geleneksel tam hücreli PV panellerde üç ayrı dizi yer alır ve her bir dizideki hücreler birbirine seri bağlıdır. Bu sebeple herhangi bir dizi içerisindeki tek bir hücrenin gölgelenmesi o dizinin tüm gücünün sıfırlanması demektir. Bu kayba modül bazında bakılacak olursa, modülün toplam gücünün bu üç diziden sağlandığı düşünüldüğünde dizilerden biri güç üretmediği durumda modülden elde edilen gücün üçte biri kaybolacaktır.

Yarım hücreli PV paneller, standart tam hücreli PV panellerle karşılaştırıldığında iki kat hücreye sahiptir. Bu sebeple panel içerisindeki hücre dizilerinin sayısı da iki katına çıkmaktadır. Yarım hücreli PV paneller alt yarım ve üst yarım olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu yarım bir birbirine paralel bağlıdır. Bu tür bir bağlantı şeması, yarım hücreli PV panellerde tek bir hücrenin gölgelenmesi durumunda daha az güç kaybına neden olacaktır (toplam

güç çıkışının yalnızca altıda biri). Çünkü gölgeli bir hücrenin voltajı akımına göre daha az etkilenmektedir.

Yukarıda tam ve yarım hücreli PV paneller için anlatılan gölgelenme davranışı, Şekil 3'de gösterilmektedir. Yarım hücreli PV paneller kısmi gölgelenme sırasında eğer dikey olarak konumlandırılmış ise tam hücreli panellere göre %50 güç tasarrufu sağlayabilmektedir [31, 32]. Bunun nedeni yarım hücreli PV panellerin hücre dizilerinin kısa olması ve aynı zamanda alt ve üst yarımalarının paralel bağlantısıdır. Şekil 3'de verilen panelin dikey olarak konumlandırıldığına dikkat edilmelidir.



Şekil 3. PV panellerin gölgeleme davranışı. (a) Tam hücreli, (b) Yarım hücreli

#### 5 Yarım ve tam PV hücrelerde sıcak nokta etkisi ve iyileştirilmiş ısı dağılımı

Fotovoltaik güneş panelleri birbirine seri bağlandığında hücrelerden herhangi birinin ürettiği akım, diğer hücrelerin ürettiği akımdan daha düşük ise panel yük durumuna geçip ters gerilim oluşturarak güç üretmek yerine güç tüketerek hücrenin ısınmasına sebep olmaktadır. Bu durum sıcak nokta etkisi olarak adlandırılmaktadır. Dolu gibi doğa olayları ya da av mevsiminde saha dışından gelen yorgun bir kurşun darbesi gibi faktörler sonucunda PV modüllerde oluşan çatlak ya da kırıklar çevresel gerilim yaratır. Bu durum güneş hücrelerinin üzerindeki güç dağılımının dengesiz olmasına, bazı bölgelerde aşırı ısınmalara ve sıcak noktaları oluşmasına sebep olmaktadır [33]. Öte yandan hücreler gölgelendiğinde PV sistemde sıcak noktalar meydana gelebilir ki bu, diğer hücrelerin gölgeli hücreyi ters kutuplandırabilecek daha yüksek bir voltaj üretmesine neden olmaktadır. Gölgeli olmayan hücrelerden gelen güç daha sonra gölgeli hücrede dağılır ve hücrenin aşırı ısınmasına neden olur. Bu ısı modül üzerindeki hücrelerin çatlamasına, lehim erimesine ve kapsüllemenin bozulmasına neden olmaktadır [34, 35].

Sıcak nokta etkisi altında kalan hücrenin sıcaklığının 150 °C'nin üzerine çıkması durumunda hücre tamamen bozulabilir. Bu etki, fotovoltaik panellerin çalışma verimini olumsuz yönde etkileyerek modüle ciddi zarar verebilmekte ve modüllerin yanmasına dahi sebep olabilmektedir. Günümüzde hücreleri sıcak nokta etkisine karşı korumak için köprüleme diyotları yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak hala sıcak noktalar PV paneller için önemli arıza modları arasında yer almaktadır.

Fotovoltaik alanında yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin düşük akım nedeniyle sıcak noktalara karşı daha az duyarlı olduğu bildirilmektedir [36]. Gölge koşullar altında yarım ve tam boyutlu iki modülün hücre sıcaklıklarını karşılaştırmalı olarak inceleyen bir çalışmada, gölge yarım hücre modülünün maksimum hot spot sıcaklığının, tam hücre modülünden 28 °C daha düşük olduğu görülmüştür [37]. Başka bir çalışmada ise aynı gölgeleme koşulları altında, paralel bağlı hücre alt dizilerinden oluşan yarım hücreli modüllerin sıcak nokta etkisi tam hücre modülleri ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve yarım hücreli modüldeki gölge hücrenin tepe sıcaklığının tam hücreli modüldekinden 19 °C düşük olduğu gözlemlenmiştir [38]. Yarım PV panellerdeki her bir hücre, standart paneldeki tam hücreye nazaran yarı boyutta olduğu için aynı voltajda akımın yarısını üretir. Bu sonuçtan hareketle yarım hücreli modül tasarımının kristal silikon fotovoltaik modüllerdeki sıcak nokta bozulmalarını azaltabileceği saptanmıştır.

## 6 Yarım ve tam PV hücrelerin ışıma verimliliklerinin karşılaştırılması

Bir güneş hücresinin verimi üzerine düşen ışımının ne kadarını elektrik enerjisine dönüştürdüğü ile ilgilidir. Bu durum [Denklem 9](#) ile gösterilmektedir. Fotovoltaik sistemlerde hücre ve panel verimlilikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Örneğin tek kristal silikon bir hücrenin verimi %24 iken, aynı hücreden oluşan panelin verimi %13-17 olabilmektedir. Bunun nedeni PV modüllerdeki CTM kayıplarıdır.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_{hücre}}{I_{ışınım} * A_{hücre}} \quad (9)$$

$P_{hücre}$ : hücreden elde edilen çıkış gücü  
 $A_{hücre}$ : hücrenin alanı

Araştırmacılar ilk güneş hücresi üretildikten bu yana hücre verimini arttırmak için teknoloji geliştirmektedir. PV modüllerin çıkış gücünü ve verimliliği arttırmak için hem hücre dönüşüm verimliliklerinde hem de hücre modül oranında iyileşmeler yapılabilmektedir [39].

Yarım hücreli PV modüller azaltılmış elektriksel kayıpları ve arttırılmış optik kazançları sayesinde tam hücreli modüllere göre daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Ayrıca bu modüller daha yüksek güce sahip güneş hücreleri kullanmadan panelin çıkış gücünü arttırabilmektedir. Yarım hücreli PV modüllerin verimlilik değerleri %19.76'lara ulaşmaktadır. [Tablo 1](#)'de aynı modül boyutuna, aynı aktif alana ve farklı hücre mesafelerine sahip aynı malzemenin yapılmış 60 tam ve 120 yarım hücreli PV modüllerden elde edilen çıkış gücü ve panellerin verimlilik değerleri verilmektedir. Tablodan hareketle yarım hücreli PV modülün tam hücreli modüle göre çıkış gücünde 8 W'lık ve verim değerinde ise %0.5'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu iyileşme, azaltılmış elektriksel kayıplar ve hücre mesafelerinden kaynaklanmaktadır [40]. Elde edilen bu verim değeri farklı hücre teknolojileri, ışınım, sıcaklık vb. gibi verimi etkileyen faktörlere göre artış gösterebilmektedir.

**Tablo 1.** Yarım ve tam hücreli modüllerin verimlilik değerleri [32]

	Tam PV Hücre	Yarım PV Hücre	
Güç (W)	305	313	+8 W
CTM gücü (%)	98.1	100.7	+%2.6
Verimlilik	18.25	18.73	+%0.5

Yukarıda verilen bilgilerden hareketle yarım hücreli PV modüller, tam hücreli PV modüllerle karşılaştırıldıklarında verimliliklerinin yüksek ve güç kayıplarının az olması nedeniyle metrekare başına daha fazla güç sağlamaktadır. Böylece bu paneller, tam hücreli PV panellerle aynı gücü üretmek için daha az panele ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda yarım hücreli PV panellerin özellikle sistemin amortisman süresinin düşürülmeye çalışıldığı son yıllarda kullanıcılar tarafından tercih edilmesi ve enerji yatırımcılarının beklentisi olan daha kısa geri dönüş sürelerinin karşılanmasına yardımcı olması beklenmektedir.

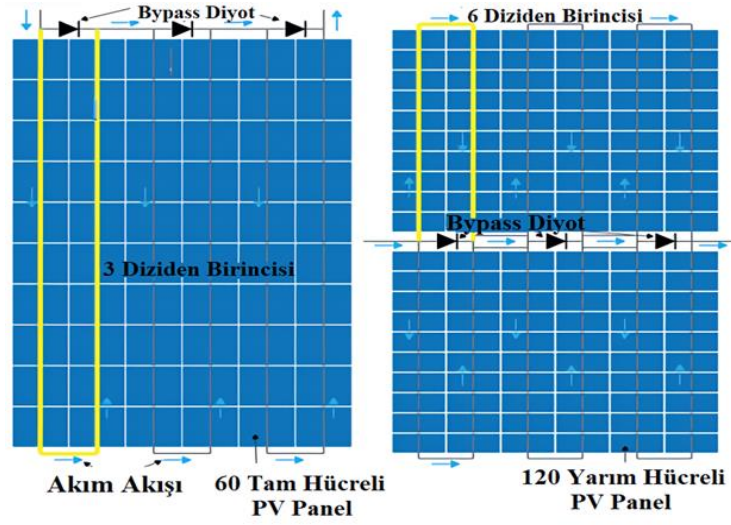
## 7 Yarım ve tam PV hücrelerin üretim süreçlerinin incelenmesi

Yarıya bölünmüş ve tam boyutlu PV hücreler için üretim süreci farklılık göstermektedir. Geleneksel fotovoltaik paneller tam PV hücreler ile modellenmektedir. Bu paneller genelde 60 ya da 72 adet tam hücrenin seri bağlanmasıyla oluşmaktadır. Ayrıca geleneksel paneller üç adet hücre dizisi içermekte ve her dizi panelin tek bir tarafında yer alan köprüleme diyotuna bağlanmaktadır.

Yarım PV hücreler, modülün görsel görünümünü açıkça değiştirmekte ve yeni bir modül tasarımı gerektirmektedir. Yarım PV hücreler kullanılarak oluşturulan güneş panelleri, yarım hücreli (half cell) veya yarı kesilmiş hücreli (half-cut cell) paneller olarak adlandırılmaktadır. Bu panellerin üretiminde silikon plaka tabanlı poli ve mono hücreler kullanılmaktadır.

Yarım PV hücreler, adından da anlaşılacağı gibi genel güç kayıplarını azaltmak ve daha iyi verimlilik sağlamak için silikon plaka tabanlı tam boyutlu bir hücrenin lazer aracılığıyla ortadan iki parçaya kesilmesi sonucu elde edilmektedir. Yarım hücreli PV paneller, tam hücreli panellerle karşılaştırıldığında iki kat hücreye sahiptir. Bu sebeple panel içerisindeki hücre dizilerinin sayısı da iki katına çıkmaktadır. Yarım hücreli PV paneller alt yarım ve üst yarım olmak üzere iki kısımdan oluşur ve bu yarımlar birbirine paralel bağlıdır. Ayrıca, paneli istenmeyen etkilere karşı koruyan köprüleme diyotu tam hücreli standart bir PV paneldeki gibi panelin tek bir tarafında değil orta kısımda yer almaktadır. Bu durum [Şekil 4](#)'te gösterilmektedir.

Yarım PV hücrelerde kesme işlemi yapılırken dikkat edilmesi gereken konulardan biri, hücrenin yatay ya da dikey olarak kesilmesidir. Hücrelerdeki bara sayısı önemlidir. Bu yüzden kesme işlemi baralara dik bir şekilde yapılmalıdır. Böylece hücrelerdeki bara sayısı etkilenmeden kalacaktır. Ayrıca hücre üretim sürecini standart üretimle uyumlu tutmak için kesme işlemi genellikle hücre üretiminin tamamlanmasından sonra gerçekleştirilir [41].



Şekil 4. GE modül konfigürasyonu

Öte yandan, yarım hücre tasarımı hücrenin verimliliğini ve dayanıklılığını artırmak için; artan bara sayısı, ayrılmış bağlantı kutusu ve hücre pasivasyon teknolojisi vb. gibi bir dizi başka teknikle de desteklenmektedir. Güneş hücreleri bara adı verilen ince şeritler ile metalize edilir. Bara, güneş hücrelerini birbirine bağlamak ve hücrelerde üretilen akımı iletmek için kullanılmaktadır [42]. Hücrelerde kullanılan bara sayısının artmasıyla elektronların ribona ulaşmak için kat etmesi gereken mesafe azalmaktadır. Bu da akım akışını ve panelin güvenilirliğini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Ek olarak mesafedeki azalma iç direnci de düşürmektedir. Bu da akımı arttırmakta ve baraların genişliğinin azaltılmasına izin vererek, artan akım üretimi için daha fazla hücre alanını ışığa maruz bırakmaktadır.

Artan bara sayısı ile birlikte hücre direncindeki azalma, hücre verimliliğini hücre başına %0.2'nin üzerinde artırarak panel çıkışına 2 Wp'den daha fazla bir artış sağlayabilmektedir [43]. Beş veya daha fazla baraya sahip paneller, REC tarafından gerçekleştirilen, özellikle termal döngü ve mekanik yük testlerinde yapılan sağlamlık testleri sırasında dayanıklılıkta önemli gelişmeler göstermiştir. Bu durum, daha küçük boyutun izin verdiği daha düşük ribon kesitine atfedilmekte ve hücre üzerindeki mekanik stres miktarını azaltmaktadır.

Yarım hücreli PV modüllerde ayırt edici faktörlerden biride, her biri bir adet köprüleme diyotu barındıran ayrılmış üç bağlantı kutusunun kullanılmasıdır. Bu tasarım, tam hücreli standart panellerdekine kıyasla daha az metalizasyona yol açmakta ve direnç kayıpları sonucu güneş hücresinde meydana gelen ısıyı daha iyi bir şekilde dağıtmaktadır. Ayrıca yarım hücrelerin içerisinde yer alan ekstra boşluklar arka tabakadan hücre yüzeyine yansıyan ışık miktarını arttırmaktadır [44, 45].

Yarım hücreler, PV modülün panel dayanıklılığını artırarak daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu hücreler tam hücrelere göre boyut olarak daha küçüktür. Daha küçük hücreler daha az mekanik strese maruz kalmaktadır. Buda onları kırılmalara karşı fiziksel olarak daha dirençli yapmaktadır.

Schneider vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yarım ve tam hücrelerin arka tarafındaki kırılma gerilmelerinin birbirinden önemli ölçüde farklılık gösterdiği, yarım hücrelerin kırılma gerilmelerinin ortalama olarak 200 MPa'dan 150 MPa'ya düştüğü gösterilmiştir [3]. Daha küçük hücreler sayesinde günlük ısınma ve soğumaların sebep olduğu hücrelerdeki genişleme ve daralma miktarları da azaltılmaktadır. Bu sayede hücre çatlaklarıyla karşılaşma ihtimali düşürülmektedir.

## 8 Yarım ve tam PV hücrelerin fiyat ve performanslarının karşılaştırılması

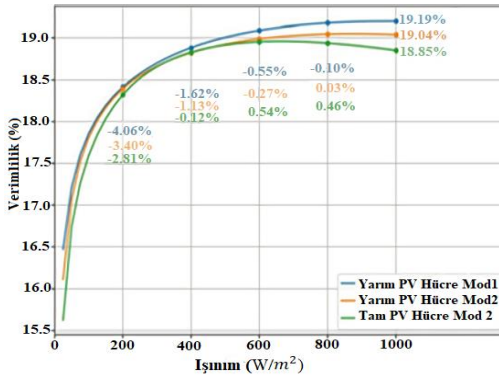
Yarıya bölünmüş hücreler kullanan PV modüller, modül maliyetlerini azaltmak için umut verici bir gelişmedir. Tam hücrelerden yarım hücrelere geçiş sırasında, modül başına düşen hücre sayısı, modül boyutu ve modül içerisindeki hücre aralıkları değişiklik göstermektedir.

Yarım hücreli modüller ek işlem adımları nedeniyle tam hücreli modüllere kıyasla daha yüksek maliyete sahiptir. Ancak, tam hücrelerden yarım hücrelere geçiş yapılırken aktif hücre alanı korunursa, yarım hücre modüllerinin CTM güç oranındaki artışın, ek üretim maliyetlerini fazlasıyla karşılayacağı bildirilmektedir [46].

Yarım hücreli paneller bazı teknik avantajlara sahip olmanın yanı sıra güneş enerjisi yatırımının geri dönüş süresini de azaltmaktadır. Özellikle gölgelenmeye maruz kalan ve alan kısıtlamaları olan yerlerde normal panellere göre çok daha kısa geri dönüş süreleri sağlamaktadır. Bu bağlamda, yarım hücreli paneller müşterilere kaliteden ve çıkış gücünden ödün vermeksizin uygun fiyatlı çözümler sunmaktadır.

Yarım hücreli PV modüllerin, yukarıda verilen avantajlarının yanında bazı üretim dezavantajları da vardır. Bununla birlikte, bu avantajlar yalnızca hücre ayırma işleminin neden olduğu kayıplar ihmal edilebilir olduğunda bir fayda sağlamaktadır. Chiodetti vd. [47] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yarım hücreli PV modüllerin verimliliğinin az ışık koşullarında tam hücreli modüllere göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada yarım hücreli PV modüllerin her zaman en karlı seçenek olmayabileceği belirtilmektedir. Düşük ışınım ortamında tam hücreli modüllerin hala yarım hücreli modüllerden daha rekabetçi olduğu, ancak yüksek ışınım koşullarında yarım hücrelerin uygun bir seçim olacağı vurgulanmıştır. Çalışmada, aynı teknolojiye sahip iki tane yarım hücreli p-PERC modülü (STC'de 380 Wp) ve bir tane tam hücreli p-PERC modülü (STC'de 370 Wp) kullanılmıştır. Modüllerin verim değerleri çeşitli ışınım seviyelerinde değerlendirilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi yüksek ışınım olarak kabul edilen 1000 W/m<sup>2</sup> ışınımında baskın olan azaltılmış direnç kayıpları sayesinde yarım hücreli PV modülün verimlilik değeri (% 19.19) tam hücreli modüle (% 18.85) göre daha iyidir. Bununla birlikte, yarım hücreli modüller düşük ışınım olarak kabul edilen 200W/m<sup>2</sup> ışınımında daha güçlü bir nispi kayba sahiptir. Dolayısıyla verimlilikleri tam hücreli modüle göre daha azdır.



Şekil 5. Yarım ve tam hücreli PV modüllerin ışınım verimliliği eğrileri [47]

Hücreyi ikiye bölmek hücrenin kesilen kenarında ek rekombinasyon ve şönt kaynaklı kenar kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıplar, güneş hücresinin performansını özellikle doldurma faktörünü ve açık devre voltajını önemli ölçüde etkileyecek kadar güçlüdür [48, 49]. Bu nedenle, kesme adımının neden olduğu kenar kayıplarını azaltmak, yarım hücre modül mimarisi için kritik öneme sahiptir.

Bunlara ek olarak lazer ile yarıya bölünen hücreler daha kırılabilir olmakta ve hücreler arasında uyumsuzluk kayıpları ortaya çıkmaktadır. Hücreler arası uyumsuzluk, farklı performans özelliklerine sahip hücrelerin birbirine bağlanması nedeniyle oluşmaktadır. Bu durum iki zararlı etkiye neden olur. Bunlar güç kaybı ve güvenilirlik bozulması şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Güneş hücrelerini ikiye bölmek, hücre kaynaklı kusurların olasılığını artırabilir [50]. Bu dikkate alınması gereken bir sorundur. Ancak, uygun kalite kontrolüne sahip bir üretici bu durumdan büyük ölçüde etkilenmeyecektir. Yarım PV hücreler arasındaki boşluklar nedeniyle neredeyse iki kat daha fazla lehim ve bağlantı noktası gerekmektedir. Bu, hem maliyeti hem de daha fazla bağlantı hatasıyla karşılaşma olasılığını artırmaktadır.

Yukarıda verilen dezavantajlar kontrolün üst seviyede olduğu, üretimin ve hammadde denetimlerinin yapıldığı günümüz gelişmiş üretim tesislerinde kolaylıkla minimize edilmektedir. Ayrıca, kesme işlemi her ne kadar güneş

hücrelerinin verimini azaltsa da, bu kayıp ekstra optik kazançlar ve azaltılmış elektrik kayıpları nedeniyle modül imalatından sonra fazlasıyla telafi edilmektedir [51, 52].

## 9 Sonuçlar

Yapılan incelemeler ile yarım hücreli PV modüllerin tam hücreli modüllere göre ribon direnci, hücre akımı, gölgeleme, sıcak nokta etkisi, çıkış gücü, ışınım verimliliği vb. açısından birçok avantaj sağladığı gösterilerek, bu hücrelerin güneş enerjisi geleceğindeki rolü hakkında bir fikir sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca makalede, gelecek çalışmalara yol göstermesi açısından fotovoltaik alanında yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin dezavantajlarında belirtilmektedir. Bu dezavantajlara rağmen yarım PV hücrelerin toplam güç ve verimlilik açısından kazanımlarının oldukça fazla olduğu ve özellikle yüksek verimli güneş hücreleri kullanıldığında PV modüllerin maliyetini düşürme potansiyeline sahip olduğu saptanmıştır. Bunun yanında, yarım hücreli modüllerin düşük elektrik kayıpları nedeniyle, yüksek güneşlenme seviyelerine sahip yerlerde tam hücreli modüllere göre daha iyi performans gösterdiği ve daha düşük akım sayesinde hücrenin ön tarafındaki gölgelendirmeyi azaltan ve çıkış gücünü arttıran daha dar baraların kullanılmasını sağladığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak, fotovoltaik panellerde yarım hücre kullanımının sağladığı daha düşük bir hot spot sıcaklığının kapsülleme hasarı, lehim erimesi ve termal stres kaynaklı hücre çatlamalarının neden olduğu modül arıza riskini azaltarak modül verimliliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, yarım hücreli modül tasarımının kristal silikon fotovoltaik modüllerdeki hot spot bozulmasını azaltarak sıcak noktaların modül dayanıklılığı ve ömrü üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için önemli bir tasarım aracı olabileceği söylenebilir.

## Çıkar çatışması:

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

## Benzerlik oranı (iThenticate): %5

## Kaynaklar

- [1] L. E. Chaar L.A. lamont, and N. E. Zein, Review of Photovoltaic Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2165-2175, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.004>
- [2] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, Erişim Tarihi: 21.01.2022
- [3] J. Schneider, S. Schoenfelder, S. Dietrich, and M. Turek, Solar module with half size solar cells. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 185-189, Amsterdam, Niederlande, 2014.
- [4] I. M. Peters, Y. S. Khoo, and T. M. Walsh, Detailed current loss analysis for a PV module made with textured multicrystalline silicon wafer solar cells. IEEE Journal of Photovoltaics, 4(2), 585-593,2014. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2295736>
- [5] <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/10/wh-at-is-a-half-cell-solar-panel/>, Erişim Tarihi: 07.01.2022

- [6] S. Guo, J. P. Singh, I. M. Peters, A. G. Aberle, and T. M. Walsh, A quantitative analysis of photovoltaic modules using halved cells. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 0-8, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/739374>
- [7] International technology roadmap for photovoltaic <http://www.itrpv.net/cm4all/>, Erişim Tarihi: 07.10.2021
- [8] A. Joshi, A. Khan, and A. Sp, Comparison of half cut solar cells with standard solar cells. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, pp. 10-12, Dubai, United Arab Emirates, 2019.
- [9] S. Guo, J. Schneider, F. Lu, H. Hanifi, M. Turek, M. Dyrba, and I.M. Peters, Investigation of the short-circuit current increase for PV modules using halved silicon wafer solar cells. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 133, 240–247, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.11.012>
- [10] T. Tang, C. Gan, Z. Hu, H. Niu, J. Si, and X. Luo, A Quantitative Comparison Between Double Glass Photovoltaic Modules Using Half-Size Cells and Quarter-Size Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1298 – 1303, 2017. [10.1109/JPHOTOV.2017.2730358](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2730358)
- [11] H. Hanifi, M. Pander, U. Zeller, K. Ilse, D. Dassler, M. Mirza, M.A. Bahattab, B. Jaekel, C. Hagendorf, and M. Ebert, Loss analysis and optimization of PV module components and design to achieve higher energy yield and longer service life in desert regions. *Applied Energy*, 280, 116028, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116028>
- [12] H. Hanifi, D. Dassler, J. Schneider, M. Turek, S. Schindler, and J. Bagdahn, Optimized Tab Width in Half-cell Modules. *Energy Procedia*, 92, 52–59, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.009>
- [13] J. Muller, D. Hinken, S. Blankemeyer, H. Kohlenberg, U. Sonntag, K. Bothe, T. Dullweber, M. Kontges, and R. Brendel, Resistive Power Loss Analysis of PV Modules Made from Halved  $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$  Silicon PERC Solar Cells with Efficiencies up to 20.0%. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5, 189–194, 2015. [10.1109/JPHOTOV.2014.2367868](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2367868)
- [14] V. Tyagi, N.A. Rahim, N. Rahim, and L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: research and achievement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- [15] E. E. van Dyk and E. L. Meyer, Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00250-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00250-7)
- [16] L. J. Caballero, P. Sanchez-Friera, B. Lalaguna, J. Alonso, and M. A. Vazquez, Series resistance modelling of industrial screen printed monocrystalline silicon solar cells and modules including the effect of spot soldering. *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 1388–1391, Waikolo, Hawaii, USA, 2006.
- [17] N. D. Kumar, C. Mounika, T. Sailaja, and D. Mounika, Design and reduction of wattage losses in solar module using AR coating, cell-to-cell gap and thickness. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, pp. 42–47, Hyderabad, India, 2011.
- [18] W. S. Su, Y. C. Chen, W. H. Liao, C. H. Huang, D. C. Liu, M. Y. Huang, Z. C. Wu, and S. J. Ho, Optimization of the output power by effect of backsheet reflectance and spacing between cell strings. *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3218–3220, Seattle, Wash, USA, 2011.
- [19] S. Roberts, K. C. Heasman, and T. M. Bruton, The reduction of module power losses by optimisation of the tabbing ribbon. *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 2378–2382, Glasgow, United Kingdom, 2020.
- [20] A. Thomson, M. Ernst, I. Haedrich, and J. Qian, Impact of PV module configuration on energy yield under realistic conditions. *Optical and Quantum Electronics*, 49(2), 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0903-0>
- [21] I. Haedrich, U. Eitner, M. Wiese, and H. Wirth, Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power. *Solar Energy Material Solar Cells*, 131, 14–23, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.025>
- [22] K. R. McIntosh, R. M. Swanson, and J. E. Cotter, A simple ray tracer to compute the optical concentration of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*, 14(2), pp. 167–177, 2006. <https://doi.org/10.1002/pip.647>
- [23] H. Yousuf, M.A. Zahid, M.Q. Khokhar, J. Park, M. Ju, D. Lim, Y. Kim, E.C. Cho, and J. Yi, Cell-to-Module Simulation Analysis for Optimizing the Efficiency and Power of the Photovoltaic Module. *Energies*, 15, 1176, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15031176>
- [24] M. Mittag, A. Pfreundt, J. Shahid, N. Wöhrle, and D. H. Neuhaus, Techno-economic analysis of half cell modules: The impact of half cells on module power and costs. *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 9-13, Marseille, France, 2019.
- [25] J. Jiang, J. Ni, Y. Zhang, D. Rong, Y. Li, T. Feng, Y. Geng, J. Zheng, F. Bo, and Y. He, Optimizing ribbons structure for power gain in half-cell modules. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3442-3445, Chicago, USA, 2019.
- [26] A. Luque, and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2010.
- [27] M. Alçı ve S. Duman, Investigation of the effect of hot spot behavior and ribbon optimization on energy efficiency in half PV cells. *9th International Advanced*



- Technologies Symposium, pp. 156-161, Türkiye, 2021.
- [28] K. Brecl and M. Topic, Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays. *Renewable Energy*, 36(11), 3211–3216, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.011>
- [29] K. Brecl, M. Bokalic, and M. Topic, Annual energy losses due to partial shading in PV modules with cut wafer-based Si solar cells. *Renewable Energy*, 168, 195-203, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.059>
- [30] T. Tang, C. Gan, Z. Hu, H. Niu, J. Si, and X. Luo, A Quantitative Comparison Between Double Glass Photovoltaic Modules Using Half-Size Cells and Quarter-Size Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1298 – 1303, 2017. [10.1109/JPHOTOV.2017.2730358](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2730358)
- [31] H. Hanifi, J. Schneider, J. Bagdahn, H. Anhalt, and J. Bagdahn, Reduced shading effect on half-cell modules-measurement and simulation. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2529-2533, Hamburg, Germany, 2015.
- [32] <https://www.ise.fraunhofer.de/>, Erişim Tarihi: 24.12.2021
- [33] M. Sayed, and L. Partain, Effect of shading on CdS CuxS solar cells and optimal solar array design. *Energy Conversion*, 14(2), 61-71, 1975. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(75\)90083-2](https://doi.org/10.1016/0013-7480(75)90083-2)
- [34] D. C. Jordan, T. J. Silverman, J. H. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, and K. T. VanSant, Photovoltaic failure and degradation modes. *Progress in Photovoltaics*, 25(4), 18–326, 2017. <https://doi.org/10.1002/pip.2866>
- [35] M. C. Alonso Garcia, W. Herrmann, W. Bohmer, and B. Proisy, Thermal and electrical effects caused by outdoor hot-spot testing in associations of photovoltaic cells. *Progress in Photovoltaics*, 11(5), 293-07, 2003. <https://doi.org/10.1002/pip.490>
- [36] M. Waqar Akram, G. Li, Y. Jin, C. Zhu, A. Javaid, M. Zuhaib Akram, and M. Usman Khan, Study of manufacturing and hotspot formation in cut cell and full cell PV modules. *Solar Energy*, 230, 247-259, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.052>
- [37] J. Qian, A. Thomson, A. Blakers, and M. Ernst, Comparison of half-cell and full-cell module hotspot-induced temperature by simulation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(3), 834–839, 2018. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2817692>
- [38] J. Qian, C.E. Clement, M. Ernst, Y.S. Khoo, A. Thomson, and A. Blakers, Analysis of hotspots in half cell modules undetected by current test standards, *IEEE Journal of Photovoltaics* 9(3), 842–848, 2019. [10.1109/JPHOTOV.2019.2898209](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2898209)
- [39] T. Jung, H. Song, H. Ahn, G. Kang, A mathematical model for cell-to-module conversion considering mismatching solar cells and the resistance of the interconnection ribbon. *Solar Energy*, 103, 253–262, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.032>
- [40] <https://www.pveasy.com.au/blog/2018/7/panels-with-half-cut-cells>, Erişim Tarihi: 2.02.2022
- [41] F. Gerenton, J. Eymard, S. Harrison, R. Clerc, and D. Munoz, Analysis of edge losses on silicon heterojunction half solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 204, 110213, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110213>
- [42] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, and D. Habermann, Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption. *Energy Procedia*, 38, 334–339, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.286>
- [43] [https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/whitepaper\\_twinpeak\\_technology.pdf](https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/whitepaper_twinpeak_technology.pdf), Erişim Tarihi: 20.01.2022
- [44] S. Eiternick, F. Kaule, H.U. Zühlke, T. Kießling, M. Grimm, S. Schoenfelder, and M. Turek, High Quality Half-cell Processing Using Thermal Laser Separation. *Energy Procedia* 77, 340–345, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.048>
- [45] L. Xia, J. Chen, K. Liao, L. Huang, Q. Li, and X. Luo, Influence of laser cutting conditions on electrical characteristics of half-size bifacial silicon solar cells. *Materials Science Semiconductor Processing*, 105, 104747, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104747>
- [46] M.T. Sarniak, Modeling the Functioning of the Half-Cells Photovoltaic Module under Partial Shading in the Matlab Package. *Applied Sciences*, 10(7), 2575, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072575>
- [47] M. Chiodetti, J. Dupuis, D. Boubilil, K. Radouane, and P. Dupeyrat, Half-cell module behaviour and its impact on the yield of a pv plant. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1444-1448, Marseille, France, 2019
- [48] S. Eiternick, K. Kaufmann, J. Schneider, and M. Turek, Loss analysis for laser separated solar cells. *Energy Procedia*, 55, 326–330, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.094>
- [49] A. Fell, J. Schön, M. Müller, N. Wöhrle, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, Modeling of edge recombination losses in half-cells. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 8(2), 853–856, 2017.
- [50] D. Roche, H. Outhred, and R.J. Kaye, Analysis and control of mismatch power loss in photovoltaic arrays. *Progress in Photovoltaics*, 3(2), 115-127, 1995. <https://doi.org/10.1002/pip.4670030204>
- [51] Z. Yang, K. Liao, J. Chen, L. Xia, and X. Luo, Output performance analysis and power optimization of different configurations half-cell modules under partial shading. *Optik*, 232, 166499, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166499>
- [52] S. Malik, D. Dassler, J. Fröbel, J. Schneider and M. Ebert, Outdoor data evaluation of half/Full-Cell modules with regard to measurement uncertainties and the application of statistical methods. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3269-3273, Amsterdam, Niederlande, 2014.





# Batarya sağlık durumunun makine öğrenmesi ile kestirimi

## Determining battery health with machine learning

Emine Çavuş<sup>1,\*</sup> , İdris Sancaktar<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

### Öz

Bu çalışmada batarya sağlık durumunun belirlenmesi için makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla bataryanın deşarj olması esnasında elde edilen akım, kapasite azalması, gerilim gibi değerler kullanılmıştır. Literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olarak, deşarj gerilim grafiğindeki diz-dirsek noktaları belirlenerek gerilimdeki değişimler daha ayrıntılı olarak dikkate alınmıştır. Belirlenen giriş verileri kullanılarak batarya sağlık durumunun belirlenebilmesi için k-En Yakın Komşu yöntemi ve Rastgele Orman Regresyon yöntemi olmak üzere iki farklı makine öğrenmesi algoritması oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen sağlık durumu belirleme yazılımı için PYHTON dili kullanılmıştır. Batarya sağlık durumunun belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin başarısı iki farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. İlk senaryo tüm batarya verilerinin karışık olarak değerlendirilip, tüm bataryalara ait verilerden oluşan eğitim ve test verilerinin oluşturulması ile gerçekleştirilmiştir. Diğer senaryo ise elde bulunan 12 bataryadan 11'ini eğitim verisini kalan 1 bataryanın ise test verisini oluşturduğu durumdur. Burada 12 bataryanın her biri ayrı ayrı test verisi olarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Batarya sağlığı, k-En yakın komşu yöntemi, Rastgele orman regresyon yöntemi

### 1 Giriş

Lityum-iyon bataryalar, elektriksel enerjinin kimyasal tepkimeler ile depo edilmesi ve depo edilen enerjinin yine kimyasal tepkimeler ile elektrik enerjisine dönüşmesi için kullanılan enerji depolama birimleridir. Bir batarya hücresi temel olarak anot, katot ve elektrolit olmak üzere 3 bölümden oluşur [1]. Anot negatif elektrottur, dış devreye elektron verir ve burada oksidasyon tepkimesi oluşur. Katot pozitif elektrottur, dış devreden elektron alır ve burada redüksiyon tepkimesi oluşur. Elektrolit ise batarya içinde iyon iletimini sağlayan bölümdür. Lityum-iyon bataryalar cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, askeri ve havacılık elektroniği gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [2-4]. Ayrıca elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması da enerjinin depolanmasını zorunlu kılmaktadır [5, 6]. Yüksek enerji yoğunluğu, yüksek güç yoğunluğu, güvenli olması, uzun ömürlü olması ve düşük kendi kendine deşarj, Lityum-iyon bataryayı kurşun asit, Sodyum Sülfür ve diğer batarya türlerinden üstün kılan

### Abstract

In this study, machine learning method was used to determine the battery health. For this purpose, values such as current, capacity decrease, voltage obtained during the discharge of the battery were used. Unlike other methods in the literature, the knee-elbow points in the discharge voltage graph are determined and the changes in voltage are taken into account in more detail. Two different machine learning algorithms, namely the k-Nearest Neighbor method and the Random Forest Regression method, were used in order to determine the battery health status by using the specified input data. PYHTON was used for the implemented health status determination software. The success of the methods used to determine the battery health status was evaluated with two different scenarios. The first scenario was carried out by evaluating all battery data in a mixed manner and creating training and test data consisting of data for all batteries. The other scenario is where 11 of the 12 batteries are the training data and the remaining 1 battery is the test data. Here, each of the 12 batteries is evaluated separately as test data.

**Keywords:** Battery health, k-Nearest neighbor method, Random forest method regression method

ana özellikleridir [7]. Belirtilen avantajların yanında fosil yakıtların yakın zamanda tükenmesi dolayısıyla, Lityum-iyon bataryalar fazlaca ihtiyaç duyulacak olan enerji depolama için de gelecek vaat eden elemanlardır [8].

Lityum-iyon bataryaların elektriksel özellikleri, doğrusal ve düzgün olmayan şarj kapasitesi vb. rağmen önemli ölçüde iyileştirilmiştir [9]. Lityum-iyon bataryaların daha güvenli çalışabilmesi, tüm sistemi korumak ve enerjinin optimum kullanımını izlemek için batarya yönetim sistemi gereklidir [10]. Batarya yönetim sistemlerinin, batarya performansını ve ömrünü optimize edebilmesi için sağlık durumu (SOH) ve şarj durumu (SOC) gibi bataryaların önemli parametrelerinin takip edilmesi gerekmektedir [11-13]. Bataryaların aşırı şarj, deşarj, ısınma gibi nedenlerden dolayı kimyasal yapısı bozulmakta, sağlık durumları olumsuz etkilenmekte ve enerji depolama işlevini yitirmektedir.

Batarya sağlık durumunu belirlemek için literatürdeki yöntemler üç grup altında toplanabilir; doğrudan ölçüm yöntemi, model tabanlı yöntem ve veri tabanlı yöntemler

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eminekose18@gmail.com (E. Çavuş)

Geliş / Received: 06.05.2022 Kabul / Accepted: 21.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1112985

[14-16]. Doğrudan ölçüm yöntemini kullanarak batarya sağlığını belirlemek için literatürde çalışmalar yapılmıştır [17-20]. Doğrudan ölçüm yönteminde bataryanın tamamen şarj ve deşarj esnasında batarya kapasitesi ölçülür [15]. Ayrıca sağlık durumunun belirlenebilmesi için batarya direncinin ölçülmesi gerekmektedir [21]. Temelinde basit olan bu yöntem özel laboratuvar şartları gerektirmesi gibi durumlardan dolayı uygulanabilirliği düşüktür. Model tabanlı yöntemini kullanarak batarya sağlığını belirlemek için literatürde birçok çalışma yapılmıştır [22-25]. Model tabanlı yöntemde, deşarj sırasında elde edilen bataryanın akım, gerilim vb. sinyalleri kullanılır [26]. Ayrıca ölçülen sinyallerin dışında sağlık durumunun belirlenmesi için batarya modeline (elektro-kimyasal ve elektriksel model) de ihtiyaç vardır. Ancak kullanılan batarya modellerinde bulunan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünün zor olması nedeniyle uygulanması zordur [27]. Veri tabanlı yöntemler, yalnızca bataryanın ne kadar ömrünün kaldığı ile değil ne kadar süre kullanıldığı ile ilgilenir. Sağlık durumunu belirlemek için kullanılan veri tabanlı yöntemler arasında; bulanık mantık [28], uzay vektör makinesi [29-31], zaman serisi [32], akıllı algoritmalar (genetik algoritma, yapay sinir ağları, en küçük kare polinom regresyonu ve parçacık filtreleri) [33-39] sayılabilir. Bu yöntemlerde ölçüm sonucu elde edilen veriler ile sistem sağlığı arasında karmaşık bağlantılar oluşturulur. Bu şekilde batarya ömründeki değişiklikler tespit edilir [18, 40, 41]. Bu yöntemin doğruluğu, veri kümesinin boyutuna bağlıdır, veri kümesi ne kadar büyük olursa sağlık kestirim işlemi o kadar başarılı olur [42]. Bahsedilen yöntemler yüksek verimlilik sağlamasına rağmen, hesaplama sürecinde ön işleme aşamaları bakımından oldukça masraflıdır. Bataryaya ait farklı ölçümlerde oluşan belirsizliklerin birleşmesi, dikkatli bir şekilde düzenlenmezse, tahmin işlemi oldukça başarısız olur.

Bu çalışmada veri tabanlı batarya sağlık durumu belirlemesi makine öğrenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bataryanın deşarj olması durumunda elde edilen akım, kapasite azalması, gerilim gibi değerler kullanılmıştır. Batarya sağlık durumu belirleme sürecinde deşarj esnasında elde edilen gerilim değerleri doğrudan kullanılmıştır. Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak, deşarj gerilim grafiğindeki diz-dirsek noktaları belirlenerek gerilimdeki değişimler daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bunun yanı sıra diz-dirsek noktalarındaki değişimlerin zaman farkı, deşarj eğrisi üzerindeki en yüksek ve en düşük gerilim değerleri ve aralarındaki zaman farkı da hesaba katılmıştır. Belirlenen giriş verileri kullanılarak batarya sağlık durumunun belirlenebilmesi için iki farklı makine öğrenmesi algoritması oluşturulmuştur. Tasarlanan ilk algoritma k-En Yakın Komşu yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan diğer yöntem ise Rastgele Orman regresyon yöntemidir. Bu çalışmada CALCE'nin internet ortamında açık olarak yayınladığı batarya verilerinden yararlanılmıştır [43]. CALCE'den alınan 12 adet bataryaya ait veriler (her bir bataryaya ait 50 şarj-deşarj döngüsü), çalışma hedefleri doğrultusunda düzenlenmiştir. Burada, tasarlanan sistemin başarısını değerlendirebilmek için iki farklı çalışma gerçekleştirilmiştir.

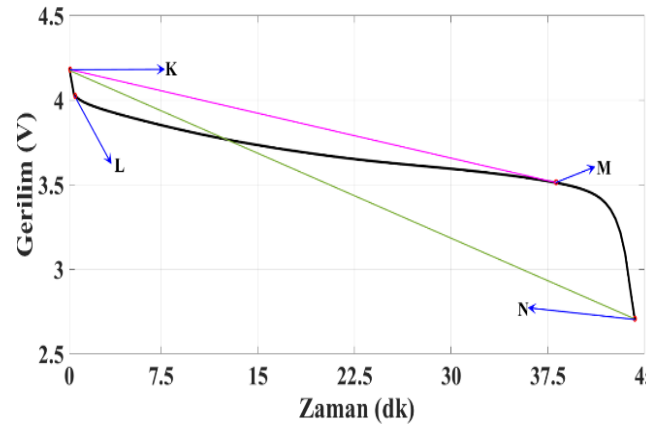
- 12 batarya (her bir bataryaya ait 50 şarj-deşarj döngüsü) eğitim-test verisi olarak rastgele bölündü.
- 12 bataryadan 11 bataryaya ait veri eğitim girişi, kalan 1 batarya test verisi olarak bölündü.

Her iki değerlendirme sonucunda da tasarlanan sistemin başarılı olduğu görüldü. İki yöntem birbiri ile karşılaştırıldığı zaman K-En Yakın Komşu yöntemi, Rastgele Orman Regresyon yönteminin gerisinde kalmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Diz-dirsek noktalarının belirlenmesi

Batarya sağlığının makine öğrenmesi vb. yöntemlerle sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için bataryaya ait verilerden, batarya sağlığını temsil edecek özelliklerin çıkartılması önemlidir [44]. Bu amaçla kullanılacak en önemli verilerden birisi batarya deşarj sürecine ait gerilim verileridir [45]. Bu çalışmada, kullanılan bataryaların sağlık durumunu belirlemek için deşarj eğrilerinin diz-dirsek noktalarından faydalanılmıştır. Diz (M) ve dirsek (L) noktaları dışında deşarj eğrisi üzerindeki en düşük (N) ve en yüksek (K) gerilim değeri noktaları da kullanılmıştır. Bir bataryaya ait genel deşarj eğrisi ve eğri üstündeki maksimum, minimum ve diz-dirsek noktaları Şekil 1'de görülmektedir. Şekil 1'de deşarj sürecinde bataryanın en yüksek ve en düşük gerilime sahip olduğu noktalar sırasıyla K ve N'dir. Ayrıca Dirsek noktası L, diz noktası ise M noktası olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Batarya deşarj eğrisi

Şekil 1'de verilen diz-dirsek noktalarının hesabı iki aşamadan oluşmaktadır [45].

1. K ve N arasındaki eğrinin matematiksel eşitliği ifade edilir.
2. Belirlenen K-N eğrisi ile deşarj eğrisi arasındaki en uzak ilk nokta diz (M), K noktası ile iki eğrinin kesişim noktası arasındaki bölümde, iki eğri arasındaki en uzak nokta ise dirsek (L) olarak belirlenir.

L ve M noktalarını belirlemek için gerekli olan iki eğri arası en uzak noktayı belirlemek amacıyla Şekil 1'de görüldüğü gibi, K-N arasındaki doğru A ve K noktası ile deşarj eğrisi üzerindeki herhangi bir noktaya doğru olan doğru ise B ile ifade edilebilir. Bu durumda, n adet noktadan oluşan deşarj eğrisi üzerindeki her bir nokta için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$B_i^{dik} = B_i \sin \theta \quad (1)$$

$\theta$  değeri ise aşağıda verildiği gibi skaler çarpım yoluyla bulunabilir.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left( \frac{A \cdot B_i}{|A||B_i|} \right) \quad (2)$$

Bu durumda  $M$  noktası ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$M = \max(B_1^{dik}, B_2^{dik}, B_3^{dik} \dots B_n^{dik}) \quad (3)$$

Şekil 1’de verilen noktalar belirlendikten sonra, noktalar arası ilişkiler bataryanın sağlık durumunu ile ilişkilendirilebilir. Bu nedenle makine öğrenmesi yönteminde kullanılmak üzere gerekli olan özellik çıkartma işleminde  $K-L$ ,  $L-M$  ve  $M-N$  noktaları arasındaki öklit uzunlukları göz önüne alınmıştır. Belirtilen üç öklit uzunluğunun batarya sağlığı ile ilişkisi incelendiği zaman, diz-dirsek noktaları ( $L-M$  noktaları) arası öklit uzaklığı sağlıkla doğrudan ilişkilidir [45]. Bu uzunluk değeri ne kadar yüksek ise batarya o kadar sağlıklıdır. Diğer iki öklit uzunluğunun ( $K-L$  ve  $M-N$  arası) batarya sağlığına etkisi incelendiği zaman,  $M-N$  arası öklit uzunluğunun batarya sağlığına etkisi  $L-M$  uzunluğu ile paralel olduğu görülmektedir. Bu nedenle gereksiz veri karmaşasından kurtulmak için  $M-N$  uzunluğu göz ardı edilmiştir ve  $L-M$  öklit uzunluğu ile beraber  $K-L$  öklit uzunluğu sağlık durumu belirlemek için özellik olarak seçilmiştir.

## 2.2 k-En yakın komşu yöntemi

k-En Yakın Komşu yöntemi, ilk olarak 1951 yılında Fix ve Hodges tarafından örüntü (model) tanımada kullanılmak üzere önerilmiş ve daha sonra 1967 yılında Cover ve Hart tarafından geliştirilmiştir [46]. Bu yöntem hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılabilir. Ayrıca bu yöntem gözlemlerin yapılacağı sınıfı ve en yakın komşuyu belirlemek için  $k$  komşu değerini kullanan bir Denetimli Makine Öğrenimi Algoritmasıdır. Diğer Denetimli Öğrenme Algoritmalarından farklı olarak geleneksel eğitim aşaması ile öğrenme işlemi yerine eğitim verilerini ezberlemesidir. Bu özelliği de tembel bir öğrenme türü olduğunu göstermektedir. Karmaşık hedef fonksiyonlarını bilgi kaybetmeden hızlı bir şekilde öğrenebilen en basit ve en çok kullanılan yöntemlerden biridir [47].

k-En Yakın Komşular yönteminin amacı, sınıfı belli olmayan bir verinin diğer verilere uzaklığının hesaplanarak hangi veriye/sınıfa yakın olduğunu belirlemektir. Sınıflandırma problemlerinde bu tahmin en yakın komşular arasında çoğunluğa bakılarak belirlenirken, regresyon problemlerinde en yakın 40 komşunun hesaplanan yakınlık derecelerinin sayısal değerlerinin ortalamasıdır. Bu şekilde yeni örneğin sınıfı belirlenir [48].

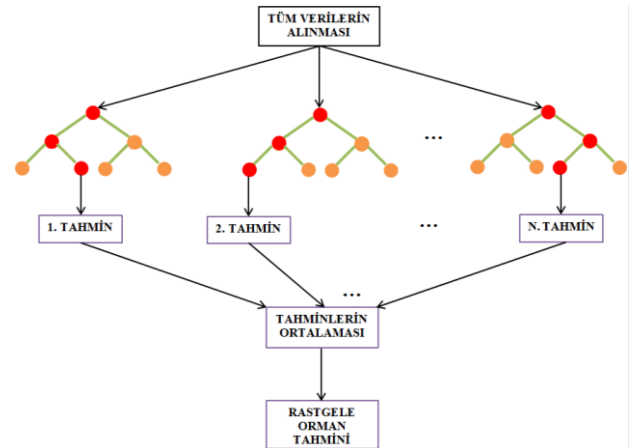
k-En Yakın Komşular yönteminin başarısı modele ait üç parametrenin doğru belirlenmesine bağlıdır. Bu parametreler en yakın komşu sayısı, ağırlık vektörü  $\alpha$  ve uzaklık ölçüsüdür [49].

Bu yöntemin uygulanmasının ilk aşaması en yakın komşu sayısı  $k$  değerinin belirlenmesidir.  $k$  değerinin belirlenmesi aşamasında eşdeğer bias ve varyans ile belirlenir. k-En Yakın Komşular yönteminde en uygun  $k$  değerini belirlemek için çapraz doğrulama yöntemi oldukça başarılıdır. Çapraz doğrulama ile bağımsız bir veri kümesi geriye dönük kullanarak en uygun  $k$  değeri belirlenir.  $k$  değeri çoğunlukla 3 ile 10 arasında seçilebilir [50, 51]. Yöntemin ikinci aşaması, örnek veri setine eklenecek yeni gözlemin belirlenmesi ve mevcut veriler ile yeni gözlem arasındaki tüm mesafelerin hesaplanmasıdır. Komşular arası mesafeleri hesaplamak için kullanılabilen birçok yöntem vardır. Bu yöntemler içinde en çok kullanılanlar, Öklid uzaklığı ve Manhattan, Minowski ve Hamming yöntemleri sayılabilir. Sınıflandırılabilen değişkenler söz konusu olduğu zaman Hamming, sürekli değişkenler söz konusu olduğunda ise diğer üç fonksiyon kullanılır [52]. Son aşamada ise yöntemde ait değişkenler belirlendikten sonra, tahmin edilecek değer olan  $x$  değeri  $k$  ve en yakın komşular kümesi  $N_i$ 'nin fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi yazılabilir (James ve diğerleri, 2013).

$$f(x) = \frac{1}{k} \sum_i N_i \quad (4)$$

## 2.3 Rastgele orman regresyon yöntemi

Rastgele Orman Regresyonu, uyarılma (regresyon) için kolektif öğrenme yöntemini kullanan denetimli bir öğrenme algoritmasıdır. Kolektif öğrenme yöntemi, birden fazla makine öğrenmesi algoritmasından gelen tahminleri birleştirerek çoklu karar verme algoritmasına sahip orman oluşturan, tek bir modele dayalı herhangi bir yöntemle göre doğruluğu daha yüksek bir tahmin etme yöntemidir. Rastgele Orman Regresyonu hem sınıflandırma hem de uyarılma problemleri için kullanılabilir. Bu yöntem ile yüksek boyutlu verilerin işlenebilmesinin yanında eksik değer ve aşırı öğrenme gibi problemlere çözüm üretir [53]. Şekil 2 Rastgele Orman Regresyonu çalışma biçimini göstermek için örnek olarak verilebilir.



Şekil 2. Rastgele Orman Regresyonu örnek akış şeması

Rastgele Orman Regresyon akış şeması incelendiği zaman, ağaç sayısı ( $N_{\text{ağaç}}$ ) ve her bir ağaca ait düğüm sayısı ( $N_{\text{düğüm}}$ ) olmak üzere, yönteme ait iki parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Karar verme ormanı oluşturulurken, kullanılacak veri setinden elde edilen eğitim veri setinin %70'i karar ağacını oluşturmak için kullanılır. Eğitim veri setinden kalan %30'luk bölümü ise geliştirilen yöntemin hata oranını hesaplamak için kullanılır [54].

Geleneksel bir karar ağacı yöntemi olan Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (SVRA) Algoritması kuralları, belirlenen değişkenin hangi değerine bağlı olarak ağacın dallanması gerektiğini belirlemek için kullanılır [55]. Bu kurallar, sınıflandırma ağaçları için gini indeksi olarak adlandırılır. Ancak bu işlem Rastgele Orman Regresyon yönteminde, gini indeks kriterine göre değil, elde edilen iki düğüm için tahmin edilen toplam varyansın minimize eden 'karesel artıkları azaltma algoritması'na göre yapılmaktadır [56]. Her düğümde en iyi dallanmayı sağlayacak değişken rastgele seçilir. Rastgele seçimin amacı, ağaçlar arasındaki korelasyonu en aza indirmek ve hata oranını azaltmaktır. Hata oranındaki azalma, algoritmanın etkinliğini artırır ve geliştirilen algoritmayı aşırı öğrenme durumuna karşı korur.

Karar verme ormanında oluşturulan her bir ağaç için, veri kümesinde bulunan farklı veri kümeleri kullanılır. Her ağacın eğitilmesinde kullanılan veri kümeleri birbirinden farklıdır. Böylece karar verme ormanında ağaç oluşturma sürecinde, her ağaç bağımsız olarak diğerlerinden etkilenmeden oluşturulur [57]. Oluşturulan tüm ağaçlar, ayrı ayrı test işlemine tabi tutulur ve her bir ağaç için hata oranı hesaplanır. Hesaplanan hata oranlarının ortalaması alınarak ortalama hata oranı hesaplanır [54]. Bu hata, her ağacın bireysel gücünün yanı sıra (her ağacın kendi hata oranı) ve ormandaki ağaçların aralarındaki uyuma da bağlıdır. Rastgele Orman Regresyon yönteminin en önemli özelliklerinden biri de kendi hata oranını hesaplayabilmesidir [55].

### 3 Batarya sağlık durumunun kestirilmesi

Bataryaların sağlık durumu kestirimi için veri tabanlı yöntemler, karmaşıklıktan uzak bir yapısının olması, deneysel çalışmalara uygulanabilir olması ve yüksek doğruluklu sonuçlar vermeleri nedeniyle son zamanlarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Uygulamalı çalışmalarda bataryaların akım, gerilim, kapasite ve kapasite azalması gibi veriler doğrudan elde edilebilmektedir. Bu nedenle doğrudan elde edilebilen bu veriler ile veri tabanlı yöntemler kullanılarak batarya sağlık durumu kestirimi yapılması mümkündür [58].

Bu çalışmada veri tabanlı batarya sağlık durumu belirlemesi makine öğrenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle makine öğrenmesi algoritmasında kullanılmak üzere giriş verileri belirlenmiştir. Çalışmada gerekli olan batarya verileri, CALCE'nin internet ortamında açık olarak yayınladığı verilerinden elde edilmiştir. CALCE'den alınan 12 adet farklı batarya verisi kullanılmıştır. Her bir bataryaya ait alınan veriler toplam 50 şarj-deşarj döngüsünden oluşmaktadır. Kullanılan bataryalar ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

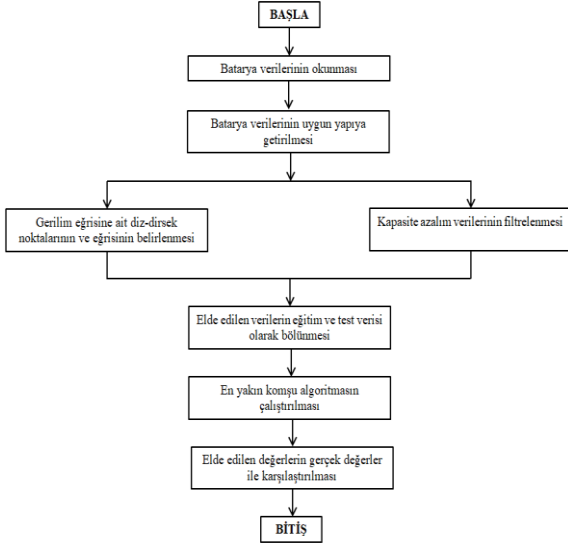
Bataryaların kapasite azalma grafikleri incelendiği zaman bazı verilerde bozukluk olduğu görülmüştür. Ölçüm işleminden kaynaklanan ve normalde mevcut olması imkansız olan bu durumların gerçekleştirilecek çalışmanın başarısını olumsuz etkilememesi için, bataryaların kapasite azalma verileri filtre kullanılarak düzenlenmiştir. Filtreleme işlemi sadece hatalı olan bölümlere uygulanmıştır. Bunun için öncelikle tüm veri yazılımsal analiz edilmiş ve anormal değerler belirlenmiştir. Filtreleme işlemi her bir adımdaki kapasite azalımı bir önceki durumdaki kapasite değeri ile karşılaştırılmıştır. Eğer iki kapasite azalma miktarı arasındaki değişim eşik değerinin üstünde ise filtreleme gerçekleştirilmiş ve bir önceki kapasite azalma miktarının %95'i kadar azalma olduğu varsayılmıştır.

Sağlık durumu kestiriminde bataryanın deşarj olması durumunda elde edilen akım, kapasite azalması, gerilim gibi değerler kullanılmıştır. Batarya sağlık durumu belirleme sürecinde deşarj esnasında elde edilen gerilim değerleri doğrudan kullanılmıştır. Bu çalışmada ise diğer çalışmalardan farklı olarak, deşarj gerilim grafiğindeki diz-dirsek noktaları belirlenerek gerilimdeki değişimler daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bunun yanı sıra diz-dirsek noktalarındaki değişimlerin zaman farkı, deşarj eğrisi üzerindeki en yüksek ve en düşük gerilim değerleri ve aralarındaki zaman farkı da hesaba katılmıştır.

**Tablo 1.** Kullanılan bataryalar ve özellikleri

Batarya İsmi	Akım (A)	Kapasite (Ah)
CS2 33	0.55	1.1
CS2 34	0.55	1.1
CS2 35	1.1	1.1
CS2 36	1.1	1.1
CS2 37	1.1	1.1
CS2 38	1.1	1.1
CX2 33	0.675	1.35
CX2 34	1.35	1.35
CX2 35	0.675	1.35
CX2 36	1.35	1.35
CX2 37	1.35	1.35
CX2 38	1.35	1.35

Belirlenen giriş verileri (batarya deşarj sürecinden elde edilen akım, gerilim, kapasite azalımı, gerilim eğrisi diz-dirsek noktaları ve eğrileri) kullanılarak batarya sağlık durumunun belirlenebilmesi için iki farklı makine öğrenmesi algoritması oluşturulmuştur. Kullanılan ilk algoritma k-En Yakın Komşu algoritması diğer yöntem ise Rastgele Orman Regresyon yöntemidir. Verilerin düzenlenmesi, işlenmesi, makine öğrenmesi algoritması vb. tüm işlemler PYTHON programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PYTHON programlama dilinde hazırlanan algoritmanın tüm çalışmasını anlatan blok şema Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Batarya sağlık durumu belirleme akış şeması

#### 4 Sonuçlar

Şekil 3'te verilen akış şemasına uygun olarak batarya sağlık durumu belirleme yazılımı hem k-En Yakın Komşu hem de Rastgele Orman Regresyonu yöntemi için PYTHON programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. Program çıkışında, herhangi bir bataryaya ait giriş verilerine karşılık, bu verilerin bataryanın hangi çevriminde elde edildiği tahmin edilmektedir. Tasarlanan algoritmaların başarısı iki farklı senaryo ile test edilmiştir. Gerçekleştirilen senaryolar aşağıdaki gibidir.

- 12 batarya (her bir bataryaya ait 50 şarj-deşarj döngüsü) eğitim-test verisi (sırasıyla %70-%30) olarak rastgele bölündü.
- 12 bataryadan 11 bataryaya ait veri eğitim girişi, kalan 1 batarya test verisi olarak bölündü.

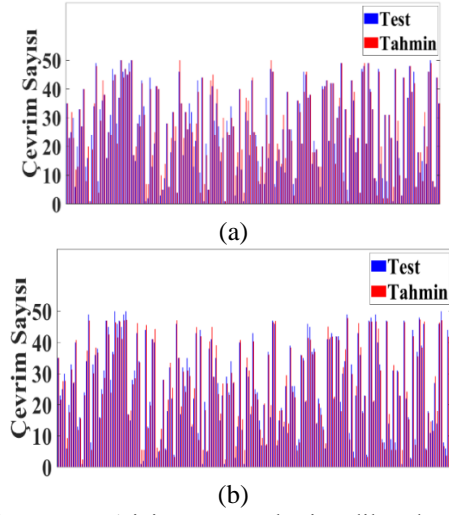
İlk senaryo ile eğitilen sistem, tüm bataryalara ait bazı verilere sahip olmuştur. Böylece test edilecek bataryalara ait güçlü bir eğitim ağı oluşturulabilmiştir. Eğitim verileri ile eğitilen sisteme test verileri uygulanmış. k-En Yakın Komşu ve Rastgele Orman Regresyon yöntemleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te mavi sütunlar hesaplanması gereken batarya çevrim sayısı, kırmızı sütunlar ise hesaplanan çevrim sayısıdır.

Gerçekleştirilen sistemin toplam başarısı ortalama mutlak hata (MAE) hesabı kullanılarak değerlendirilmiştir. MAE hesabı aşağıda verilmiştir, burada  $C_{gerçek}$  gerçek çevrim sayısı,  $C_{hesap}$  hesaplanan çevrim sayısıdır. İlk senaryoya ait MAE değeri ve sistemin doğruluk değeri Tablo 2'de verilmiştir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_{gerçek} - C_{hesap}| \cdot \%100 \quad (5)$$

İkinci senaryoda 12 bataryadan 11 tanesi eğitim amacıyla kullanılmıştır. 1 batarya ise test amacıyla kullanılmıştır. Burada 12 bataryanın hepsi için bu durum tekrarlanmıştır. Bu şekilde, tasarlanan sağlık durumu belirleme algoritması,

hiçbir verisine sahip olmadığı bir bataryanın sağlık durumunu belirlemesi istenmiştir. Böylece oluşturulan algoritmaların, hiçbir bilgisi olmadığı (eğitim verilerinde bulunmayan) bir batarya için tahmin performansı değerlendirilmiştir. 12 bataryanın her birinin test grubu olduğu (dolayısıyla kalan 11 batarya eğitim verisi olarak kullanılmıştır) durum için elde edilen sonuçlar k-En Yakın Komşu ve Rastgele Orman Regresyon yöntemleri için sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



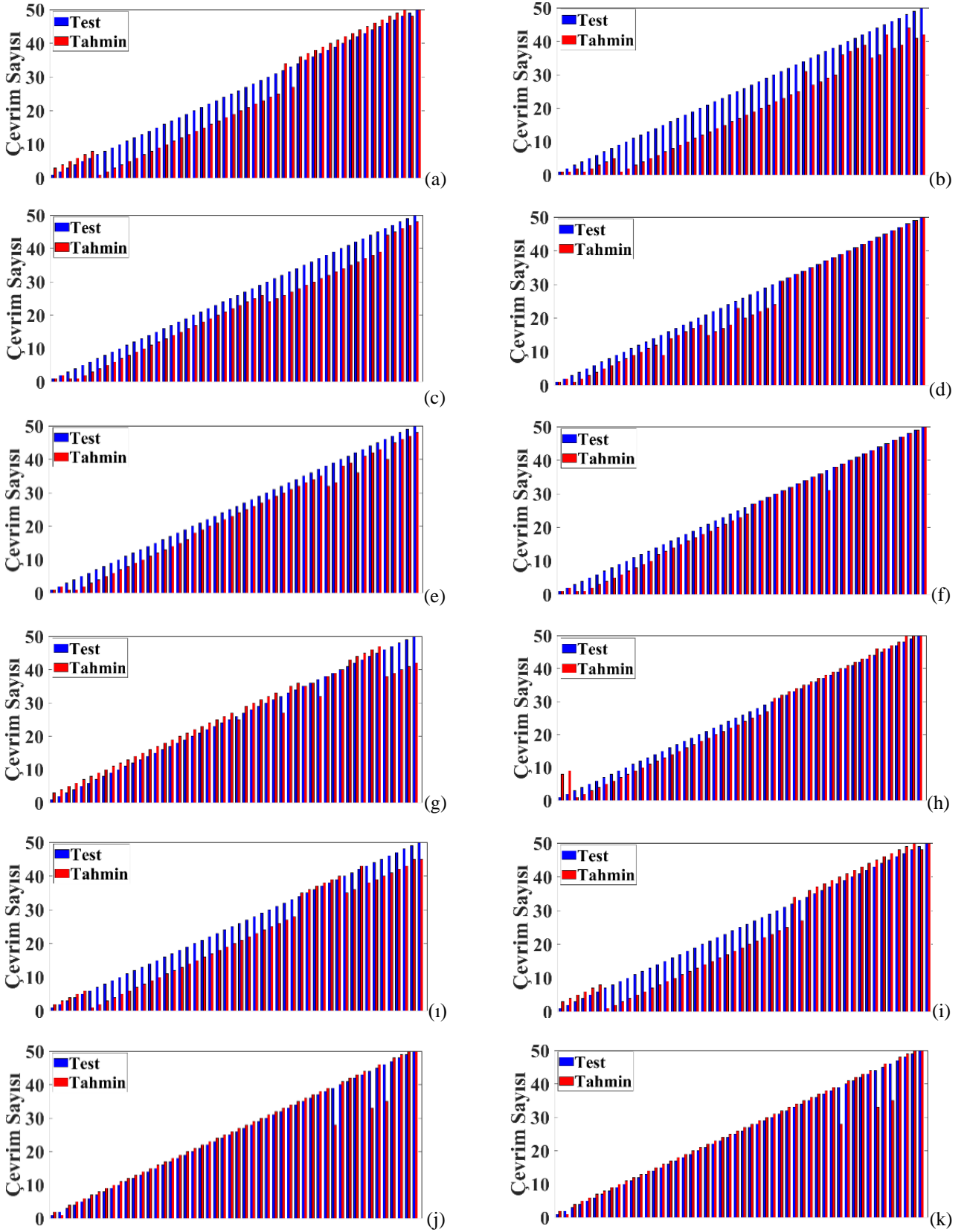
Şekil 4. Senaryo 1 için test ve tahmin edilen değerleri (a) k-En Yakın Komşu yöntemi (b) Rastgele Orman Regresyon yöntemi

Tablo 2. Senaryo 1 için bataryalara ait MAE ve doğruluk oranları

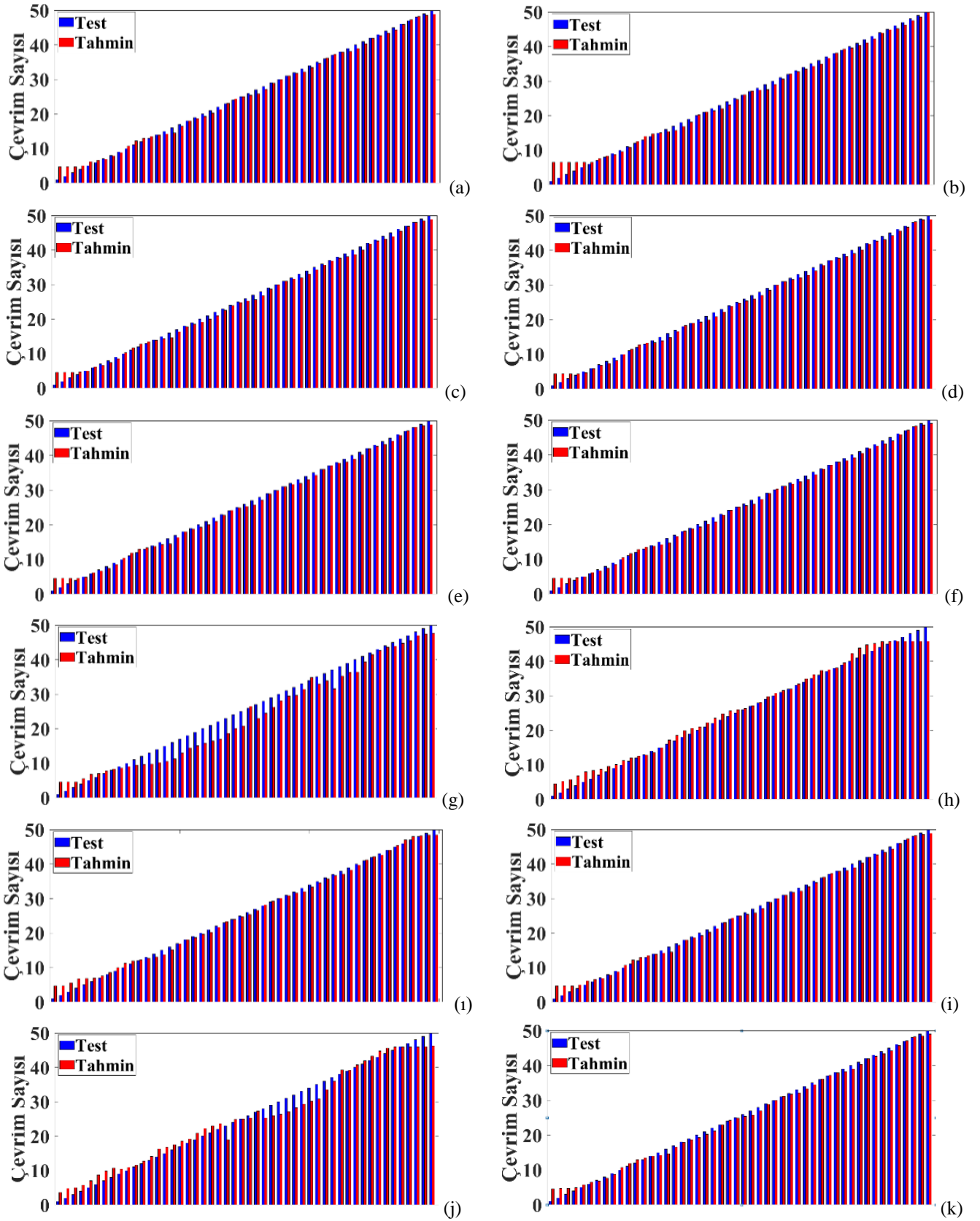
Yöntem	MAE	Doğruluk
k-En Yakın Komşu	5.2	94.8
Rastgele Orman Regresyon	3.87	96.13

Tablo 3. Senaryo 2 için bataryalara ait MAE ve doğruluk oranları

Batarya İsmi	k-En Yakın Komşu		Rastgele Orman Regresyon	
	MAE	Doğruluk	MAE	Doğruluk
CS2 33	7.72	92.28	1.83	98.17
CS2 34	12.76	87.24	2.24	97.76
CS2 35	7.44	92.56	1.31	98.69
CS2 36	3.84	96.16	1.3	98.7
CS2 37	5.12	94.88	1.36	98.74
CS2 38	2.56	97.44	1.34	98.76
CX2 33	5	95	2.18	97.81
CX2 34	3.6	96.4	2.23	98.77
CX2 35	8.04	91.96	1.1	98.9
CX2 36	8.04	91.96	1.17	98.83
CX2 37	3.16	96.84	1.08	98.92
CX2 38	0.48	99.52	1.2	98.8



Şekil 5. k- En Yakın Komşu yöntemi için test ve tahmin değerleri (a) CS2 33 (b) CS2 34 (c) CS2 35 (d) CS2 36 (e) CS2 37 (f) CS2 38 (g) CX2 33 (h) CX2 34 (i) CX2 35 (j) CX2 36 (k) CX2 37 (l) CX2 38



Şekil 6. Rastgele Orman Regresyon yöntemi için test ve tahmin değerleri (a) CS2 33 (b) CS2 34 (c) CS2 35 (d) CS2 36 (e) CS2 37 (f) CS2 38 (g) CX2 33 (h) CX2 34 (i) CX2 35 (i) CX2 36 (j) CX2 37 (k) CX2 38



Gerçekleştirilen sistemin toplam başarısı ortalama mutlak hata (MAE) hesabı kullanılarak değerlendirilmiştir. Her bir bataryaya ait MAE hesabı sonucu ve doğruluk oranı **Tablo 3**'te verilmiştir.

## 5 Değerlendirmeler

Bu çalışmada batarya sağlık durumunun belirlenmesi için makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla bataryanın deşarj olması durumunda elde edilen akım, kapasite azalması, gerilim gibi değerler kullanılmıştır. Literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olarak, deşarj gerilim grafiğindeki diz-dirsek noktaları belirlenerek gerilimdeki değişimler daha ayrıntılı olarak dikkate alınmıştır. Belirlenen giriş verileri kullanılarak batarya sağlık durumunun belirlenebilmesi için iki farklı makine öğrenmesi algoritması (k-En Yakın Komşu yöntemi ve Rastgele Orman Regresyon yöntemi) oluşturulmuştur. Bu çalışmada CALCE'nin internet ortamında açık olarak yayınladığı batarya verilerinden yararlanılmıştır. CALCE'den alınan 12 adet bataryaya ait veriler (her bir bataryaya ait 50 şarj-deşarj döngüsü), çalışma hedefleri doğrultusunda düzenlenmiştir. Gerçekleştirilen sağlık durumu belirleme yazılımı için PYTHON dili kullanılmıştır. Batarya sağlık durumunun belirlenmesi için kullanılan yöntemlerin başarısı iki farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. İlk senaryo tüm batarya verilerinin karışık olarak değerlendirilip, tüm bataryalara ait verilerden oluşan eğitim ve test verilerinin oluşturulması ile gerçekleştirilmiştir. **Şekil 4** ve **Tablo 2**'den anlaşıldığı üzere kullanılan her iki yöntem de ilk senaryoda başarılı olmuştur. Ancak iki yöntem birbiri ile karşılaştırıldığı zaman Rastgele Orman Regresyon yönteminin daha başarılı olduğu görülmüştür. Diğer senaryo ise elde bulunan 12 bataryadan 11'ini eğitim verisini kalan 1 bataryanın ise test verisini oluşturduğu durumdur. Burada 12 bataryanın her biri ayrı ayrı test verisi olarak değerlendirilmiştir. **Şekil 5, 6** ve **Tablo 3** değerlendirildiği zaman k-En Yakın Komşu yönteminin sadece bir batarya için daha başarılı olmuştur. Diğer bataryalarda ise Rastgele Orman Regresyon yöntemi daha başarılı olmuştur.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %9**

## Kaynaklar

- [1] D. Linden and T. Reddy, Handbook of Batteries, Third Edition, McGraw-Hill. 2002.
- [2] Y. Zhang, R. Xiong, H. He and M. G. Pecht, Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network for Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67 (7), 5695-5705, 2018. <http://doi.org/10.1109/TVT.2018.2805189>.
- [3] Y. Song, D. Liu, C. Yang, Y. Peng, Data-driven hybrid remaining useful life estimation approach for spacecraft lithium-ion battery, Microelectronics Reliability, 75, 142-153, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.06.045>.

- [4] R. Xiong, Y. Zhang, H. He, X. Zhou and M. G. Pecht, A Double-Scale, Particle-Filtering, Energy State Prediction Algorithm for Lithium-Ion Batteries, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (2), 1526-1538, 2018. <http://doi.org/10.1109/TIE.2017.2733475>.
- [5] C. Unterrieder, R. Priewasser, S. Marsili and M. Huemer, Battery State Estimation Using Mixed Kalman/Hinfinity, Adaptive Luenberger and Sliding Mode Observer, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1-6, Beijing, China, 2013.
- [6] D. Saji, P. S. Babu and K. Ilango, SoC Estimation of Lithium Ion Battery Using Combined Coulomb Counting and Fuzzy Logic Method, 4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT), pp. 948-952, Bangalore, India, 2019.
- [7] X. Hu, C. Zou, C. Zhang and Y. Li, Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs, IEEE Power and Energy Magazine, 15 (5), 20-31, 2017. <http://doi.org/10.1109/MPE.2017.2708812>.
- [8] M. A. Hannan, M. M. Hoque, S. E. Peng and M. N. Uddin, Lithium-Ion Battery Charge Equalization Algorithm for Electric Vehicle Applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 53 (3), 2541-2549, 2017. <http://doi.org/10.1109/TIA.2017.2672674>.
- [9] T. Kim, W. Song, D. Son, L.K. Ono, and Y. Qi, Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. Journal of Materials Chemistry A., Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. Journal of materials chemistry A. 7 (7), 2942-2964, 2019. <http://doi.org/10.1039/C8TA10513H>
- [10] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle, Applied energy, 211, 538-548, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.072>.
- [11] C. Zou, C. Manzie and D. Nešić, Model Predictive Control for Lithium-Ion Battery Optimal Charging, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 23 (2), 947-957, 2018. <http://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2798930>.
- [12] H. Ren, Y. Zhao, S. Chen, T. Wang, Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation, Energy, 166, 908-917, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.133>.
- [13] X. Tang, Y. Wang, C. Zou, K. Yao, Y. Xia, A novel framework for Lithium-ion battery modeling considering uncertainties of temperature and aging, Energy conversion and management, 80, 162-170, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.082>.
- [14] M. Bercibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mier, Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 572-587, <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.042>.

- [15] X. Hu, J. Jiang, D. Cao and B. Egardt, Battery Health Prognosis for Electric Vehicles Using Sample Entropy and Sparse Bayesian Predictive Modeling, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (4), 2645-2656, 2016. <http://doi.org/10.1109/TIE.2015.2461523>.
- [16] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea, Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices, *International Journal of Energy Research*, 41 (2), 151-181, 2016. <http://doi.org/10.1002/er.3598>.
- [17] S. Zhang, X. Guo, X. Dou, X. Zhang, A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis. *Journal of Power Sources*, 479, 228740, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228740>.
- [18] J. Yu, Health Degradation Detection and Monitoring of Lithium-Ion Battery Based on Adaptive Learning Method, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63 (7), 1709-1721, 2014. <http://doi.org/10.1109/TIM.2013.2293234>.
- [19] J. S. Goud, K. R and B. Singh, An Online Method of Estimating State of Health of a Li-Ion Battery, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36 (1), 111-119, 2021. <http://doi.org/10.1109/TEC.2020.3008937>.
- [20] Z. Wang, C. Yuan and X. Li, Lithium Battery State-of-Health Estimation via Differential Thermal Voltammetry With Gaussian Process Regression, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(1), 16-25, 2021. <http://doi.org/10.1109/TTE.2020.3028784>.
- [21] J. Bi, T. Zhang, H. Yu, Y. Kang, State-of-health estimation of lithium-ion battery packs in electric vehicles based on genetic resampling particle filter, *Applied Energy*, 182, 558-568, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.138>.
- [22] A. Allam, S. Onori, S. Marelli and C. Taborelli, Battery Health Management System for Automotive Applications: A retroactivity-based aging propagation study, *American Control Conference (ACC)*, pp. 703-716, 2015.
- [23] G. Sierra, M. Orchard, K. Goebel, C. Kulkarni, Battery health management for small-size rotary-wing electric unmanned aerial vehicles: An efficient approach for constrained computing platforms, *Reliability Engineering & System Safety*, 182, 166-178, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.res.2018.04.030>.
- [24] J. Yu, State-of-Health Monitoring and Prediction of Lithium-Ion Battery Using Probabilistic Indication and State-Space Model, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64 (11), 2937-2949, 2015. <http://doi.org/10.1109/TIM.2015.2444237>.
- [25] Y. Gao, K. Liu, C. Zhu, X. Zhang and D. Zhang, Co-Estimation of State-of-Charge and State-of-Health for Lithium-Ion Batteries Using an Enhanced Electrochemical Model, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69 (3), 2684-2696, 2022. <http://doi.org/10.1109/TIE.2021.3066946>.
- [26] Z. Ma, R. Yang, Z. Wang, A novel data-model fusion state-of-health estimation approach for lithium-ion batteries, *Applied energy*, 237, 836-847, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.071>.
- [27] G. You, S. Park, D. Oh, Oh, Real-time state-of-health estimation for electric vehicle batteries: A data-driven approach, *Applied energy*, 176: 92-103, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.051>.
- [28] K.M. Tsang, W.L. Chan, Chan, State of health detection for Lithium ion batteries in photovoltaic system, *Energy conversion and management*, 65, 7-12, 2012. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.006>.
- [29] X. Shu, G. Li, Y. Zhang, J. Shen, Z. Chen, Y. Liu, Online diagnosis of state of health for lithium-ion batteries based on short-term charging profiles, *Journal of Power Sources*, 471, 228478, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228478>.
- [30] X. Feng, C. Weng, X. He, X. Han, L. Lu, and D. Ren, Online State-of-Health Estimation for Li-Ion Battery Using Partial Charging Segment Based on Support Vector Machine, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68, 8583-8592, 2019. <http://doi.org/10.1109/TVT.2019.2927120>.
- [31] C. Weng, J. Sun and H. Peng, Model Parametrization and Adaptation Based on the Invariance of Support Vectors With Applications to Battery State-of-Health Monitoring, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64 (9), 3908-3917, 2015. <http://doi.org/10.1109/TVT.2014.2364554>.
- [32] C.P. Lin, J. C., F. Yang, M. H. Ling, K. L. Tsui, S.J. Bae, Battery state of health modeling and remaining useful life prediction through time series model, *Applied Energy*, 275, 115338, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.11.5338>.
- [33] Li, Y., et al., State-of-health estimation of lithium-ion batteries based on semi-supervised transfer component analysis, *Applied Energy*, 277, 115504, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115504>.
- [34] Y. Li, H. Sheng, Y. Cheng, D. I. Stroe, R. Teodorescu, Novel battery state-of-health online estimation method using multiple health indicators and an extreme learning machine. *Energy*, 160, 466-477, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115504>.
- [35] P. Shen, M. Ouyang, L. Lu, J. Li and X. Feng, The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (1), 92-103, 2018. <http://doi.org/10.1109/TVT.2017.2751613>.
- [36] X. Hu, H. Yuan, C. Zou, Z. Li and L. Zhang, Co-Estimation of State of Charge and State of Health for Lithium-Ion Batteries Based on Fractional-Order Calculus, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (11), 10319-10329, 2018. <http://doi.org/10.1109/TVT.2018.2865664>.
- [37] D. Liu, X. Yin, Y. Song, W. Liu and Y. Peng, An Online State of Health Estimation of Lithium-Ion Battery Using Unscented Particle Filter, *IEEE Access*, 6, 40990-41001, 2018. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2854224>.

- [38] H. Chaoui and C. C. Ibe-Ekeocha, State of Charge and State of Health Estimation for Lithium Batteries Using Recurrent Neural Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 66 (10), 8773-8783, 2017. <http://doi.org/10.1109/TVT.2017.2715333>.
- [39] N. Khan, F. U. M. Ullah, Afnan, A. Ullah, M. Y. Lee and S. W. Baik, Batteries State of Health Estimation via Efficient Neural Networks With Multiple Channel Charging Profiles, IEEE Access, 9, 7797-7813, 2021. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047732>.
- [40] P. E. Pascoe and A. H. Anbuky, Standby power system VRLA battery reserve life estimation scheme, IEEE Transactions on Energy Conversion, 20 (4), 887-895, 2005. <http://doi.org/10.1109/TEC.2005.853749>.
- [41] K. Goebel, B. Saha, and A. Saxena, A comparison of three data-driven techniques for prognostics, 62nd Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology (MFPT), pp. 119-131, Virginia Beach, VA, 2008
- [42] J. Wu, Y. Wang, X. Zhang, Z. Chen, A novel state of health estimation method of Li-ion battery using group method of data handling, Journal of Power Sources, 327, 457-464, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.065>.
- [43] Group, C.B. <https://web.calce.umd.edu/batteries/data.Htm#>, Erişim Zamanı:12.05.2021.
- [44] D. A. Pola et al., Particle-Filtering-Based Discharge Time Prognosis for Lithium-Ion Batteries With a Statistical Characterization of Use Profiles, IEEE Transactions on Reliability, 64 (2), 710-720, 2015. <http://doi.org/10.1109/TR.2014.2385069>.
- [45] S. S. Sheikh, M. Anjum, M. A. Khan, S. A. Hassan, H. A. Khalid, A. Gastli, L. A. Ben-Brahim, Battery Health Monitoring Method Using Machine Learning: A Data-Driven Approach, Energies 13, 3658. <https://doi.org/10.3390/en13143658>
- [46] S. Elasan, Veri Madenciliğinde Farklı Karar Ağaçları ve K-En Yakın Komşuluk Yöntemlerinin İncelenmesi: Kadın Hastalıkları ve Doğum Verisinde Bir Uygulama. Doktora Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [47] R. Goyal, P. Chandra, Y. Singh, Suitability of KNN regression in the development of interaction based software fault prediction models, Ieri Procedia, 6, 15-21, 2014. <http://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.03.004>.
- [48] T. Hastie, R. Tibshirani and J. Friedman The Elements of Statistical Learning. Chapter 6, Springer Verlag, New York, 2001.
- [49] O. Anava and K. Levy, k\*-nearest neighbors: From global to local, Advances in neural information processing systems, 29, 4923-4931, 2017.
- [50] D. Wettschereck and T. Dietterich, Locally adaptive nearest neighbor algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems, 6, 184-191, 1993.
- [51] S. Sun and R. Huang, An adaptive k-nearest neighbor algorithm, Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, pp. 91-94, 2014.
- [52] S. Uğuz, Makine öğrenmesi teorik yönleri ve python uygulamaları ile bir yapay zeka ekolü, Nobel Yayıncılık. Ankara, 2019.
- [53] W. Sullivan, Machine Learning For Beginners Guide Algorithms: Supervised & Unsupervised Learning, Decision Tree & Random Forest Introduction, Healthy Pragmatic Solutions Inc, 2017.
- [54] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani, An introduction to statistical learning, Springer, 112, 2013.
- [55] L. Breiman, Random forests. Machine learning, 45 (1), 5-32, 2001..
- [56] K. Özkan, Sınıflandırma ve regresyon ağacı tekniği (SRAT) ile ekolojik verinin modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 13 (1), 1-4, 2012.
- [57] M. Ercire ve A. Ünsal, Kısa Süreli Güç Kalitesi Bozulmalarının Dalgacık Analizi ve Rastgele Orman Yöntemi ile Sınıflandırılması, Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering. 26 (3), 903-920, 2021. <http://doi.org/10.17482/uumfd.976342>.
- [58] F. Rufus, S. Lee and A. Thakker, Health monitoring algorithms for space application batteries, International Conference on Prognostics and Health Management, pp. 1-8, 2008. <http://doi.org/10.1109/PHM.2008.4711430>.





# Yağlı tip transformatörlerde hibrit bir soğutma sistem tasarımının FEM ve CFD analizleri

## FEM and CFD analysis of a hybrid cooling system design in oil-type transformers

Murat Tören<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize Türkiye

### Öz

Yağlı tip transformatörler (YTT), elektrik enerjisinin iletim ve dağıtım sürecinde yüksek kullanıma sahip elektrik makineleridir. Bu transformatörler üretim maliyetlerinin düşük olması ve kullanım alanının geniş olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin dağıtım sistemi içerisinde transformatörlerin yaklaşık % 80-85'i YTT den oluşmaktadır. Bu veriler dikkate alındığında yağlı tip transformatörlerin çalışmaları, performans parametreleri ve bunları etkileyen soğutma sistemlerinin önemi de artan ölçüde ön plana çıkmaktadır. YTT'nin soğutulması genel olarak trafo yağı da denilen naftanik / parafinik bazlı yağlarla sağlanmaktadır. YTT'de soğutma amaçlı olarak yağların kullanılması, çevre kirliliğine neden olduğu gibi işletme, bakım-onarım faaliyetleri için yüksek maliyet gerektirmektedir. Günümüzde, transformatörlerin alternatif yöntemler ile soğutulması için, güncel ve disiplinler arası araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada ise 5kVA YTT'de çalışma sırasında oluşan ısının hibrit bir sistemi ile mahfaza hacminin belirli oranlarda su ve yağ akışkanları kullanılarak soğutulması sağlanmaktadır. Tasarlanan hibrit soğutma sistemi sonlu elemanlar metodu (FEM) ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile analiz edilerek sonuçlardan YTT faydalı ömrünün 5.48 – 166.6 saate kadar artırılabilirliği incelenmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Yağlı tip transformatör, FEM, CFD, Hibrit soğutma, Faydalı ömür

### 1 Giriş

Transformatörler, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım için oldukça önemli bir unsurdur. Transformatörlerin çalışma esnasında meydana gelen ısının transfer edilmesi için soğutulmaları gerekmektedir. Soğutma türlerine göre genel olarak kuru tip ve yağlı tip olarak iki başlık altında transformatörler sınıflandırılmaktadır. Yüksek gerilim olarak adlandırılan 1 kV üstü ve alçak gerilim şebekesi olarak adlandırılan 1 kV altı elektrik şebeke sisteminde, yağlı tip transformatörler daha yoğunlukla kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni, diğer transformatör tiplerine (kuru tip, SF6 gazlı soğutma vb.) göre, düşük kurulum maliyeti gerektirmeleri ile güç ve dağıtım sistemlerinde çeşitli büyüklüklerde üretilebilmeleridir. Soğutma malzemesi

### Abstract

Oil-type transformers (YTT) are electrical machines with high usage in the transmission and distribution process of electrical energy. These transformers are widely used due to their low production costs and wide usage area. In the distribution system of electrical energy, approximately 80-85% of transformers consist of YTT. When these data are taken into account, the importance of the operation, performance parameters and the cooling systems that affect them come to the fore increasingly. The cooling of YTT is generally provided with naphthenic / paraffinic based oils, also called transformer oil. The use of oils for cooling purposes in YTT causes environmental pollution and requires high costs for operation, maintenance-repair activities. Today, current and interdisciplinary researches are carried out for the cooling of transformers with alternative methods. In this study, with a hybrid system, the heat generated during operation at 5kVA YTT is provided to cool the enclosure volume by using water and oil fluids at certain rates. The designed hybrid cooling system is analyzed with the finite element method (FEM) and computational fluid dynamics (CFD), and it is examined from the results that the YTT life cycle can be increased up to 5.48 - 166.6 hours.

**Keywords:** Oil type transformer, FEM, CFD, Hybrid cooling, Life cycle

olarak yağların kullanıldığı YTT, düşük maliyetli olarak üretilmesine rağmen, işletme ve bakım-onarım maliyetleri fazladır. Ayrıca, soğutmada kullanılan yağların yanıcı ve patlayıcı özellikte olması, çevre kirliliğine sebep olması, yağlı tip transformatörlerin diğer dezavantajları olarak gösterilebilir [1]. Bu dezavantajların asgari seviyeye düşürülmesi, maliyetlerin azalması ve transformatörün kullanım ömrünün artmasına neden olacaktır.

Bu sebeple, önerilen çalışma ile yağlı tip transformatörlerde soğutma amaçlı kullanılan yağın miktarı azaltılarak yerine daha iyi ısı transfer özelliğine sahip nanopartiküler akışkanlar kullanılarak hibrit bir soğutma sistemi tasarlanması amaçlanmaktadır. Bu sistemin gerçekleşmesiyle, daha çevreci olan, yanıcı ve patlayıcı riskleri azaltılmış, bakım-onarım maliyeti daha düşük ve

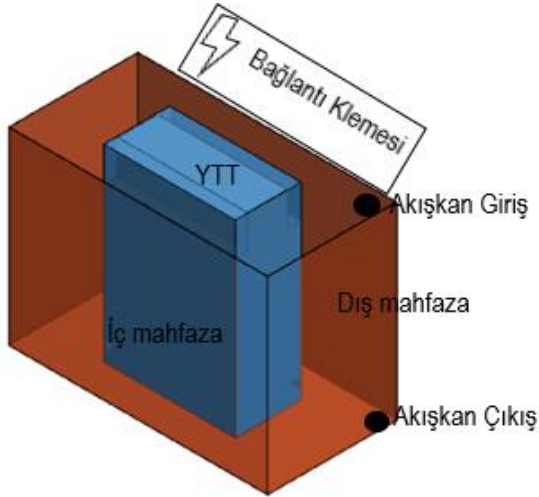
\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: murat.toren@erdogan.edu.tr (M. Tören)

Geliş / Received: 27.05.2022 Kabul / Accepted: 26.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1122317

kullanım ömrünün artmasına bağlı olarak işletme maliyetleri daha az olan hibrit bir soğutma sağlanacaktır. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde transformatörlerdeki soğutma sistemlerinin, transformatörün gücüne ve kullanıldığı yere göre değişiklik gösterecek şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir [2]. Ancak, yapılan sınıflandırmalar ve soğutmada kullanılan geleneksel malzemeler üzerinden değerlendirmeler yapıldığı, soğutma sınıflandırması ve soğutma malzemesi, standardı oluşturulamamıştır. Dolayısıyla, elektrik makinelerinin soğutulması için gerçekleştirilen çalışmalarda, transformatörlerin ömür kaybı analizi yapılarak, kullanım ömürlerinin uzun olabilmesi için en sıcak noktalar belirlenerek bu sıcaklık değerlerinin faydalı ömürdeki yüzdelik kayıpları ve kullanım (faydalı) ömrünün değerlendirilmesi araştırılmıştır [3–6]. Son zamanlarda, yağlı tip transformatörlerin soğutulmasında kullanılan naftanik ya da parafinik bazlı yağların yerine, ester ve silikon bazlı yağlar kullanıldığı görülmektedir [7–12]. Tüm bu çalışmalarda, yağlı tip transformatörün, iyi bir ısı transferi ile soğuması sağlanmaktadır. Ayrıca, bakım-onarım maliyetlerinin de düşürüldüğü görülmektedir. Ancak ester ve silikon bazlı yağlar ile son yıllarda geliştirilen ısı iletkenliği artırılmış diğer transformatör soğutma yağları, endüstride ilk günden bu güne kullanılan geleneksel transformatör soğutma yağlarına göre üstün özelliklere sahip olsa da, yağın belirli bir süre sonra morfolojisinin bozulması ve çevre kirliliği oluşturması hala daha en önemli sorunlar olarak dikkat çekmektedir.

Bu yüzden, transformatörlerin soğutulmasında Şekil 1 'de görülen hibrit bir soğutma mahfazası tasarlanarak transformatörün bulunduğu hacimde ısı transferinin en optimum seviyede olması sağlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 1. YTT Hibrit Soğutma Mahfazası Görüntüsü

Bu tasarımda yağ ve suyun ısı transferi için akışkan olarak farklı hacimsel oranlarla kullanıldığı farklı mahfaza tasarımları FEM ve CFD analizleri ile incelenerek, yağlı tip transformatör soğutulmasında kullanılan yağ oranının ve yağın uzun süreler kullanımına bağlı oluşan dezavantajlarının azaltıldığı optimum hacimsel dağılımlı endüstriyel, çevre dostu olarak çalışan ve faydalı ömrü daha

uzun olan hibrit soğutma sistemli YTT mahfazası elde edilebilecektir. Tasarlanması amaçlanan sistem sağlayacağı avantajlar yanı sıra kısa süreli kullanımlarda gerek duyulan dağıtım türü vb. transformatörlerde ek maliyet gerektiren durumu, soğutma sıvısı olarak suyun kullanımından kaynaklanabilecek mahfazada oluşabilecek deformasyonlar dolayısıyla da dezavantaj oluşturabilir ancak orta ve uzun süreli kullanımlar bu maliyetlerin faydalı ömürde sağlanacak faydayla giderilebileceğini gösterecektir.

## 2 Materyal ve metot

Yağlı tip transformatörde, nominal koşullarda çalışma esnasında meydana gelen ısınmalar; bakır kayıpları, kaçak kayıplar, nüve ve çekirdekdeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Transformatör faydalı ömür olarak belirlenen süresi içerisinde bu kayıplar sonucu oluşan ısının transferi için soğutma sistemleri tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada kullanılacak olan ve IEEE Std C57.91-1995 [13] ve IEC 60076-11 [14] standartlarına göre belirlenen çalışma koşullarında oda sıcaklığı 30°C olan ortamda çalışacak şekilde tasarlanan yağlı tip transformatörün, teknik özellikleri ve üretim parametreleri Tablo 1 'te verilmektedir.

Tablo 1. Yağlı tip transformatör özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Güç	VA	5000
Primer Sargı Gerilimi	V	380
Sekonder Sargı Gerilimi	V	220
Frekans	Hz	50
Sargı Grubu	-	Yzn-11
Standartlar	-	IEEE Std C57.91-1995-IEC 60076-11
Nominal gerilimdeki empedans	%	6.0
Soğutma	-	Hibrit
Sargı İletken Türleri	-	Bakır

Transformatördeki çekirdek (nüve) malzemesinde oluşan demir kayıpları, histerezis etkisinden dolayı meydana gelen kayıplar ( $P_h$ ) Denklem 1 'de ve ( $P_e$ ) ile ifade edilen girdap akımları dolayısıyla oluşan girdap (eddy akımları) akımı kayıpları da Denklem 2 'te verilen şekliyle elde edilmektedir. Bu kayıplar, bobin üzerinden değişken akım akıtıldığında, çekirdek gövdesi üzerinden indüklenen gerilimin, sebep olduğu akımlardır [15].

$$P_h = \sigma_h * f * B_m * G_{fe} \quad (1)$$

Burada,  $\sigma_h$ ,  $f$ ,  $B_m$  ve  $G_{fe}$  sırasıyla, histerezis kayıp faktörü, frekans değeri, akı yoğunluğu ve demir çekirdek kütleliğini ifade etmektedir.

$$P_e = \sigma_e * f^2 * B_m^2 * G_{fe} \quad (2)$$

**Denklem 2'**te,  $\sigma_e$ , malzemeye bağlı olarak değişen Eddy sabitidir.

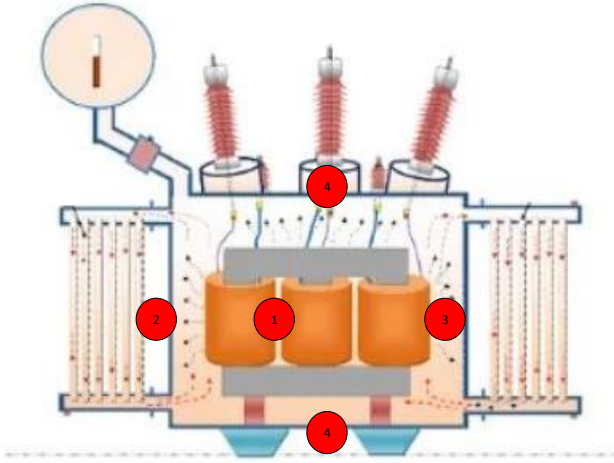
Transformatörlerde ısının yaklaşık olarak  $\frac{3}{4}$ 'ünü sargılarından geçen akımın ( $I$ ) meydana getirdiği kayıplar meydana getirmektedir. Bu kayıplar ise, bakır kayıplarıdır ve **Denklem 3'**te verilmektedir.

$$P_{cu} = I^2 R \quad (3)$$

Bu çalışmada kullanılacak olan 5kVA YTT'nin kayıplar dolayısıyla oluşan ısının transferinde ise şu ısı transfer yöntemlerinden faydalanılır.

### 2.1 Yağlı tip transformatörde ısı transferi

Yağlı tip transformatörün çalışması sırasında, meydana gelen kayıplarla oluşan ısının transferi, dört farklı noktadan farklı ısı transfer yolları ile gerçekleştirilmektedir. Söz konusu ısı transfer yolları **Şekil 3'**te gösterilmektedir



**Şekil 3.** Yağlı tip transformatörde ısı transfer noktaları[16]

1. Sargılar arasında ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşir. **Denklem 4'**da verilen silindirik koordinatlardaki ısı transfer denklemi ile ısınma değeri elde edilmektedir [3].

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = - \frac{\dot{q}}{k_u} \quad (4)$$

Burada,  $\dot{q}$  spesifik kayıp yoğunluğu ( $W/m^3$ ),  $T$  sıcaklık ve  $k_u$  birim ısı iletkenliğidir ( $W/mK$ ).

2. Dış yüzeyde yağlı tip transformatör ısı transferi doğal taşınım ve ışınım yoluyla gerçekleşir. Dış yüzeylerin ışınım ile ısı transferinde **Denklem 5** ve **6'**de verilen eşitlikler kullanılır [17].

$$q_r = \frac{q_r}{A} = \varepsilon \sigma A (T_w^4 - T_a^4) = h_r (T_w - T_a) \quad (5)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_w^3 + T_w T_a^3 + T_w^2 T_a + T_a^3) \quad (6)$$

3. Burada,  $q_r$  ışınım ile ısı transferinde  $z$  düzleminde  $Z$  mesafesi boyunca transfer edilen ısı olup ışınım ile ısı transfer katsayısı  $h_r$ 'dir. Dış yüzeylerin taşınım ile ısı transferinde kullanılan eşitlikler **Denklem 7-10** 'de verilmektedir[18].

$$q_{co} = \frac{q_{co}}{A} = h_{co} (T_w - T_a) \quad (7)$$

$$h_{co} = \frac{Nu_z k_{air}}{Z} \quad (8)$$

$$\overline{Nu_z} \cong \left[ \frac{4Pr^2 Gr^*}{36 + 45Pr} \right]^{1/5} \quad (9)$$

$$Gr^* = \frac{g \beta \overline{q_{co}} Z^4}{k_{air} \nu^2}, 10^5 \leq Gr^* \leq 10^{10} \quad (10)$$

**Denklem 7-10'**da,  $q_{co}$  taşınım ile transfer edilen ısı,  $k_{air}$  yağın ısı iletkenliği,  $h_{co}$  taşınım ile transfer edilen ısı iletim katsayısı,  $Pr$  Prandtl sayısı,  $Gr$  Grashoff sayısı,  $\overline{q_{co}}$  dış yüzeyin ortalama ısı akısı,  $\beta$  yağın volumetrik genişleme katsayısı ( $1/K$ ),  $\nu$  kinematik viskozite ( $m^2/sec$ ),  $g$  yerçekimi ivmesi ( $m/sec^2$ ),  $Z$  dikey uzunluğu (m) ifade etmektedir.

4. Sargılar arasında ve yağlı tip transformatör kabininde yer alan yağın olduğu kısımda ısı transferi taşınım yoluyla gerçekleşir. Bu bölgedeki ışınım ısı transferi durumu, iletim ısı transferi durumu ile taşınım ısı transferine göre küçük değerlerde olup ihmal edilebilir [3]. Dolayısıyla bu kısımda hesap edilen ısı transferi taşınım ve iletim ile elde edilen ısı transfer değeridir. Yağlı tip transformatörün üst kısmından görülebilecek sargılar ve aralarındaki yağ olan kısımların ısı transfer katsayısının hesaplanmasında Miyatake ve Fujii tarafından önerilen Nusselt bağlantıları kullanılabilir [19,20]. Bu bağlantılar, **Denklem 11-14'**de verilmektedir.

$$q_{cd} = \frac{q_{cd}}{A} = h_{cd} (T_w - T_a) \quad (11)$$

$$h_{cd} = \frac{Nu_z k_{oil}}{b} \quad (12)$$

$$\overline{Nu_z} \cong C_1 (1 + R)^{\frac{1}{6}} \psi_z^{\frac{1}{3}}, \psi_z \leq 60^\circ \quad (13)$$

$$\overline{Nu_z} \cong C_2 \left[ (1 + R) \left[ \frac{1}{\psi_z} \left( \frac{24}{1+R} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{9}{70} \right] + \frac{1}{2} \right]^{-1}, \psi_z \geq 60^\circ \quad (14)$$

Burada,  $C_1=0.697$  ve  $C_2 = 1$  değerleri Miyatake ve Fujii tarafından hesaplanmış olup,  $q_{cd}$  taşınım ile transfer edilen ısı ( $W/m^2$ ),  $h_{cd}$  taşınım ile transfer edilen ısı iletim katsayısı ( $W/m^2K$ ),  $R$  iç duvar ve dış duvar için ortalama ısı akısı eşitliği,  $a$  boyunduruk genişliği (m),  $b$  hava kanalı genişliği (m),  $L$  toplam kanal yüksekliği (m),  $N$  boyunduruk sayısıdır.

5. Üst ve alt yüzeylerde ise taşınım ve ışıma olabilir ancak yağ ve diğer akışkan hızları ve diğer farklı parametrelerin karmaşıklığından dolayı ihmal edilir.

Ayrıca ısıl analiz için kullanılacak momentumun ve enerjinin korunumu denklemleri ile sıvı akışkanlar için Laminer akışında kullanılacak eşitlikler **Denklem 15-20**'de verilmektedir [17]. **Denklem 15**, akış alanı Kartezyen koordinat sistemi ile tanımlandığında; sıkıştırılmaz akıştaki süreklilik denklemdir. **Denklem 16-18** momentum denklemlerini ifade ederken, **Denklem 19-20** enerji denklemleridir.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = X_f - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = Y_f - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = Z_f - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (18)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \mu \Phi \quad (19)$$

$$\Phi = 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (20)$$

Laminer akışlarda geçerlilik gösteren bu denklemlerde kullanılan  $X_f, Y_f$  ve  $Z_f$  parametreleri x, y ve z yönlerindeki birim hacime düşen kuvvetleri tanımlarken, **Denklem 22**'de verilen  $\Phi$  ile gösterilen yayılım denklemini ise viskoziten kaynaklanan kuvvetin akışkan parçacıkları üzerinde yaptığı geri dönüşümü olmayan iş miktarını göstermektedir. Tasarlanan mahfaza boyut değerleri Laminer akış için **Denklem 16-20**'de verilen momentum ve enerji eşitlikleri çoğu zaman akış yapılarının karmaşıklığı nedeniyle analitik çözüme olanak sağlamadığından integral metodunun kullanışlı yaklaşık çözüm yöntemleri kullanılır. İki boyutlu, sıkıştırılmaz, sürekli akışlar için momentum ve enerji integral denklemleri sırasıyla, **Denklem 21** ve **22**'deki gibi olur.

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx} (H+2) = \frac{C_f}{2} \quad (21)$$

$$\frac{d}{dx} \int_0^{\delta_T} (T_\infty - T) u dy = -\frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (22)$$

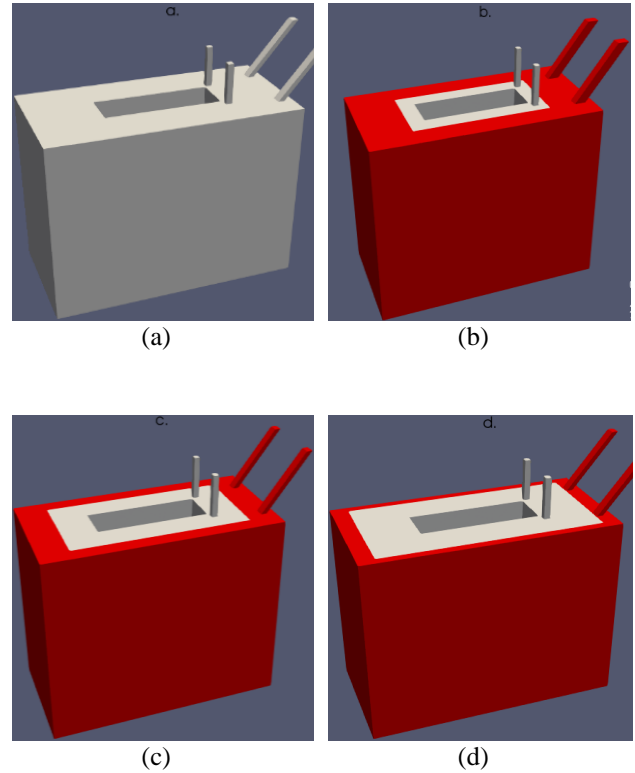
Burada  $C_f$  sürtünme katsayısı,  $T$  sıcaklık değerleri,  $H$  şekil parametresi,  $C_p$  öz ısı,  $\rho$  öz iletkenlik katsayısıdır. Çalışmada kullanılacak iki sıvı alanının akış ve ısı transferi çözümü *chtMultiRegionFoam* adlı ısı transferi çözücü ile gerçekleştirilecektir. Simülasyon sürecinde hız ve basıncın birleştirilmesine *Pimple algoritması* kullanılacaktır. Konveksiyon terimlerin çözümünde *second-order upwind* şeması, difüzyon terimlerinde ise *second-order central difference* şeması kullanılacaktır. Süreklilik ve momentum denkleminin yakınsama kriteri  $10^{-6}$ , enerji denkleminin yakınsama kriteri olarak ise  $10^{-7}$  seçilecektir.

## 2.2 Yağlı tip transformator hibrit mahfaza tasarımı

Yapılacak çalışmada, YTT farklı oranlarda yağ ve suyun termal sıvı olarak kullanılarak ısıl performansı dört farklı mahfaza tasarımı ile araştırılacaktır:

- Tamamen yağ
- 1/4 oranında yağ
- 1/2 oranında yağ
- 3/4 oranında yağ

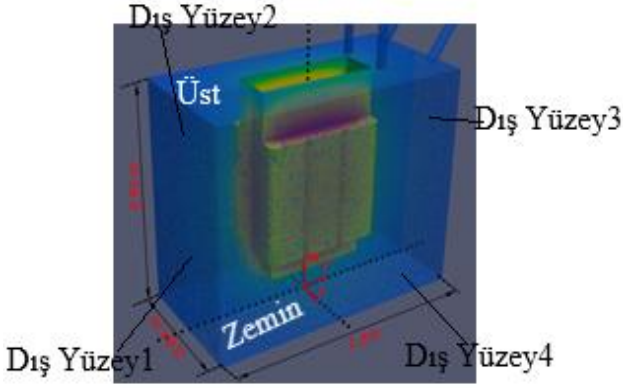
Senaryolardaki yağ ve su oranları farklı mahfazalar **Şekil 5**'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.** YTT Mahfazasında yağ ve su oranları; (a) tamamen yağ, (b) 1/4 yağ-3/4 su, (c) 1/2 yağ-1/2su, (d) 3/4 yağ-1/4 su.

Tasarlanacak YTT mahfazasının tasarım boyutları **Şekil 6**'da görüldüğü gibi belirlenmektedir. Mahfazanın dış kısmı 2mm çelik sac levhadan, iç kısmındaki YTT konulacak yağ-

su akışkan ayrımı yapılan kısım ise 1-1.5 mm kalınlıkla çelik sac levha olarak tasarlanmaktadır.



Şekil 6. Tasarlanan mahfaza boyut değerleri

### 3 Bulgular ve tartışma

Yapılacak olan çalışmada, 5 kVA gücündeki yağlı tip transformatörün mahfaza tasarımı Solidworks 'de iki ve üç boyutlu olarak tasarlandıktan sonra sırasıyla aşağıda belirtilen yazılımlar kullanılarak benzetim analizleri yapılacaktır:

- Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak, Sonsuz elemanlar metodu (FEM) ile elektromanyetik analiz yapılacak ve kayıp güç verileri elde edilecektir.
- Salome yazılımı ve OpenFoam SnappyHexMesh yöntemi kullanılarak, fiziksel model ve buna karşılık gelen ağ sistemi tasarlanacaktır.
- Sonrasında ise kayıp güç verileri ile Open FOAM' da ısı analiz yapılacaktır.

Yapılacak çalışmada YTT yüzeylerin ısı iletim katsayısı 85 W/mK seçilmiştir. Çevre sıcaklığı ise 30 °C seçilmiştir. Ayrıca yüzeylerde oluşan ısı şartları ise Tablo 2 'de verildiği gibi olacaktır.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Transformatörün yüzeyler için seçilen sınır şartları

Sınır şartı	T (K)	
YTT	400	YTT yüzeyinin akış alanına ısı transferi 150 W
Dış yüzey1	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Dış yüzey2	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$
Dış yüzey3	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$
Dış yüzey4	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Üst Kısım	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Üst-Dış yüzey	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=5W/m^2K$
Zemin	300	Dış yüzeyin ısı taşınım katsayısı $h=3W/m^2K$

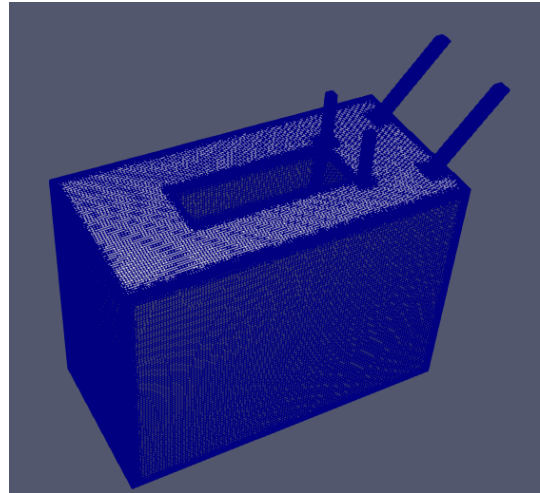
Buna göre 4 farklı mahfaza tasarımı ile yapılan analizler ve elde edilen bulgular şu şekilde elde edilmektedir.

#### 3.1 Isıl sıvının tamamen yağ olduğu durum

Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryodaki mesh yapısı Şekil 7'de gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 1590069'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve %50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Bu çerçevede yürütülen simülasyonlar sonucunda YTT'nin farklı mesh sayılarında hesaplanan ortama ısı taşınım katsayısı (h) Tablo 3'de verilmiştir. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %0.6 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.9 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

Tablo 3. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları (h).

Mesh Sayıları	1590069	1987689	2385328
h(W/m <sup>2</sup> K)	1.41105	1.42004	1.39805

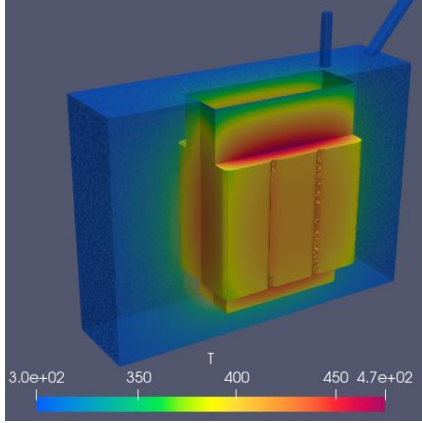


Şekil 7. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfazadaki mesh yapısı.

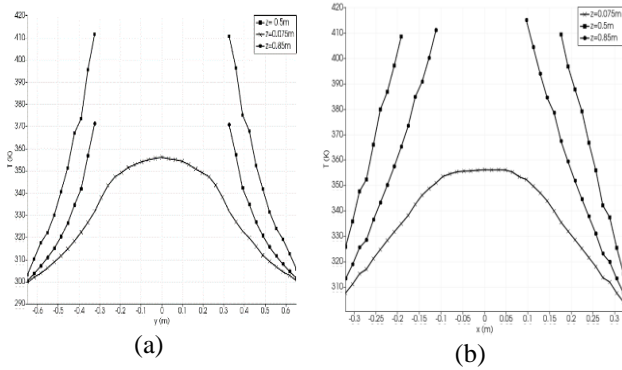
Isıl sıvının tamamen yağ olduğu senaryoda akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 470°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinde sıcaklık 320-470°K arasında değişmektedir. Yine yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 398 °K olarak tespit edilmiştir. Sonuçları detaylandırmak amacıyla akış alanında  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları ve  $y=0$  noktasında xz düzlemindeki,  $z=0.075,$



0.5, 0.85 noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 9' da gösterilmiştir.



Şekil 8. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 9. Isıl sıvının tamamen yağ olduğu Mahfaza akış alanında (a)  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve (b)  $y=0$  noktasında xz düzlemindeki  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımı

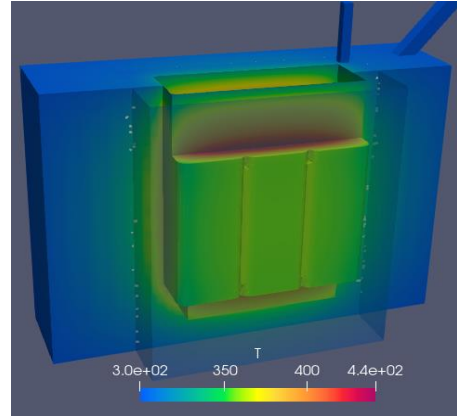
### 3.2 Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu durum

Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayısı Tablo 4'de gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2658970'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %1.3 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.72 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

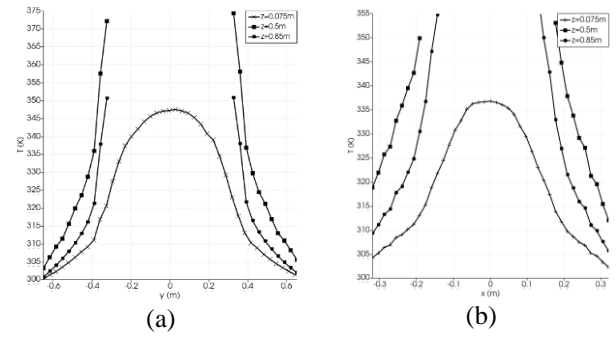
Tablo 4. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları

Mesh Sayıları	2658970	3323542	3988155
$h(W/m^2K)$	2.47905	2.512584	2.497023

Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere YTT'nin üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan  $440^{\circ}K$  ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda YTT yüzeyinde sıcaklık  $320-440^{\circ}K$  arasında değişmektedir. Ayrıca trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı  $365^{\circ}K$  olarak ölçülmektedir. Benzer olarak akış alanında  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları ve  $y=0$  noktasında xz düzlemindeki  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 11'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 11. Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a)  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenı boyunca, (b)  $y=0$  noktasında xz düzlemindeki  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenı boyunca ki sıcaklık dağılımları

### 3.3 Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu durum

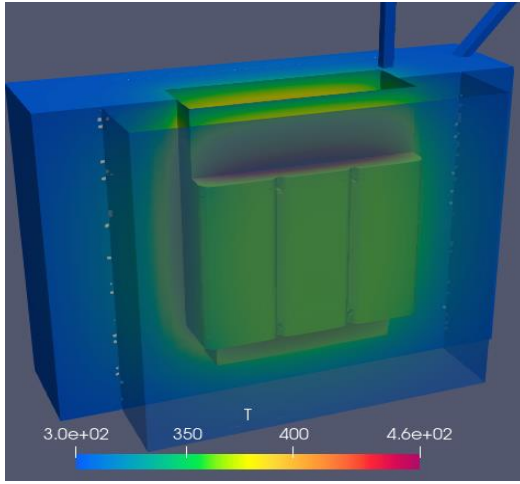
Isıl sıvının 1/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayısı Tablo 5'te gösterilmiştir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2715162'dir. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı

tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %1.1 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %0.85 olmaktadır. Sapmanın çok düşük seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

**Tablo 5.** Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları.

Mesh Sayıları	2715162	3393825	4072896
$h(W/m^2K)$	2.01333	2.035476	2.030443

Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 12’de gösterilmiştir.



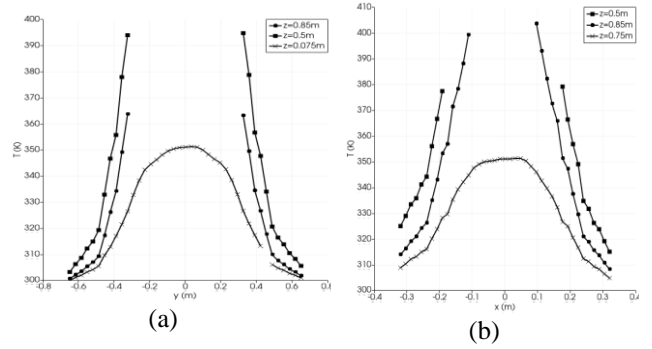
**Şekil 12.** Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.

Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 458°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda YTT yüzeyinde sıcaklık 319-458°K arasında değişmektedir. Ayrıca YTT yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 380°K olarak ölçülerek belirlenmektedir. Sonuç olarak elde edilen sıcaklık değerlerini akış alanında  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları Şekil 13(a) da ve  $y=0$  noktasında Şekil 13(b) deki gibi gösterilmiştir.

### 3.4 Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu durum

Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazadaki mesh sayısı ve ısı taşınım katsayıları Tablo 6’da olduğu gibi elde edilmektedir. Tanımlanan akış alanının mesh sayısı 2735104’dır. İlk etapta meshten bağımsız çözüm elde etmek için optimal şekilde tanımlanan mesh sayısından yaklaşık olarak %25 ve 50 daha fazla iki akış alanı daha tanımlanmıştır. Tasarlanan mesh sayısından yaklaşık %25 daha fazla bir mesh ile akış alanı tanımlandığında ısı taşınım sayısındaki sapma %0.92 olmaktadır. %50 daha fazla mesh sayısında ise sapma %1.26 olmaktadır. Sapmanın çok düşük

seviyelerde olmasından dolayı yürütülen simülasyon sonuçları meshten bağımsızdır.

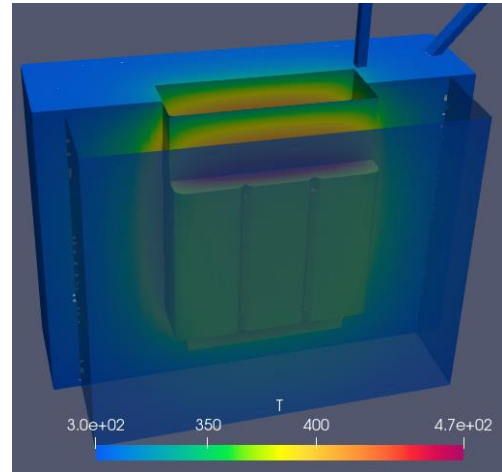


**Şekil 13.** Isıl sıvının 1/2 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a)  $x=0$  noktasında yz düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenini boyunca, (b)  $y=0$  noktasında xz düzlemindeki  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında y eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları

**Tablo 6.** Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu senaryo için farklı mesh sayılarında yürütülen simülasyonlarda trafonun hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları

Mesh Sayıları	2735104	3418126	4102842
$h(W/m^2K)$	1.52468	1.538707	1.543891

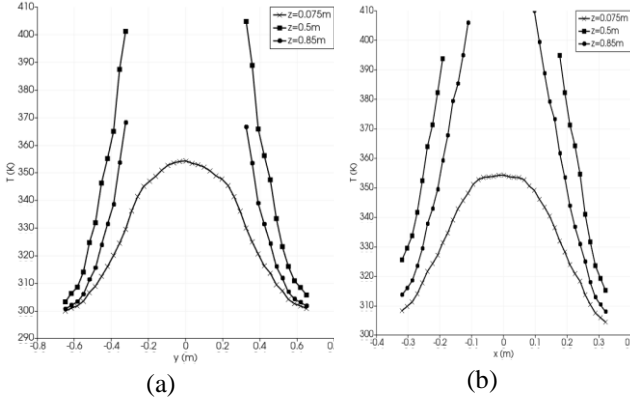
Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu mahfazada akış alanı boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 14’de gösterilmiştir.



**Şekil 14.** Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanındaki sıcaklık dağılımı.

Şekilden görüleceği üzere trafonun üst ve alt kısmındaki yatay yüzey üzerinde sıcaklık maksimum değeri olan 467°K ulaşmaktadır. Yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinde sıcaklık 320-467 °K arasında değişmektedir. Yine yapılan hesaplamalarda trafo yüzeyinin ortalama yaklaşık sıcaklığı 380°K olarak tespit edilmiştir. Buradaki sıcaklık dağılımları

da  $x=0$  noktasında  $yz$  düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında  $y$  eksenini boyunca Şekil 15 (a) ile  $y=0$  noktasında  $xz$  düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında  $x$  eksenini boyunca Şekil 15 (b) de görüldüğü gibi elde edilmektedir.



**Şekil 15.** Isıl sıvının 3/4 yağ geri kalanın su olduğu Mahfaza akış alanında (a)  $x=0$  noktasında  $yz$  düzlemindeki ve  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında  $y$  eksenini boyunca, (b)  $y=0$  noktasında  $xz$  düzlemindeki  $z=0.075, 0.5, 0.85$  noktalarında  $x$  eksenini boyunca ki sıcaklık dağılımları

Burada yapılan ısıl analizler sonucunda çerçevesinde aynı sınır şartlarında yürütülen simülasyonlarda 5kVA YTT ısı üreten bileşenini ısı taşınım katsayısı Tablo 7’de verilmiştir. Bu değerlere göre en düşük ısı transfer katsayısı ısıl sıvının tamamen yağ olduğu durumda meydana gelmiştir. En yüksek ısı transfer katsayısı ise 1/4 yağ oranındaki senaryoda meydana gelmektedir. Dolayısıyla ısıl performans açısından en iyi durum 1/4 yağ oranına sahip mahfaza tasarımıyla elde edilmektedir. Söz konusu durumda ısı transfer katsayısındaki artış tamamen yağ durumuna göre %75.69 olmaktadır.

**Tablo 7.** Hibrit Mahfazalardaki YTT soğutma sistemlerinin ısı taşınım katsayıları

Senaryo	H(W/m <sup>2</sup> K)
Tamamen yağ	1.41105
1/4 oranında yağ	2.47905
1/2 oranında yağ	2.01333
3/4 oranında yağ	1.52468

Yapılan ısıl analiz neticesinde tasarlanan hibrit soğutma sisteminde nominal yük koşullarında çalıştırılan YTT’nin çalışma süresi sonunda nüve ve sargılarında oluşan en yüksek sıcaklık değerine göre faydalı ömründe meydana gelecek IEEE C57.91-1995 standardına göre elde edilen faydalı ömründen %0.00133 kayba uğrama süreleri de Tablo 8 ile verilen değerler olarak elde edilmektedir. Bu değerlere

göre YTT faydalı ömrü 1/4 yağ ve 3/4 su olan hibrit bir soğutma sistemi ile çalıştırılırsa faydalı ömründen %0.0133 lük kısmının 166.6 saat sonra kaybetmektedir.

**Tablo 8.** Hibrit Mahfazalardaki YTT soğutma sistemlerinin Faydalı Ömre Etkisi

En sıcak noktanın sıcaklığı	Yaşlanma ivme faktörleri	% 0.0133 lük kayba ulaşılan zaman (saat)	Transformatörün Soğutulma Senaryoları
398 K -125°C	4,376	5,48	Tamamen yağ
325 K - 92°C	0,144	166,6	Hibrit (1/4 yağ, 3/4 su)
380 K - 107°C	0,734	17,616	Hibrit (1/2 yağ, 1/2 su)
380 K - 106°C	0,661	36,30	Hibrit (3/4 yağ, 1/4 su)

#### 4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde yoğun kullanıma sahip YTT transformatörler için tasarlanan hibrit soğutma yapabilecek bir sistemin manyetik ve ısıl analizleri yapılmıştır. Burada tasarlanan soğutma sisteminde farklı oranlarda ısı transfer akışkanı olarak transformatör yağı ve su kullanılmıştır. Bu akışkanların Tamamen yağ, 1/4 oranında yağ -3/4 oranında su, 1/2 oranında yağ- 1/2 oranında su ve 3/4 oranında yağ- 1/4 oranında su kullanılarak yapılan ısıl analizlerinde yağ miktarının azaldığı, YTT ile teması olmayan dış mahfazada su miktarının fazla olduğu 1/4 yağ-3/4 su oranlı mahfaza tasarımında ısı taşınım katsayısının 2.47905 W/m<sup>2</sup>K değeri ile en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. YTT için elde edilen bu ısı taşınım katsayısı YTT’nin standartlarla belirlenen faydalı kullanım ömründe ise 166.6 saat sonunda %0.0133 lük kaybın oluşmasını sağlamaktadır. Buna göre de YTT’lerin yağ oranının azaltıldığı, soğutma akışkanının oranının fazla olduğu daha ekonomik ve daha uzun kullanım ömrüne sahip bir soğutma sistemli hibrit mahfaza tasarlanıp üretilebileceği değerlendirilmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %5

#### Kaynaklar

- [1] I. Iskender, A. Mamizadeh, Nonlinear Thermal Modeling of Indoor and Outdoor Oil – Immersed Power Transformers, J. Electr. Eng., 60, 321–327, 2009.
- [2] D. Aşkın, Kuru Tip Transformatörlerin Sargı Sıcaklık Davranışının Yapay Sinir Ağları Kullanarak Modellenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2011.
- [3] E. Rahimpour, D. Azizian, Analysis of temperature

- distribution in cast-resin dry-type transformers, *Electr. Eng.*, 89, 301–309, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00202-006-0008-4>.
- [4] X. Huang, L. Zhou, G. Wu, Q. Du, Simulation models of transformer hot-spot temperature, in: *Proc. IEEE Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater.*, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.2012.6318943>.
- [5] Y.Z. Lv, Y. Zhou, C.R. Li, Q. Wang, B. Qi, Recent Progress in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties, 2014. <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6882597>.
- [6] J. Liu, L. Zhou, G. Wu, Y. Zhao, P. Liu, Q. Peng, Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation modified by nanoparticles, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19, 510–520, 2012. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180245>.
- [7] G. Yaman, R. Altay, R. Yaman, Validation of computational fluid dynamic analysis of natural convection conditions for a resin dry-type transformer with a cabin, *Therm. Sci.*, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCI180919327Y>.
- [8] L. Garelli, G.A. Ríos Rodriguez, K. Kubiczek, P. Lasek, M. Stepien, J. Smolka, M. Storti, F. Pessolani, M. Amadei, Thermo-magnetic-fluid dynamics analysis of an ONAN distribution transformer cooled with mineral oil and biodegradable esters, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 23, 100861, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2021.100861>.
- [9] O. Kaymaz, G. Kalkan, A. Erek, Flow and heat transfer characteristics of different transformer oils in one section of transformer radiator, *Mühendis ve Makina.*, 56, 53–63, 2015.
- [10] R. Liao, J. Hao, L. Yang, S. Liang, J. Yin, Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating oil, in: *2010 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2010*, 588–591, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2010.5640772>.
- [11] Y. Yuan, R. Liao, A novel nanomodified cellulose insulation paper for power transformer, *J. Nanomater.*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/510864>.
- [12] T.W. Park, S.H. Han, Numerical analysis of local hot-spot temperatures in transformer windings by using alternative dielectric fluids, *Electr. Eng.* 97, 261–268, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00202-015-0335-4>.
- [13] T. Committee, IEEE C57.91-1995 Guide for Loading Mineral-Oil- Immersed Transformers, 1995. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1996.79665>.
- [14] J. Rouabeh, L. M'barki, A. Hammami, I. Jallouli, A. Driss, Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers, *Heliyon.*, 5, e01159, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01159>.
- [15] M. Tören, M. Celebi, Comparative implementation of graphene sheet insulation heat effect in dry-type transformers, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 26, 101131, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101131>.
- [16] Parts of a Transformer and Basics Explained. <http://www.apogeeweb.net/article/1997.html#viii-test-and-transportation-of-the-transformer>, Accessed 27 May 2022.
- [17] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, heat and mass transfer - Incropera 6e, *Fundam. Heat Mass Transf.*, John Wiley and Sons, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.022>.
- [18] L.W. Pierce, Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 9, 1160–1172, 1994. <https://doi.org/10.1109/61.296303>.
- [19] Miyatake Osamu; Fujii Tetsu, Natural Convective Heat Transfer Between Vertical Parallel Plates With Unequal Heat Fluxes., *Heat Transf. - Japanese Res.* 3, 29–33, 1972.
- [20] M. Fujii, S. Gima, T. Tomimura, X. Zhang, Natural convection to air from an array of vertical parallel plates with discrete and protruding heat sources, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, 17, 483–490, 1996. [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(96\)00051-3](https://doi.org/10.1016/0142-727X(96)00051-3).





## Konjoint analizi ile Kocaeli ilinde konut seçiminin incelenmesi

### Examination of housing selection in Kocaeli province with conjoint analysis

Gülşen Akman<sup>1,\*</sup> , Leyla Şimşek<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Kocaeli Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli, Türkiye

#### Öz

Konjoint Analizi, tüketicilerin hizmet veya ürünün çeşitli özelliklerinin kendileri için ne ölçüde önemli olduklarını ölçen pazar araştırması yaklaşımı olarak bilinmektedir. Çalışmanın konusu Kocaeli/Gebze ilçesinde konut seçiminde kişilerin tercihlerini etkileyen faktörlerin konjoint analiz yöntemiyle incelenmesidir. Amacı ise konut seçimlerinde etkili olduğu düşünülen faktörlerin önem derecesinin belirlenmesi ve belirlenen düzeylerin demografik özelliklere göre nasıl değişiklik gösterdiğinin incelenmesidir. Konut seçiminde önemli olan fiyat, net m<sup>2</sup>, oda sayısı, bina yaşı, bulunduğu kat faktörlerinden oluşan kartlar hazırlanmıştır. Bu kartlar analizi kolaylaştırmak amacıyla ortogonal tasarım tekniği ile SPSS paket programında oluşturulmuştur. Anket yöntemi ile 24 kişinin yanıtları değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda dairenin bulunduğu katın 3, fiyatının 240.000 TL, net m<sup>2</sup>'nin 93, oda sayısının 3+1, bina yaşının 0-1 aralığında tercih edildiği ortaya çıkmıştır. Konjoint modeli sonucu 17.484 birim fayda sağlayacağı ortaya çıkmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Konut seçimi, Konjoint analizi, SPSS analizi

#### 1 Giriş

Gelişen piyasa koşulları ile konut seçiminde artan özelliklerle beraber karar verme zorlaşabilmektedir. Kişilerin artık ev sahibi olma istekleri doğrultusunda artış yaşanan konut satışlarında seçimleri etkileyen kriterler önem taşımaktadır. Konut seçimi ülkenin ekonomik açıdan en öne çıkan göstergesi haline gelmiştir ve ayrıca kişiler içinde statü göstergesi olarak da ön planda olduğu düşünülmektedir. Konut seçimi konusunda iyi analiz, piyasa durumu takibi, insanların daha konforlu yaşam sürdürebilmesi için en uygun modellerin geliştirilmesi birçok problemin önüne geçilmesine fayda sağlayacaktır.

Çalışmada konut seçimi için tercihlerin yapılmasına yönelik Konjoint analizinden faydalanılmıştır. Literatürde konjoint analizi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Aynı zamanda konut seçimi ile ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Fakat bu çalışmalar genellikle çok kriterli karar verme yöntemleri ile analiz edilerek incelenmiştir. Konjoint analizi yöntemiyle değerlendirilmiş konut seçimi çalışmaları çok az bulunmaktadır. Çalışmanın bu konuda yapılacak araştırmalara ışık tutacağı ön görülmektedir. Hem yöntemin

#### Abstract

Conjoint Analysis, known as the market research approach to measure the various qualities of consumers' service or product for themselves. The subject of the study in the province of Kocaeli/Gebze is the factors that affect the preferences of the residence election are examined by the conjoint analysis of the factors that affect the choices of people. The goal is to be determine the significance of importance of the factors thought to be effective in the residence election and the determined levels are examining hoe age, gender, civil situation, the number of families, changes in the professional situation. The factors that matter in the housing election are prepared for the price, net m<sup>2</sup>, room number, building age, floor information. These cards were created by the Orthogonal design technique in the statistical SPSS statistical software to facilitate analysis. The poll method of 24 people has been evaluated. The result of the study, the floor is 3, the price of the apartment is 240.000 TL, the net m<sup>2</sup> is 93, the number of rooms is 3+1, building age is 0-1. Conjoint model results have proven that 17.484 units will benefit.

**Keywords:** Housing selection, Conjoint analysis, SPSS analysis

nasil yapılacağı hem de konut tercihlerinde dikkat edilmesi gereken hususların belirtilmesiyle ilgililerine fayda sağlayacağı düşünülmektedir. **Tablo 1**'de konjoint analizi ile yapılmış çalışmalar gösterilmiştir. Konjoint analizinin konut seçiminde [1, 2, 3], akademisyenlerin kongre tercihlerinde [4], uygun yatırım aracının belirlenmesinde [5], kariyer tercihlerinde [6], tüketicilerin satın alma kararlarında [7], gazete tercihlerinde [8], ofis mobilyası tercihinde [9] ve özel dersane tercihinde [10] kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca literatürde bulunan konut seçimi ile ilgili araştırmalara da kısaca **Tablo 2**'de değinilmiştir. Bu çalışmaların Kırgızistan [1], Erzincan [3], Ankara [11], Konya [12], Isparta [13], Karaman [14], Amasya [15] ve Bursa [16] illerinde gerçekleştirildiği görülmektedir. Yöntem olarak AHP-VIKOR [11], AHP-TOPSIS [12], AHP-Gri İlişkisel analiz [13], ki-kare ve yaryans analizi [14, 15] ve Korelasyon analizi [16] yöntemlerinin kullandığı görülmüştür. Genel olarak özetlemek gerekirse konjoint analiziyle konut seçiminde değerlendirilen faktörler; fiyat, altyapı, bulunduğu bölge, gelir durumu, konutun bulunduğu kat, büyüklüğü, site durumu yer almaktadır.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: akmang@kocaeli.edu.tr (G. Akman)

Geliş / Recieved: 02.02.2022 Kabul / Accepted: 14.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1065501

**Tablo 1.** Konjoint analizi literatür araştırması

Yazar	Çalışma Konusu	Elde Edilen Sonuç
Vural ve ark., 2019 [1]	Konut seçiminde üniversite gençlerine etkili olan faktörlerin belirlenmesi sağlanmıştır.	Katılımcıların cinsiyetine göre para ve altyapı faktörlerinin konut seçiminde önemli olduğu, ama öğrencinin okuduğu bölge, fakülte ve aile gelirine göre konut seçiminde farklılık olmadığı tespit edilmiştir.
Behdioğlu ve Çilesiz, 2017 [5]	Akademisyenlerin kongre tercih kriterlerinin konjoint analizi ile belirlenmesi sağlanmıştır.	Çalışmanın bütününe bakıldığında akademisyenlerin kongre tercihinde en önemli faktörlerin eğlence ve aktivite olduğu, en önemsiz faktörün ise destinasyon olduğu tespit edilmiştir.
Arslan, 2016 [5]	Konjoint analizi ile en uygun yatırım aracının belirlenmesi sağlanmıştır.	Analiz sonucunda fayda fonksiyonu en yüksek olduğu için en uygun yatırım aracı olarak döviz belirlenmiştir.
Karaarslan ve Altundaş, 2016 [6]	Kariyer tercihinin etkileyen faktör düzeylerinin öneminin konjoint analizi ile belirlenmesi sağlanmıştır.	Genç bireylerin kendi işlerini yapmayı tercih ettikleri ve kariyer olarak yüksek gelir sağlayan, dinamik ve zor olan işleri tercih ettikleri görülmüştür. Kariyer tercihinin etkileyen en önemli faktör olarak gelir faktörü belirlenmiştir.
Karaduman ve Yılmaz, 2015 [2]	Rezidans dairesi satışında müşteri tercihlerini etkileyen faktörler ve pazar payı analizinin konjoint analizi ile belirlenmesi sağlanmıştır.	Özellikle erkek müşterilerin sonuçlarında ilgi çekici veriler ortaya çıkmakta, bazı alternatiflerin mevcut daire tiplerinin pazar payını sıfırladığı, yani yamyamlaştırıcı etkiye sahip olduğu görülmektedir.
Şahinkanat, 2013 [7]	Tüketicilerin satınalma kararlarının konjoint analizi ile belirlenmesi sağlanmıştır.	Tüketicilerin cep telefonu seçimi için en önemli özellikler, önem sırasına göre fiyat, pil ömrü, marka bilinirliği, navigasyon ve 3G özelliği olarak belirlenmiştir.
Turanlı ve ark., 2013 [8]	Konjoint analizi ile gazete tercihlerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi üzerine araştırma gerçekleştirmiştir.	Araştırma sonuçları özellikle gazete tercihinde önemli olan faktörlerin cinsiyete göre farklılık gösterip göstermediği, farklı kriterlere önem verilip verilmediği tespit edilmeye çalışılmıştır.
Yavuz ve Çemrek, 2013 [3]	Konjoint analizi ile sağlık çalışanlarının konut tercihlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.	Konut tercihlerinde en çok önemli değişkenin, konutun bulunduğu kat değişkeni olduğu ve en çok tercih edilen konut tipinin ise 150-180 m <sup>2</sup> büyüklüğünde, şehir merkezinde bulunan, 3. Katta olan, merkezi ısıtma sistemine sahip, site içerisinde bir konut olarak belirlenmiştir.
Çevik ve Yiğit, 2011 [9]	Konjoint analizi ile ofis mobilyası tüketicilerinin tercihlerinin belirlenmesi sağlanmıştır.	Analiz sonucunda, ofis mobilyalarında satın almayı etkileyen en önemli faktör olarak üründe kullanılan malzeme ve işçilik belirlenmiştir.
Şen ve Çemrek, 2004 [10]	Konjoint analizi ve özel dersane tercihinin yönelik bir uygulama yapılmıştır.	Özel dersane tercihinde öncelikle dersane tarafından öğrencilere sunulan kaynak ve dökümanların en önemli faktör olduğu görülmüştür.

## 2 Materyal ve metot

Konjoint analizi birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu alanlardan önde gelenleri ise şöyle sıralanabilir: Yapılacak yeniliklerin etkilerini belirlenmesinde gerekli olan yeni ürünlerin planlaması, mevcut başarıların iyileştirilmesi çalışmaları, fiyatlandırma politikalarının belirlenmesi çalışmaları, reklâm çalışmaları, dağıtım planlaması çalışmaları, kontrol etme faaliyetleri ve pazar bölümlendirme çalışmaları [9].

Avantajları: Tüketicilerin bir ürünün veya hizmetin her bir özelliğine verdikleri önem derecesinin belirlenmesine ve her bir özelliğin her bir düzeyine yönelik tercih derecelerini ölçmeye imkan tanımaktadır. Belirlenen tercih dereceleri kullanılarak her bir bireyin özellikler arasında tercihlerinin doğrudan kıyaslanmasını mümkün kılmaktadır.

Dezavantajları: Özellik ve düzeylerin tümü araştırma öncesinde bilinmediği durumlarda tutarsız sonuçlar elde edilebilmektedir. Özellik ve düzeylerin çok fazla olması durumunda da araştırma karmaşık bir hal alabilmektedir [7].

Yöntemin aşamaları aşağıdaki gibidir [17].

1. Değişkenlerin ve düzeylerinin belirlenmesi.

Bu aşamada ilgili mal veya hizmetle ilgili tercihi belirlemede etkili olabilecek tüm faktörlerin/ değişkenler tespit edilir. Bu değişkenleri belirlerken hem tüketici hem de üretici yönünden bakmak yararlı olacaktır. Bu aşamada ayrıca belirlenen özelliklerin herbiri için anlamlı olacak düzeyler de belirlenir.

2. Değişken-düzyer kombinasyonunun belirlenmesi.

Bu aşamada ise değişkenlerin düzeylerine göre kombinasyonları içeren tablolar oluşturulur.

3. Anket formunun hazırlanması.

Bu aşamada ilk iki aşamada özellikler/değişkenler ve düzeylerin ve kombinasyonlarının belirlenmesinden sonra veri toplamak üzere anket formu oluşturulur. Anket sorularının açık, net ve kısa olmasına dikkat edilmelidir.

4. Verilerin toplanması.

Bu aşamada oluşturulan anket hedef kitleye uygulanır ve veriler toplanır.

5. Analizin yapılması.

Verilerin toplanmasından sonra verilerin analizi için uygun yöntem belirlenir. Bu aşamada sıralama, puanlama, ikili karşılaştırma metotlarından uygun olan seçilir ve tahmin metotları uygulanarak analiz tamamlanır.

**Tablo 2.** Konut seçimi literatür araştırması

Yazar	Kullanılan Yöntem	Değerlendirme Kriteri	Alternatif Sayısı	Çalışmanın Yapıldığı Yer	Elde Edilen Sonuç
Eş ve Yılmaz, 2020 [11]	AHP tabanlı VIKOR yöntemi	Fiyat, büyüklük, bina yaşı, kat durumu, güneş cephesi, güvenlik-kapıcı, otopark, manzara, evin iç özellikleri.	10 konut alternatifi	Ankara	Ev satın almada en önemli kriterler evin fiyatı, büyüklüğü ve güvenlik, en önemsiz kriterler ise sırasıyla iç güzellik, manzara ve evin cephesi olarak tespit edilmiştir. En iyi alternatifler yedinci, üçüncü ve dördüncü alternatifler belirlenmiştir.
Alkan ve Durduran, 2020 [12]	AHP temelli TOPSIS yöntemi	Fiyat, kullanım alanı, yaşı, bulunduğu kat, oda sayısı, güneş alan cephe sayısı, ısıtma sistemi ve kent merkezine uzaklık.	5 konut alternatifi	Konya	Beş farklı konut içerisinde en iyi tercih olarak birinci alternatif belirlenmiştir.
İpek ve Şahin, 2018 [13]	AHP temelli gri ilişkisel analiz yöntemi.	Konutun fiziki özellikleri, fiyat, bina/site özellikleri, sosyal alanlara uzaklık, satıcı.	15 konut alternatifi	Isparta	En iyi alternatif olarak en yüksek gri ilişkisel katsayıya sahip olan konut 11 numaralı alternatif belirlenmiştir. Konut tercihini etkileyen en önemli özellikler konutun net alanı, oda sayısı, otopark, ısıtma sistemi, yeşil alan miktarı belirlenmiştir.
Altun, 2017 [14]	Ki-Kare, t ve tekyönlü varyans analizi	Ev tipi, genişlik, oda sayısı, ödeme tercihi, fiyat, konutun kimden alınacağı, muhiti vb.		Karaman	Konut satın almayı etkilediği düşünülen en önemli faktör olarak konutun sağlamlığı, fiyatı ve istenildiği zaman satılabilmesi faktörlerinin ön plana çıktığı görülmüştür.
Güremen, 2016 [15]	Ki-kare analizi, tek yönlü varyans analizi ve LSD testi	Kirlilik, altyapı ulaşım, hizmet alma kolaylığı, beklentilere uygunluk, sosyal yaşam, açık alanlar.	9 konut alternatifi	Amasya	Konut satın alınmasında oturan evden memnuniyet üzerinde önemli derecede pozitif etkiye sahip kriterler olarak, konutun kullanılabilir mekânın yeterliliği ve kullanılabilirliği kriterleri belirlenmiştir.
Tosun ve Fırat, 2012 [16]	Korelasyon analizi	Konut büyüklüğü, yeşil alan, otopark, fiyat, sessizlik, alışveriş kolaylığı, güvenlik vb.	Konut için 3 bölge alternatifi	Bursa	Ankete katılan kişilerin kendileri için en uygun konut tipinin 3+1 konutlar olduğu, en önemli kriterinde fiyat olduğu görülmüştür.

#### 6. Sonuçların değerlendirilmesi.

Bu aşamada elde edilen sonuçlar yorumlanır. Burada en önemli husus elde edilen analiz sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanmasıdır. Bu da büyük ölçüde araştırmacının deneyimine ve konusu hakkındaki bilgi düzeyine bağlıdır.

Bu araştırmada Kocaeli’nde Gebze ilçesinde ev almak isteyen kişilerin tercihleri değerlendirilerek ve pazar araştırması yaparak uygun tercihin belirlenmesi amacıyla Konjoint analizinden yararlanılmıştır. Önceden yapılmış çalışmalar incelendiğinde konut seçimine yönelik konjoint analizi ile yapılmış çok fazla çalışma olmamasından dolayı bu alandaki araştırmalara katkı sağlamak hedeflenmektedir. Fiyat, net m<sup>2</sup>, oda sayısı, bina yaşı ve bulunduğu kat faktörleri olarak belirlenmiştir. Alt düzeyleri olarak bilgiler **Tablo 3**’de yer almaktadır. Faktörler ve düzeyleri belirlenirken tercih edilen en önemli öncelikler baz alınmıştır. Bu öncelikler hem yapılmış çalışmalar incelenerek hem de uzman kişilerin görüşlerinden elde edilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. Ayrıca günümüz şartları göz önüne alınarak da belirlenmeler sağlanmıştır.

**Tablo 3.** Değişkenlere ait düzeyler

Fiyat (1000 TL)	Net m <sup>2</sup>	Oda sayısı	Bina yaşı	Bulunduğu kat
240	93	1+1	0	Giriş kat
285	105	2+1	2	1
325	115	3+1	3	2
400	130		4	3
425			5--10	

Analizlerin yapılması için veriler anket toplama yöntemiyle elde edilmiştir. 24 kişiye elektronik ortamda anketler iletilmiştir. Katılımcı sayısının yeterliliği konusunda yapılmış çalışmalar incelendiğinde Karaduman ve Yılmaz [2]’in yaptıkları araştırmayla örneklem büyüklüğü yeterli olduğu düşünülmektedir.

Kişinin konut seçiminde etkili olduğu düşünülen faktörlerin önem derecesinin belirlenmesi, belirlenen

düzeylerin demografik özellikler ile incelenmesi için yaş, cinsiyet, medeni durum, aile sayısı, meslek durumu olmak üzere 5 demografik bilgi belirlenmiştir. Tercihin belirlenmesi için Konjoint Analizi kullanılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışma, Kocaeli ilinin Gebze ilçesinde ev almak isteyen kişilerin tercihleri değerlendirilerek ve pazar araştırması yapılarak uygun tercihin belirlenmesine yöneliktir.

#### 1. Adım. Değişkenlerin ve düzeylerinin belirlenmesi:

Değişkenler: Fiyat, net m<sup>2</sup>, oda sayısı, bina yaşı ve bulunduğu kat faktörler olarak belirlenmiştir. Düzeyler: Fiyat (bin tl): 240, 285, 325, 400, 425; Net m<sup>2</sup>: 93, 105, 115, 130; Oda sayısı: 1+1, 2+1, 3+1; Bina yaşı: 0, 2, 3, 4, 5-10; Bulunduğu kat: Giriş kat, 1, 2, 3 olmak üzere belirlenmiştir.

Demografik bilgiler: Yaş: 22-27, 28-33, 34-39, 40-46, 47 ve üstü; Cinsiyet, Medeni durum, Aile sayısı, Meslek durumu: ev hanımı, emekli, işçi, mimar, mühendis olmak üzere 5 başlık belirlenmiştir.

#### 2. Adım. Değişken-düzye kombinasyonunun belirlenmesi:

Anket tekniği açısından tüm olası kombinasyonlarının sıralanması mümkün olmadığından dolayı her bir özellik ve düzeylerinin seçiminin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile sadece ana özelliklerin dikkate alındığı "ortogonal düzen" adı verilen deney düzeni kullanılmaktadır [3]. Bu düzen SPSS paket programı ile gerçekleştirilmektedir. Kriterlere göre yer alan kombinasyonları 5\*4\*3\*5\*3 =1200 adet olmaktadır. Bu araştırma kapsamı için 1200 olası kombinasyon oldukça yüksektir ve bu yüzden sağlıklı bir şekilde sıralanması mümkün değildir. Bundan dolayı tüm olası durumların ortogonal bir alt kümesi oluşturulmuştur. Orthogonal tasarımda 29 CardID oluşmuştur. Oluşan kartların kısa bir bölümü Tablo 4'de yer almaktadır.

#### 3. Adım. Anket formunun hazırlanması:

Uygun anket formu hazırlanarak katılımcılara online olarak ulaştırılmıştır. İlk tercih edecekleri karta 1 vererek son tercih edecekleri karta doğru sıralama yapılması istenmiştir. Ayrıca demografik bilgilerinde girilmesi sağlanmıştır.

#### 4. Adım. Verilerin toplanması:

Anket sonucunda veriler birleştirilmiştir. 24 kişi tarafından anket doldurulmuştur.

#### 5. Adım. Analizin yapılması:

Elde edilen bilgiler excelde birleştirilmiştir. SPSS paket programı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

Demografik bilgilerin analizleri incelenecek olursa, Tablo 5'de ankete katılanların cinsiyete göre dağılımı görülmektedir. Cevaplar incelendiğinde ankete katılanların çoğunluğunu %70.8 ile kadınların oluşturduğu gözlenmektedir.

Ankete katılanların yaşa göre dağılımı Tablo 7'de görülmektedir. Cevaplar incelendiğinde çoğunluğu %45.8 ile 28-33 yaş arasının oluşturduğu gözlenmektedir. En az katılım ise %4.2 ile 22-27 yaş aralığı oluşturmaktadır. Diğer değişkenlerden 34-39 ve 40-46 yaş arası katılımcılar eşit miktarda bulunmuştur. 47 yaş ve üstü katılımcı ise %4 ile bulunmuştur.

Ankete katılanların meslek dağılımı Tablo 8'de görülmektedir. Cevaplar incelendiğinde çoğunluğu %41.7 ile mühendislerin oluşturduğu gözlenmektedir. En az katılım %4.2 ile mimar seçeneğinde bulunmuştur. Ev hanımı katılımcılar ise en büyük ikinci kısmı oluşturmaktadır. Akabinde işçiler ve emekli katılımcılar sıralamayı takip etmektedir.

Tablo 4. Ortogonal tasarım sonucu elde edilen kartlar

Kart ID	Fiyat	Net m <sup>2</sup>	Oda sayısı	Bina yaşı	Bulunduğu kat
1	400	105	1+1	4	2
2	240	105	2+1	2	3
3	325	115	1+1	0	2
4	325	93	1+1	3	3
5	425	115	2+1	4	3
6	425	93	2+1	0	Giriş kat
7	325	130	2+1	2	Giriş kat
8	325	105	3+1	5-10	Giriş kat
9	425	105	1+1	3	Giriş kat
10	325	93	2+1	4	1
11	400	115	2+1	5-10	Giriş kat
12	240	130	1+1	4	Giriş kat
13	425	93	3+1	2	2

Tablo 5. Cinsiyet değişkenine göre analiz

Geçerli	Frekans	%	Cinsiyet %	Kümülatif %
Kadın	17	70.8	70.8	70.8
Erkek	7	29.2	29.2	100.0
Total	24	100.0	100.0	

Tablo 6. Medeni durum değişkenine göre analiz

Geçerli	Frekans	%	Medeni Durum %	Kümülatif %
Evli	18	75.0	75.0	75.0
Bekar	6	25.0	25.0	25.0
Total	24	100.0	100.0	

Tablo 7. Yaş değişkenine göre analiz

Geçerli	Frekans	%	Yaş %	Kümülatif %
22-27	1	4.2	4.2	4.2
28-33	11	45.8	45.8	50.0
34-39	4	16.7	16.7	66.7
40-46	4	16.7	16.7	83.3
47 ve üstü	4	4	16.7	100.0
Total	24	100.0	100.0	



**Tablo 8.** Meslek değişkenine göre analiz

Geçerli	Frekans	%	Meslek %	Kümülatif %
Mimar	1	4.2	4.2	91.5
Emekli	2	8.3	8.3	100
İşçi	4	16.7	16.7	45.8
Ev Hanımı	7	29.2	29.2	29.2
Mühendis	10	41.7	41.7	87.5
Toplam	24	100	100	

Ankete katılanların aile nüfusuna göre dağılımı **Tablo 9**'da görülmektedir. Cevaplar incelendiğinde aile nüfusu 4 kişiye sahip bireylerin %33.3 ile çoğunluğu oluşturduğu gözlenmektedir. En az katılım %4.2 ile 5 kişilik bir aile yapısına sahip seçenek olduğu ortaya çıkmıştır. 3 kişilik aileye sahip katılım %29.2 olarak bulunmuştur. Onu en yakın 1 ve 2 kişilik aileye sahip katılımcılar oluşturmuştur ve %4'lük kısma sahiptir.

**Tablo 9.** Aile nüfus değişkenine göre analiz

Geçerli	Frekans	%	Aile Nüfus %	Kümülatif %
1	4	16.7	16.7	16.7
2	4	16.7	16.7	33.7
3	7	29.2	29.2	62.5
4	8	33.3	33.3	95.8
5	1	4.2	4.2	100.0
Toplam	24	100.0	100.0	

Syntax ile gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Ve program çalıştırılarak **Tablo 10**'da yer alan analiz tabloları elde edilmiştir.

**Tablo 10.** Konjoint analizi fayda

		Fayda Tahmini	Std. Hata
Bulunduğu kat	Giriş kat	-0.980	0.703
	1	1.004	0.870
	2	-1.375	0.870
	3	1.351	0.870
Fiyat	240	-0.286	0.325
	285	-0.573	0.649
	325	-0.859	0.974
	400	-1.145	1.298
Net m <sup>2</sup>	93	-0.184	0.394
	105	-0.368	0.787
	115	-0.553	1.181
	130	-0.737	1.574
Oda sayısı	1+1	1.056	0.613
	2+1	2.113	1.227
	3+1	3.169	1.840
Bina yaşı	0-1	-0.438	0.325
	2	-0.876	0.649
	3	-1.314	0.974
	4	-1.752	1.298
	5-10	-2.189	1.623
Sabit		13.872	1.347

Katılımcıların kararlarındaki ilk önemli faktör evin bulunduğu kat onu sırasıyla fiyat, net m<sup>2</sup>, oda sayısı ve bina yaşı takip etmektedir.

Bu faktörlerin düzeylerinin fayda katsayıları incelendiğinde cevaplayıcılar için en iyi tercih sırasıyla; bulunduğu kat 3 (1.351), fiyat kriteri 240 (-0.286), net m<sup>2</sup> 93 (-0.184), oda sayısı 3+1 (3.169), bina yaşı 0-1 (-0.438) olarak tahmin edilmiştir ve tabloda yer almaktadır.

Konjoint modeli: 13.872 + (1.351) bulunduğu kat + (-0.286) fiyat kriteri + (-0.184) net m<sup>2</sup> + (3.169) oda sayısı + (-0.438) bina yaşı şeklindedir. En iyi kriterlere ait modelin sonucu 17.484 birimlik fayda sağlamaktadır.

Regresyon denkleminin katsayıları **Tablo 11**'de yer almaktadır.

**Tablo 11.** Regresyon denklemi

	Beta katsayısı/ Tahmin
Fiyat	-0.286
Net m <sup>2</sup>	-0.184
Oda sayısı	1.056
Bina yaşı	-0.438

**Tablo 12.** Korelasyon analizi

	Değer	p
Pearson's R	0.642	0.000
Kendall's tau	0.490	0.000

**Tablo 13**'de ters etki gösteren değerlerin frekansını vermektedir. 9 seçim net m<sup>2</sup> ters tercihte bulunmuştur. 7 seçim fiyat ile ters tercihte bulunmuştur. Bunlar yüksek fiyatlı evleri tercih etmiştir şeklinde yorum yapılabilmektedir.

**Tablo 13.** Ters etki gösterenler

Faktör	Ters sayısı
Net m <sup>2</sup>	9
Fiyat	7
Bina yaşı	6
Oda sayısı	5
Bulunduğu kat	0

Araştırmada yapılan korelasyon analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin, miktarının Pearson's R=0.642, p=0.000, Kendall's Tau=0.490, p=0.000 olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kurulan konjoint modeli ile gözlenen sonuçlar arasında pozitif yönde orta dereceli bir ilişki olduğunu **Tablo 12** analiz edilerek söylenebilir.

#### 4 Sonuçlar

Konjoint Analizi, tüketici davranışlarının özelliklerini belirlemek için tercih edilen çok değişkenli analiz tekniklerinden birisidir [8]. Konut sahibi olmak hem kişileri belirli bir statü sahibi yapmaktadır hem de kişinin kendi evinin olduğunu bilmek psikolojik olarak kişiyi güvende hissettirmektedir. Çalışmada tercih edilmesi gereken konutlara yönelik belirlenmiş olan değişkenler ve düzeyler:

Fiyat (bin tl): 240, 285, 325, 400, 425, Net m<sup>2</sup>: 93, 105, 115, 130, Oda sayısı: 1+1, 2+1, 3+1, Bina yaşı: 0, 2, 3, 4, 5-10, Bulunduğu kat: Giriş kat, 1, 2, 3, Demografik bilgiler: Yaş: 22-27, 28-33, 34-39, 40-46, 47 ve üstü, Cinsiyet, Medeni durum, Aile sayısı, Meslek durumu: ev hanımı, emekli, işçi, mimar, mühendis şeklinde yer almaktadır.

Katılımcıların kararlarındaki ilk önemli faktör evin bulunduğu kat onu sırasıyla fiyat, net m<sup>2</sup>, oda sayısı ve bina yaşı takip etmektedir.

Bu faktörlere ait düzeylerin fayda katsayıları incelendiğinde cevap verenler için en iyi tercihler sırasıyla; bulunduğu kat olarak 3 (1.351), fiyat kriteri 240 (-0.286), net m<sup>2</sup> 93 (-0.184), oda sayısı 3+1 (3.169), bina yaşı 0-1 (-0.438) tahmin edilmiştir ve Tablo 10'da yer almaktadır. Kadın katılımcıların fazla olmasıyla evin bulunduğu katın tercih sıralamasında ilk kriter olması birbiriyle ilişkili olabilir. Bunun sebepleri arasında kadınların kendilerini yüksek katlarda daha güvenli hissetmeleri olabilir. 28-33 yaş arası katılımcıların fazla olmasıyla fiyat olarak düşük bütçeli ev tercih edilmesi arasında da bağlantı olabilir. Çünkü kişilerin belirtilen yaş aralığında daha yüksek fiyatlı evleri satınalmaya güçleri yetmeyebilir. Aile nüfusu olarak 4 kişilik bir aileye sahip katılımcıların fazla olmasında 3+1 oda sayısına sahip evlerin tercih edilmesine sebep olmuş olabilir.

Konjoint modeli:

$13.872 + (1.351) \text{ bulunduğu kat} + (-0.286) \text{ fiyat kriteri} + (-0.184) \text{ net m}^2 + (3.169) \text{ oda sayısı} + (-0.438) \text{ bina yaşı}$  şeklindedir. En iyi kriterlere ait modelin sonucu 17.484 birimlik fayda sağlar. Araştırmada yapılan korelasyon analizinde değişkenler arasındaki ilişkinin, miktarının Pearson's R=0.642, p=0.000, Kendall's Tau=0.490, p=0.000 olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kurulan konjoint modeli ile gözlenen sonuçlar arasında pozitif yönde orta dereceli bir ilişki olduğunu söyleyebiliriz.

Önceden yapılmış olan konjoint analiziyle konut seçimindeki araştırmalarda evin bulunduğu katın ilk kriter olması bu çalışmada da ön plana çıkmıştır. Fiyat ve net m<sup>2</sup> seçimleri arasında tercih sırası diğer çalışmalarda değişse de bu çalışmada fiyat kriteri daha ön plana çıkmıştır. Bazı çalışmalarda yer alan güvenlik, konum, site durumu, sosyal imkanlar gibi faktörler ile bu araştırmada yer alan faktörler birleştirilip çalışma alanının genişleterek daha farklı analizler yapılabilmesi tavsiye edilmektedir. Ve bu çalışma ile yapılacak çalışmalara katkı sağlamak hedeflenmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %14

#### Kaynaklar

- [1] M. Vural, G. Karadeniz, G. Adzhygulova, K. Zhanybekova, B. Bektur Kyzy, Konut seçiminde üniversite gençlerine etkili olan faktörler. Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi, 8(3): 3032-3045, 2019.
- [2] İ. Karaduman ve N.K. Yılmaz, Rezidans dairesi satışında müşteri tercihlerini etkileyen faktörler ve pazar payı analizinde konjoint yönteminin kullanımı.

Giresun Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi, 1(2), 65-82, 2015.


- [3] S. Yavuz ve F. Çemrek, Konjoint analizi ile sağlık çalışanlarının konut tercihlerinin belirlenmesi. Journal Of Graduate School Of Social Sciences, 17.2, 2013.
- [4] S. Behdioğlu ve N. Çilesiz, Akademisyenlerin kongre tercih kriterlerinin konjoint analizi ile belirlenmesi. Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18(1),2017.
- [5] H.Arslan, Konjoint analizi ile en uygun yatırım aracının belirlenmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 29, 305-317, 2016.
- [6] M.Karaarslan ve B. Altuntaş, Kariyer tercihini etkileyen faktör düzeylerinin önemini konjoint analizi ile belirlenmesi. İnsan Ve Toplum Bilimleri Araştırmaları Dergisi 5(7), 1972-1988, 2016.
- [7] E. Şahinkanat, Tüketicilerin satın alma kararlarının konjoint analizi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2013.
- [8] M. Turanlı, D. Taşpınar ve M. Işık, Konjoint analizi ile gazete tercihlerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi. Istanbul University Econometrics and Statistics E-Journal, 19: 1-26, 2013.
- [9] O. Çevik ve M. Y. Alperen, Konjoint analizi ile ofis mobilyası tüketicilerinin tercihlerinin belirlenmesi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal Ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 1: 105-110, 2011.
- [10] H. Şen ve F. Çemrek, Konjoint analizi ve özel dersane tercihiyle yönelik bir uygulama. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 5.2, 2004.
- [11] A. Eş ve B. Yılmaz, Kiralık konut seçiminin ahp tabanlı vikor yöntemiyle belirlenmesi: Çankaya Örneği. Atatürk Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi 34(4): Sayfa: 1229-1249, 2020.
- [12] T. Alkan ve S. S. Durduran, Konut seçimi sürecinin ahp temelli topsis yöntemi ile analizi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 12-21, 2020.
- [13] Ç. İpek ve Y. Şahin, AHP temelli gri ilişkisel analiz yöntemi ile konut seçimi. Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi, 9(25), 153-172, 2018.
- [14] D. Altun, Konut satın alma kararını belirleyen faktörler: karaman iline yönelik bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [15] L. Güremen, Konut ve yerleşim alanı kullanıcı algısının memnuniyet ve tercih davranışına etkisi üzerine bir araştırmada Amasya örneği. Technological Applied Sciences, 11 (2), 24-64, 2016.
- [16] E. K. Tosun ve Z. Fırat, Kentsel mekândaki değişimler ve kişilerin konut tercihleri: Bursa örneği. Business and Economics Research Journal, 3(1), 173-195, 2012.
- [17] H. Gürbüz ve Z. Kaygısız, Konjoint analizi ve ulaşım sektörü pazarı üzerine bir uygulama. Süleyman Demirel Üniversitesi İİBF Dergisi, 9 (1), 139-147, 2004





# Prediktif modellemelerin gıdalarla ilgili mikrobiyal çalışmalarda kullanımı

## The use of predictive models in food related microbial studies

Cengiz Çetin<sup>1,\*</sup> , Suzan Öztürk Yılmaz<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Otel, Lokanta ve İkrâm Hizmetleri Bölümü, 78300, Karabük Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye

### Öz

Gıdaların mikrobiyolojik kalitesini ve güvenliğini sağlama ihtiyacı, mikrobiyal davranışı ölçme ve tahmin etme maksadıyla matematiksel modellerin kullanımına olan ilgiyi artırmıştır. Son zamanlarda, gıda kaynaklı patojen bakterilerin üremesini tahmin etmek için prediktif mikrobiyoloji geliştirilmiştir. Prediktif mikrobiyoloji modelleri mikrobiyal gıda güvenliğini ve kalitesini iyileştirmek için pratik uygulamaya sahiptir. Son yıllarda prediktif modelleme yaklaşımıyla ilgili yapılan çalışma sayısında artış mevcuttur. Bu çalışmada gıda mikrobiyolojisi alanında kullanılan bazı matematiksel modellerin (prediktif modeller) kullanımı derlenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Matematiksel modelleme, Prediktif model, Gıda, Bakteri, Raf ömrü

### Abstract

The need to ensure the microbiological quality and safety of foods has increased interest in the use of mathematical models to measure and predict microbial behavior. Recently, predictive microbiology has been developed to predict the growth of foodborne pathogenic bacteria. Predictive microbiology models have practical application to improve microbial food safety and quality. In recent years, there has been an increase in the number of studies on the predictive modeling approach. In this study, the use of some mathematical models (predictive models) used in the field of food microbiology has been reviewed.

**Keywords:** Mathematical modeling, Predictive model, Food, Bacteria, Shelf life

## 1 Giriş

Model, gerçek dünyadaki herhangi bir sürecin, sistemin veya olgunun işleyişinin fizik, kimya, biyoloji, jeoloji, astronomi, ekonomi ve sosyoloji gibi ilgili olduğu bilim dalının kavram ve kanunlarına bağlı olarak ifade edilmesidir [1]. Deneysel çalışmaların sınırlı sayıda kaldığı ve bunu yapmanın imkânsız olduğu ya da pratik ve ekonomik olarak çok sayıda deneyin yapılması gerektiği halde yapılamadığı durumlarda matematiksel modellerden yararlanılmaktadır [2].

Matematiksel modelleme ise matematik veya matematik dışındaki bir olayı, olguyu, olaylar arasındaki ilişkileri matematiksel olarak ifade etmeye çalışma, bu olaylar ve olgular içerisinde matematiksel örüntüler ortaya çıkarma sürecidir [3].

Sıcaklık, pH, organik asit, tuz gibi bazı parametrelerde meydana gelen değişimler gıdanın raf ömrü ve kalitesini etkilediği için her seferinde tekrar tekrar kurulan geleneksel raf ömrü-rekabet testleri yapılmaktadır. Fakat prediktif mikrobiyoloji, matematiksel olarak validasyonu teyit edilmiş modellerin kullanılmasına olanak sağlayarak gıdanın raf ömrü ve kalitesinin belirlenmesi ile ilgili yeni araştırmaları teşvik etmiştir [4].

Prediktif modeller gıdanın sıcaklık, pH-değeri, su aktivitesi değeri, oksidasyon-redüksiyon potansiyeli ve gıdaya sodyum klorür, sodyum laktat, asetik asit, laktik asit

gibi çeşitli katkıları katılması gibi farklı şartlar altındaki mikroorganizmaların tepkilerinin tanımlanmasına yardımcı olan araçlardır [5].

Prediktif modellemenin amacı, insan sağlığını tehdit eden muhtemel mikroorganizma seviyesi ve bu tehdidin ne zaman oluşabileceğini tahmin edip risk faktörlerini tanımlayarak gıda güvenliğini önceden sağlamaktır [6, 7].

Gıdalarda mikrobiyal gelişme belirli bir zaman içerisinde belli bir mikrobiyal büyüme hızıyla maksimum değere ulaşır. Prediktif modeller, matematiksel modeller kullanarak gıdalardaki mikrobiyal büyüme veya ölümü tahmin etmekte kullanılmaktadır [8, 9].

### 1.1 Modellemelerin sınıflandırılması

Gıdaların gerek üretim aşaması gerekse depolama sırasındaki mikroorganizmaların gelişmesini veya inaktivasyonunu belirlemek için uygulanan yöntemler pahalı ve zaman alıcıdır [10].

Mikroorganizmaların üremesinde su aktivitesi, pH ve sıcaklık gibi çevresel faktörler etkilidir. Prediktif modelleme bu etkiyi tahmin etmek için pratikte yaygın olarak kullanılmaktadır [11].

Gıda alanında birden fazla prediktif model sınıflandırılması yapılması sonucunda bir karışıklık meydana gelmiştir. Bu karışıklığı gidermek amacıyla Birincil Model, İkincil Model ve Üçüncül Model olmak üzere bir sınıflandırma sistemi önerilmiştir [12].

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cengizcetin@karabuk.edu.tr (C. Çetin)

Geliş / Received: 13.07.2021 Kabul / Accepted: 28.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.971178

### 1.1.1 Birincil model

Birincil model, gelişme hızı gibi kinetik parametreleri hesaplamak için bakteri hücresi sayımındaki depolanma süresi ve gecikme fazı süresindeki değişiklikleri tarif eder [13]. Bu modelleme normal olarak ortam parametrelerini içermez ve mikroorganizma sayısındaki değişimi zamana bağlı olarak gösterir [14]. Bu modellere Monod modeli, Gompertz fonksiyonu, Logistik, Richards, Schunte, Stannard ve Baranyi modelleri örnek verilebilir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan model denklemleri aşağıda verilmiştir.

Gompertz fonksiyonu,

$$X(t) = X_0 + (X_{\max} - X_0) \exp(-\exp(-B(t-M))) \quad (1)$$

Baranyi modeli,

$$y(t) = y_{\max} - \ln(1 + (e^{-y_{\max} - y_0} - 1)e^{-\mu_{\max} \cdot A_n(t)}) \quad (2)$$

Gompertz modeli eşitliğinde  $X(t)$  t anındaki hücre konsantrasyonunu (log cfu/ml),  $X_0$  başlangıç konsantrasyonunu (log cfu/ml),  $X_{\max}$  maksimum hücre konsantrasyonu (log cfu/ml), B maksimum büyüme oranını, M büyüme oranının maksimum olduğu zamanı (saat) ifade etmektedir [15]. Baranyi modeli eşitliğinde ise belirtilen y hücre sayısını,  $\mu_{\max}$  maksimum spesifik büyüme oranını, A asimptotik hücre sayısını, t zamanı (saat) ifade etmektedir [16].

### 1.1.2 İkincil model

İkincil modeller, birinci modellerden elde edilen k, D,  $\mu$  gibi çoğalma parametrelerinin üzerine, pH, su aktivitesi ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin kinetik parametreler üzerindeki etkisinin ortaya konduğu modellerdir [13, 14, 17, 18]. Bu modellere Ratkowsky modeli, Arrhenius eşitliği, Z Değeri ve Belehradek Modeli örnek verilebilir. Yaygın olarak kullanılan ikincil model denklemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir.

Ratkowsky modeli,

$$\text{Sqrt}(\mu) = b(T - T_{\min}) \quad (3)$$

Arrhenius eşitliği,

$$\ln(N/N_0) = kt = k_0 \exp(-E_A/(RT))t \quad (4)$$

Ratkowsky modeli eşitliğinde  $\text{Sqrt}(\mu)$  spesifik büyüme oranını, b sıcaklık katsayısını, T sıcaklık (°C) ve  $T_{\min}$  bakteri büyümesi için minimum notasyonel sıcaklığı (°C) ifade etmektedir [19]. Arrhenius eşitliğinde ise N hücre sayısını,  $k_0$  frekans faktörünü, T kesin sıcaklık (Kelvin), R universal gaz sabitini (8.314 J/mol.K) ve  $E_A$  aktivasyon enerjisini (J/mol) ifade etmektedir [20].

### 1.1.3 Üçüncül model

Üçüncül modeller, birincil ve ikincil modellerin yazılıma uygulanması ile elde edilen modellerdir. Bu modeller hem çevrimiçi hem de ticari yazılım uygulamaları ile geniş kapsamlı bir şekilde kolaylıkla kullanılabilir [21].

Food Spoilage and Safety Predictor (FSSP™), ComBase, Pathogen Modelling Program (PMP), Food MicroModel, Pseudomonas Predictor, Growth Predictor, Seafood Spoilage Predictor (SSP), GlnaFit, DataFit, DMFit, Sym' Previus, Forecast ve ChefCad uygulamaları üçüncül modellere örnektir.

Bu çalışmada gıda mikrobiyolojisi alanında kullanılan bazı prediktif modellerin kullanımı derlenmeye çalışılmıştır.

## 2 Yapılan çalışmalar

Dalgaard vd. [22], modifiye atmosfer paketlenme (MAP) ile paketlenmiş morina filetolarının raf ömrünü tahmin etmek için Polinom ve Karekök denklemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada *Photobacterium phosphoreum* bakterisinin paketlenmiş morina balığı ve sıvı ortamdaki büyümesi 0 °C ile 15 °C sıcaklıkta ve %0 CO<sub>2</sub> ile %100 CO<sub>2</sub> gazı altında incelenerek büyüme kinetiği çıkarılmıştır. Paketlenmiş morina filetolarının raf ömrü ilk *P. phosphoreum* sayılarına, ürün sıcaklığına ve modifiye atmosferdeki CO<sub>2</sub> seviyesine göre tahmin edilmiştir. Duyusal değerlendirme ile belirlenen raf ömrü ile Karekök denklemi ve Polinom denklemi tarafından tahmin edilen raf ömrü arasında sırasıyla %17 ve %9 ortalama sapma olduğunu bildirmişlerdir.

Koutsoumanis [23], farklı izotermal koşullarda (0 ile 15 °C) aerobik olarak depolanmış Akdeniz yıldızlı çipuranın (*Sparus aurata*) *Pseudomonas spp.*'nin büyümesi üzerindeki sıcaklığın etkisi için matematiksel bir model sunmayı amaçlayan bir çalışma yapmıştır. Farklı izotermal koşullar altında aerobik olarak depolanmış yıldızlı çipura ile 23 deneyden elde edilen *Pseudomonas spp.* büyüme verilerini toplamış ve bakterinin kinetik parametrelerini (gecikme süresi, maksimum büyüme oranı ve maksimum hücre konsantrasyonu) hesaplamak için Logistik fonksiyon kullanmıştır. Gecikme süresi ( $t_{\text{lag}}$ ) ve maksimum büyüme oranının ( $\mu_{\text{max}}$ ) aksine maksimum hücre konsantrasyonunun ( $N_{\text{max}}$ ) depolama sıcaklığından önemli ölçüde etkilenmediğini ve  $8.4 \pm 0.7$  log CFU/g aralığında olduğunu saptamıştır. Ayrıca, *Pseudomonas spp.* büyümesinin kinetik parametrelerini, Belehradek tipi model kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak modellemiştir. Belehradek modelinin  $\mu_{\text{max}}$  ve  $t_{\text{lag}}$  için nominal minimum sıcaklık parametresini sırasıyla -11.8 °C ve -12.8 °C olarak bulmuştur. Depolama sıcaklığına bağlı olarak 7 saat ile 40 saat arasında değişen nispeten önemli bir *Pseudomonas spp.*'in gecikme fazını hesaplamıştır. Belehradek tipi modelin, sıcaklığın 0 °C ile 15 °C aralığında *Pseudomonas spp.* büyümesi üzerindeki etkisini başarılı bir şekilde tanımlayabildiğini ve modelin gerçek dünya koşullarında balık kalitesini doğru bir şekilde tahmin edebileceğini bildirmiştir.

Lopez vd. [24] yaptıkları çalışmada biri, büyümenin optik yoğunluk birimleri olarak ifade edildiği farklı bakteri ve mantar türlerinin 21 büyüme eğrisini içeren, diğeri de farklı pH, sıcaklık ve CO<sub>2</sub> koşulları altında geliştirilmiş *Yersinia enterocolitica* plakalarında sayılan 34 koloni oluşturan birim eğrisini içeren iki veri setini kullanarak mikrobiyal büyüme eğrilerini tanımlamak istemişlerdir. Bunun için üç fazlı doğrusal, Logistik, Gompertz, Von

Bertalanffy, Richards, Morgan, Weibull, France ve Baranyi modellerinden yararlanarak matematiksel fonksiyonların uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Her iki set için de, farklı büyüme oranları ve gecikme sürelerine sahip çok çeşitli şekiller sağlamak için eğriler seçmişlerdir. Bununla birlikte çok çeşitli eğri şekilleri ve profilleri üzerinde ayrıntılı bir istatistiksel değerlendirme, performansları ve doğrulukları açısından modeller arasında bazı önemli farklılıkları ortaya çıkarmışlardır. En iyi genel performansı gösteren modelleri, Baranyi, üç fazlı lineer, Richards ve Weibull modelleri olarak bildirmişlerdir. Ayrıca genel olarak, Baranyi modelinin çeşitli kriterlere göre incelenen büyüme eğrileri içinde en iyi davranışı gösterdiğini de ifade etmişlerdir.

Ölmez ve Aran [25] yaptıkları bir çalışmada Gompertz fonksiyonu kullanarak sıcaklık, pH, sodyum laktat ve sodyum klorür konsantrasyonlarının *B.cereus*'un lag fazı ve log fazı (çoğalma) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonucunda sıcaklık ve pH'nin sodyum laktatın antimikrobiyel etkisini azalttığını, sodyum klorürün ise sodyum laktat üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını bildirmişlerdir.

Gospavic vd. [26], 2 °C ile 20 °C aralığında değişen sıcaklıklarda aerobik şartlar altındaki kümes hayvanlarına *Pseudomonas spp.* bakterisinin büyümesini tahmin etmek için birincil modellerden Baranyi ve Roberts Modeli ile Modifiye Gompertz Fonksiyonu, ikincil model olan Ratkowski (Karekök) modelini uygulamışlardır. Birincil modellerden elde edilen sahte korelasyon katsayısı (Pseudo-R<sup>2</sup>), h ve hata kareler ortalaması (MSE) değerlerinin birbirine yakın olduğunu ve kümes hayvanlarında raf ömrünü tahmin etmek için çalışılan sıcaklık koşullarında *Pseudomonas spp.* türlerinin mikrobiyal büyümesini modellemek için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ikincil model olan Ratkowski (Karekök) modelinin de birincil modellere alternatif olarak kullanılabilceğini bildirmişlerdir.

Yang vd. [27] tarafından yapılan bir çalışmada *Vibrio parahaemolyticus* TGqx01 (serotip O3: K6) türünün farklı depolama sıcaklıklarında (0, 3, 6, 9, 12, 16, 20, 25, 30 ve 35 °C) somon eti üzerindeki büyüme ve hayatta kalma eğrileri belirlenmiştir. Depolama sırasında bu patojen bakterisinin büyüme veya inaktivasyon kinetiğini modellemek için Modifiye Gompertz ve Weibull denklemleri seçilmiştir. Somon balığındaki *V. parahaemolyticus* büyümesine ilişkin verilere Modifiye edilmiş Gompertz modeli, 16–35 °C'de (ortalama korelasyon katsayısı (R<sup>2</sup>) değeri 0.990) saklandığında iyi bir uyum sağlamıştır. Weibull denklemi ise somon balığı 0–12 °C'de saklandığında inaktivasyon verilerine iyi uyum göstermiştir. Weibull denkleminin R<sup>2</sup> değeri 0.920 olarak hesaplanmıştır.

Singh vd. [28], pH 7.8'e ayarlanmış sıvı tam yumurtaya yaklaşık 2.5-3.0 log CFU/mL *Salmonella spp.* inoküle etmişler ve farklı izotermal koşullarda (5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 37, 39, 41, 43, 45 ve 47 °C) bakterinin büyüme verilerini saptamışlardır. *Salmonella spp.*'nin 5, 7, 45 ve 47 °C'de büyüme göstermediğini gözlemişlerdir. Her sıcaklıktaki (10 °C ile 43°C aralığındaki) büyüme verilerini bir birincil model olan Baranyi modeli ile tahmin etmişlerdir. Baranyi modeline göre hata kareler ortalamasının karekökü

(RMSE) değerlerini 0.4643-1.0259 aralığında, Pseudo-R<sup>2</sup> değerlerini 0.9706-0.9936 aralığında hesaplamışlardır. Sıvı yumurtada *Salmonella spp.*'in 10 °C, 480 saatte durağan faza ulaştığını da bildirmişlerdir.

Lobacz vd. [29] yaptıkları bir çalışmada Camembert peynirinin olgunlaşması, Camembert peynirinin 3 °C ile 15 °C arasında değişen sıcaklıklarda soğukta depolanması ve mavi peynirin 3 °C ile 15 °C arasında değişen sıcaklıklarda soğukta saklanması sırasında *Listeria monocytogenes* türünün bakterilerine göre küfle olgunlaştırılmış peynirlerin güvenliğini modellemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalarında Baranyi modeli ve Modifiye Gompertz Fonksiyonunu büyüme eğrilerine uyarlamışlardır. Camembert peynirinin 13 °C'de 10 gün olgunlaşması sırasında *L. monocytogenes*'in sayısında bir artış meydana gelmediğini, Camembert peynirinin soğuk depolanması sırasında, *L. monocytogenes*'in uygulanan sıcaklığa bağlı olarak yoğun bir şekilde çoğaldığını bildirmişlerdir. Sıcaklık arttıkça, gecikme fazının süresinin azaldığını ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C sıcaklıklar için sırasıyla 146, 112, 66, 50 ve 33 saat değerlerine ulaştığını hesaplamışlardır. Mavi peynir durumunda ise gecikme fazının Camembert peynirine göre uzadığını ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C sıcaklıklar için sırasıyla 400, 350, 313, 257 ve 133 saate ulaştığını belirtmişlerdir. Analiz edilen durumların çoğunda (%80), en düşük Akaike Bilgi Kriteri (AIC) ve MSE değerleri ile Baranyi modelinin en doğru uyum verdiğini bildirmişlerdir.

Ağyar ve Üçkardeş [30] yaptıkları bir çalışmada *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus crispatus* ve *Lactobacillus rhamnosus* suşlarının GM17 ve MRS besi ortamlarında koloni büyüme, maksimum bakteri büyüme hızı ve maksimum büyüme hızına ulaştığı sürelerini Modifiye Gompertz modelinden yararlanarak araştırmışlardır. Modifiye Gompertz modeline göre *L. crispatus* bakteri suşunun maksimum büyüme miktarı ve maksimum büyüme hızını diğer iki suşa göre daha yüksek hesaplarken maksimum hıza ulaşma süresi arasında önemli bir farklılığın olmadığını bildirmişlerdir. Ayrıca *L. crispatus* bakteri suşunun ortamda *L. acidophilus* ve *L. rhamnosus* bakteri suşlarından baskın olduğunu belirlemişlerdir.

Kološta vd. [31], keçi ve koyun sütünden beş *Laktobacillus* suşu (*Lbc. plantarum* 17L1, *Lbc. plantarum* 18L2, *Lbc. paraplantarum* 25/1L, *Lbc. paracasei* 21L10 ve *Lbc. johnsonii* KB2-1) izole etmişlerdir. NaCl'nin bu suşların büyümesi üzerindeki etkisi; 37 °C'de kültürlenmiş çeşitli NaCl konsantrasyonları (%0, %2, %5) ile MRS ortamının 600 nm'deki optik yoğunluğu ölçülerek değerlendirilmiştir. MRS ortamını gece boyunca %1 kültürle inoküle etmişlerdir. Spesifik büyüme oranı ( $\mu_m$ ) ve gecikme fazını ( $\lambda$ ), TableCurve 2D yazılımı kullanılarak Gompertz fonksiyonundan hesaplamışlardır. Test edilen suşların (*Lbc. Johnsonii* KB2-1 hariç) model MRS ortamında NaCl'ye çok duyarlı olmadığını tespit etmişlerdir. %5 NaCl konsantrasyonu, 37 °C'de büyümelerini yavaşlatsa da, sert ve yarı sert peynirlerdeki tipik %2 NaCl konsantrasyonunun onları engellemediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca *Lbc. johnsonii* KB2-1 büyümesinin en çok NaCl eklenmesinden etkilendiği için fermente sütlü içeceklerin üretimi için uygun olabileceğini bildirmişlerdir.

Bednarko-Młynarczyk vd. [32] yaptıkları bir çalışmada keçi sütünden yaptıkları yoğurtları  $10^3$ - $10^4$  cfu/g başlangıç seviyesine kadar *S. aureus* ile kontamine ederek dört farklı sıcaklıkta (4 °C, 6 °C, 20 °C ve 22 °C) depolamışlardır. Depolama sırasında her iki saatte bir *S. aureus* oluşturan koloni sayımını yapmışlar. Bakteri sayısındaki değişikliklerin kinetiğini açıklamak için birincil modellerden olan Cole's modeli, Modifiye Gompertz Modeli ve Baranyi ve Roberts Modelinden yararlanmışlardır. Modellenen ve ölçülen değerler arasında, Pearson'un korelasyon katsayısının (r) ortalama değerlerine göre yaptıkları model uyumunun analizinde Cole's modelinin en kötü uyumu gösterirken Modifiye Gompertz Modelinin ise bakteri sayısını negatif bir değer olarak gösterdiğini belirtmişlerdir. r değerlerinin 0.959-0.995 aralığında değişen Baranyi ve Roberts Modelinin yoğurttaki stafilokokların sayısındaki değişikliklerin kinetiğini en iyi şekilde yansıttığını bildirmişlerdir.

Kowalik ve Lobacz [33], farklı sıcaklık (3-15 °C) aralığında depolanan Camembert tipi peynirindeki *Y. enterocolitica* bakterisinin davranışlarını izledikten sonra bu bakteriyi matematiksel modelleme uygulayarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada *Y. enterocolitica* bakterisinin Lag fazını Baranyi-Roberts model için 3 °C 132 saat, 9 °C 87 saat, 15 °C 39 saat olarak bildirirlerken Gompertz modeli için ise 3 °C 132 saat, 9 °C 91 saat, 15 °C 31 saat olarak bildirmişlerdir.

Özdemir [34], nar tanelerine ön işlemler uygulayarak 4 °C sıcaklıkta 28 gün süresince depolamıştır. Su (kontrol), %1 Askorbik asit, %1 Kitosan-%1 Askorbik asit, %2 Kitosan-%2 Askorbik asit çözeltileri ile muamale edilen nar tanelerini 7'şer gün aralıklarla toplam maya ve küf sayısı ile toplam anaerobik mezofilik canlı sayısındaki değişimini depolama süresince izlemiştir. Bu izleme sonuçlarını Gompertz fonksiyonundan yararlanarak matematiksel modelleme yaptığında %1 Kitosan-%1 Askorbik asit kaplı nar tanelerinin fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan 21 gün süresince tüketilebilir durumda olduğunu belirtmiştir.

Kalkan [35] yaptığı çalışmada *Staphylococcus aureus*'a karşı *Lactobacillus rhamnosus* ile *Lactobacillus casei* Shirota'nın karışık kültürlerinin antimikrobiyel etkilerini en iyi açıklayan modeli tespit etmeyi amaçlamıştır. Çalışmasında doğrusal (Basit Doğrusal, Kuadratik, Kübik ve Kuartik) ve doğrusal olmayan (Logistik, Richards, Gompertz) modellerden yararlanmışdır. Model belirleme katsayısı ile hata kareler ortalaması istatistiklerinden yararlanılarak kullanılan Kuartik modelin *Staphylococcus aureus* inaktivasyonu için uygun olduğunu belirtmiştir.

Lytou vd. [36], tavuk göğsü filetosu örneklerini 4 °C, 10 °C ve 15 °C de 10 gün aerobik koşullarda depolandıktan sonra 3 saat 4 °C'de nar suyu içeren marine soslarına daldırmışlardır. Marine edilmiş ve marine edilmemiş numunelerin toplam canlı sayımından elde ettikleri sonuçlarını  $\mu_{max}$ 'ı hesaplamak için Baranyi modeline uyarlamışlardır. Dinamik sıcaklık koşulları altında modelin hem kontrol hem de marine edilmiş numunelerde toplam canlı sayımının büyümesini tatmin etmesine rağmen marine edilmiş numunelerin toplam canlı sayımının  $\mu_{max}$  değerinin sıcaklıktan bağımsız olarak kontrol numunelerine göre

önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Raf ömrünün sıcaklık bağımlılığını Arrhenius tipi bir denklem ile modellemişlerdir. Marine edilmiş numunelerin raf ömrünün kontrole kıyasla önemli ölçüde (4 °C'de 5 gün) arttırdığını hesaplamışlardır. Çalışmalarının sonucunda nar suyunun, tavuğun raf ömrünü arttırmak için marinasyonda alternatif bir bileşen olarak kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Quinto vd. [37] yaptıkları bir çalışmada et sosuna 4 °C, 10 °C, 16 °C ve 22 °C'de *Listeria monocytogenes* Scott A'nın üç farklı popülasyonunun büyüme kinetiği üzerindeki *Lactobacillus sakei* MN suşunun bakteriosin üreten üç farklı popülasyonuna etkisini birlikte inoküle ederek incelemişlerdir. Baranyi modelini *Listeria monocytogenes* ve *Lactobacillus sakei*'nin her suşu veya birlikte inoküle edilen suşların kinetik parametrelerini tahmin etmek için kullanmışlardır. Tüm sıcaklıklarda en yüksek *Listeria monocytogenes* popülasyonunun saf kültürlerde elde edildiğini, *Lactobacillus sakei*'nin farklı inoküle kültürleri ile hazırlanan kültürlerde ise azalmanın olduğunu bildirmişlerdir.

Szczawiński vd. [38], ticari yoğurtların farklı sıcaklıklarda depolama sırasında *Listeria monocytogenes* patojen bakterisinin davranışını tahmin etmeyi amaçladıkları bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada yoğurt örneklerini üç *L. monocytogenes* suşunun karışımı ile aşımamışlar ve 3, 6, 9, 12 ve 15 °C'de 16 gün depolamışlardır. *Listeria monocytogenes* sayısını 0, 1, 2, 3, 5, 7,9, 12, 14 ve 16 günlük depolamadan sonra belirlemişlerdir. Birincil modellerden General Linear Regression model yardımıyla bakteri sayısındaki en yavaş azalma 6 °C'de (D-10 değeri = 243,9 saat) saklanan örneklerde görülürken, bakteri sayısında en yüksek azalma 15 °C'de (D-10 değeri= 87.0 saat) saklanan örneklerde görüldüğünü hesaplamışlardır. Birincil modelden hesaplanan *L. monocytogenes*'in ortalama hayatta kalma/inaktivasyon oranlarının doğal logaritmasını Linear ve Polinom olmak üzere iki ikincil modele uyarlamışlardır. Her iki ikincil modelden elde edilen matematiksel denklemler, 3 °C ile 15°C sıcaklık aralığında depolanan yoğurttaki *L. monocytogenes*'in hayatta kalma/inaktivasyon oranının tahminde bir araç olarak kullanılabileceğini, ancak Polinom modelin deneysel verilere daha iyi bir uyum sağladığını belirtmişlerdir.

Vega vd. [39], bir sebze içeceğinde aşıl原因 *L. innocua* CECT 910 hücrelerinin inaktivasyon eğrilerini üç pH koşulu (4.25, 4.75 ve 5.20), dört sıcaklık seviyesi (50, 55, 60 ve 65 °C) ve farklı işlem sürelerinden (0-75 dakika) elde etmişlerdir. Bu inaktivasyon eğrileri log-lineer bir ilişki göstermediğinden GInaFIT yazılımı kullanılarak Weibull modeli, Geeraerd modeli, Cerf with shoulder modelinden ve Statgraphics Centurion XV kullanılarak Modifiye Gompertz denkleminde yararlanılarak açıklanmışlardır. Her modelden elde edilen regresyon katsayıları, 50 °C, pH 4.75 ve 65 °C, pH 5.20 koşullarında %80 önemli bulunurken bunların dışında tüm durumlarda %90 önemli olduğunu bulmuşlardır. Her pH seviyesinde en iyi uyum sunanın Modifiye Gompertz denklemi, bunu Geeraerd ve Cerf modellerinin takip ettiğini, Weibull dağılım fonksiyonunun ise sonuncu olduğunu bildirmişlerdir. Modifiye Gompertz denkleminin sebze içeceğinde düşük işlem sıcaklıklarında *L. innocua*'nın termal

inaktivasyonunu açıklamak için ilk seçenek olması gerektiğini de ifade etmişlerdir.

Bursova vd. [40], farklı depolama koşullarındaki (8 °C ve 24 °C sıcaklık) pastörize inek ve keçi sütü örneklerine *Y. enterocolitica* patojen bakterisini inkübe ederek bakterinin büyüme potansiyelini incelemişlerdir. Mikrobiyal büyüme verilerini ComBase Combined Database for Predictive Microbiology'nin (www.combase.cc) bir DMFit modülü kullanılarak Baranyi-Roberts modelinden hesaplayarak incelemişlerdir. *Y. enterocolitica* bakterisinin büyüme eğrisinde sabit faza 8 °C'de altı ve sekiz gün içinde, 24 °C'de ise iki ile üç gün içinde zirveye ulaştığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte pastörize sütün az miktarda dahi kontamine olması durumunda *Y. enterocolitica* bakterisi depolama sıcaklığına bağlı olarak saatler veya günler içinde enfektif bir doza çoğalabileceğini belirtmişlerdir.

Gonçalves vd. [41], taze ette farklı sıcaklıklarda (4 °C, 7 °C, 12 °C) ve farklı pH değerlerinde (5.5, 6.0, 6.3) *Pseudomonas fluorescens* bakterisinin büyümesini tahmin etmek için birincil modellerden olan Baranyi ve Roberts Modeli ile Modifiye Gompertz modelini DMFit 3.0 programını kullanarak matematiksel modelleme yapmışlardır. Bu birincil modellerden elde edilen R<sup>2</sup> değerlerinin 0.918-0.990 aralığında, RMSE değerlerinin ise 0.0959-0.2967 aralığında değiştiğini gözlemleyerek bu modellerin test edilen koşullar altında *P. fluorescens*'in büyümesini tahmin etmede uygulanabileceğini bildirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda elde edilen R<sup>2</sup> değerleri ve RMSE değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Mishra vd. [42], *S. enterica* ve *L. monocytogenes* patojen bakterilerinin farklı koşullar ve depolama sıcaklıkları altında büyümesi ve hayatta kalmasına yönelik deneysel verileri yayınlanmış çalışmalardan elde etmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda (°C) spesifik büyüme oranını (ln CFU/g.sa) hesaplamak için birincil model olarak üç aşamalı doğrusal model ve ikincil model olan Karekök modeli kullanılarak prediktif model geliştirmişlerdir. MATLAB yazılımı kullanılarak Karekök modeline büyüme oranı verilerini yerleştirmişlerdir. Büyüme oranını Karekök modelinde *S. enterica* için  $\mu = (0.020 (\text{Sıcaklık} + 0.57))^2$ , *L. monocytogenes* için  $\mu = (0.023 (\text{Sıcaklık} - 0.60))^2$  olarak hesaplamışlardır. Yeşil yapraklı sebzelerin üretimi ve tedarigi süresinde *S. enterica*'nın büyüme-hayatta kalma modeli ve *L. monocytogenes*'in büyüme modelini birkaç dinamik zaman-sıcaklık profili kullanarak doğrulamışlardır. *L. monocytogenes* bakterisinin büyüme verilerindeki

değişkenliğe kıyasla *S. enterica*'nın büyüme verilerinde daha fazla değişkenlik gözlemlenmiştir. Bunun nedenini de, *S. enterica* bakterisinin büyüme modellerini geliştirmek için kesilmiş/parçalanmış ve kesilmemiş yeşil yapraklı sebzelerin deneylerde kullanılması olabileceğini ifade etmişlerdir.

Savran [43], yoğurt üretiminde kullanılan geleneksel starter kültüre karşı *Salmonella Enteritidis*'in fermantasyon işlemi süresince canlı kalma durumunu 30 dakika aralıklarla sayım yaparak Baranyi modeli ile ifade etmiştir. Sütte 3, 5 ve 7 log KOB/mL inokülasyon düzeylerinde *Salmonella Enteritidis* patojen bakterisini fermantasyon aşamasında ilave ederek fermentasyon süresince sayım yapmış ve elde ettiği sayım sonuçlarını DMFit yazılımı kullanılarak Baranyi modeline uygulamıştır. Bu çalışmada maksimum gelişme hızı ( $\mu_{max}$ ) değerlerini (0.26–0.38 log KOB/g/sa) elde ederek başlangıç inokülasyon düzeylerinin *Salmonella Enteritidis*'in üzerine etki etmediğini göstermesinin yanısıra lag fazı ( $\lambda$ ) arasında da belirgin bir ilişkinin gözlenmediğini bildirmiştir. Ayrıca Baranyi modelinin standart hatasını 0.02-0.05 değerleri arasında, determinasyon katsayısını da (R<sup>2</sup>) 0.95-0.97 aralığında bulmuştur.

Silva vd. [44], vakumlu paketlenmiş dilimlenmiş jambonda izotermal olmayan koşullar altında *Lactobacillus viridescens* büyümesini modellemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, taze jambon parçasını dilimleyerek *Lactobacillus viridescens* ile aşılandıktan sonra vakumla paketlenmişlerdir. Bu paketleri beş farklı izotermal olmayan koşullarda (4 ile 25 °C arasında) ve bir izotermal koşul (8 °C) altında sıcaklık kontrollü inkübatörde depolama işlemi uygulayarak *Lactobacillus viridescens* büyümesini ölçmüşlerdir. Birincil model olan Baranyi ve Roberts Modeli ve ikincil modeli olan Karekök modellerin tahmin yeteneği, izotermal koşullar altında (4 ve 30 °C arasında) MRS kültür ortamında tahmin edilen parametreleri kullanılarak değerlendirmişlerdir. MRS ortamında elde edilen matematiksel modelleri, vakumla paketlenmiş jambonda *L. viridescens* büyüme verilerinin tahmin edilen değerlerin karşılaştırılmasıyla değerlendirmişlerdir. Bias faktörünü 0.95 ile 1.03 arasında; doğruluk faktörünü 1.04 ile 1.07 arasında ve RMSE değerlerini 0.76 ile 1.33 arasında hesaplamışlardır. MRS ortamındaki izotermal büyüme verilerinden elde edilen model parametrelerinin analiz edilen sıcaklık aralığında izotermal olmayan koşullar altında ticari bir jambonun raf ömrünün tahmin edebileceğini bildirmişlerdir

**Tablo 1.** *Pseudomonas fluorescens*'in R<sup>2</sup> değerleri ve RMSE değerleri

Büyüme Koşulları	Baranyi ve Roberts Modeli		Modifiye Gompertz Modeli	
	R <sup>2</sup> değeri	RMSE değeri	R <sup>2</sup> değeri	RMSE değeri
4 °C pH 5.5	0.98	0.1701	0.97	0.2105
4 °C pH 6.0	0.99	0.1026	0.99	0.0959
4 °C pH 6.3	0.99	0.8333	0.99	0.0854
7 °C pH 5.5	0.989	0.1703	0.996	0.1077
7 °C pH 6.0	0.990	0.1469	0.993	0.1284
7 °C pH 6.3	0.992	0.1400	0.994	0.1154
12 °C pH 5.5	0.987	0.1815	0.972	0.2612
12 °C pH 6.0	0.991	0.1614	0.979	0.2505
12 °C pH 6.3	0.984	0.2126	0.968	0.2967

Bolivar vd. [45], *L. monocytogenes*'in büyümesini, farklı atmosfer koşullarında (yani azaltılmış oksijen ve aerobik) 2–20 °C sıcaklık aralığında optik yoğunluk (OD) ölçümleri aracılığıyla balık bazlı meyve suyunda (FBJ) değerlendirmişlerdir. Baranyi ve Roberts modelini gözlemlenen büyüme eğrilerinden  $\mu_{max}$ 'ı tahmin etmek için kullanmışlardır. Ayrıca depolama sıcaklığının  $\mu_{max}$  üzerindeki etkisini de Ratkowsky Karekök modeli kullanarak modellemişlerdir. Geliştirilen modeller, statik ve dinamik sıcaklık koşullarında depolanan çipura ve levrek filetolarında *L. monocytogenes* için deneysel büyüme verileri kullanılarak doğrulamışlardır. Azaltılmış oksijen koşulları altında oluşturulan modelin Akdeniz balık ürünlerinde *L. monocytogenes* büyümesini yeterince tahmin etmek için iyi performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Kim vd. [46], farklı sıcaklıklarda (5, 22 ve 30 °C, 72 saate kadar) depolanmış ticari tuzlu napa lahanalarındaki mikrobiyal gelişmeleri (aerobik plaka sayımı, toplam koliform ve laktik asit bakterileri) araştırmışlardır. Tuzlanmış napa lahanalarının raf ömrünü belirlemek için Modifiye Gompertz denklemini kullanmışlardır. Modifiye Gompertz modeline göre ( $R^2 > 0.97$ ), en yüksek büyümeyi 30 °C'de (0.61 log CFU/h) laktik asit bakterilerinde, en düşük büyümeyi ise 5 °C'de (0.04 log CFU/h) toplam koliformda gözlemişlerdir. Raf ömrünü, aerobik plaka sayımı (7.7 log CFU/g) ve laktik asit bakterileri (6.0 log CFU/g) limitlerini kullanarak belirlemişlerdir. Tuzlanmış napa lahanasının mikrobiyolojik kabul süresi 22 °C ve 30 °C'de sırasıyla 12.6 saat ve 9.3 saat olarak tahmin etmişlerdir. Bu nedenle tüketicilere, ürünü oda sıcaklığında 12 saatte (yazın daha hızlı (9 saat)) kullanmalarını ya da buzdolabında depolamaları gerektiğini önermişlerdir.

Silvestri vd. [47], farklı sıcaklıklarda (4, 7, 10, 15, 25 ve 30 °C) *Aeromonas hydrophila* DSM-30187, *Listeria monocytogenes* DSM-20600 ve *Yersinia enterocolitica* DSM-27689 suşlarının büyüme davranışını incelemişlerdir. Ayrıca suşların hücre konsantrasyonlarını başlatmak için (10 ve 10<sup>6</sup> CFU/ml) büyüme oranları ve ilgili gecikme fazların aktivasyon enerjilerinden (Ea) yararlanmayı amaçlamışlardır. Bu uygulamada Arrhenius modelinin faydalanmışlardır. Arrhenius modeline göre hesaplanan latent dönemlerin süresine dahil olan Ea değerleri *A. hydrophila* ve *L. monocytogenes* suşları için karşılaştırılabilirken (21.3 ile 24.4 kcal/mol), *Y. enterocolitica* (16.6 kcal/mol) önemli ölçüde farklılık göstermiştir. Büyüme oranlarının Ea değerleri *A. hydrophila* ve *L. monocytogenes* suşları için benzerlik gösterirken (20.9 ila 21.1 kcal/mol), *Y. enterocolitica* için oldukça düşük olduğunu (14.2 ile 16.7 kcal/mol) hesaplamışlardır. Test edilen *Y. enterocolitica* suşunun diğer iki patojen suşuna kıyasla farklı bir davranış gösterdiğini ve düşük sıcaklıkta önemli ölçüde daha hızlı büyüme yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Ha vd. [48] yaptıkları bir çalışmada kurutulmuş dana etini 10 g'lık parçalar haline getirdikten sonra örnekleri *S. aureus* ATCC13565 ile inoküle ederek aerobik koşullarda 10 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C ve 35 °C'de 600 saat depolamışlardır. Birincil bir model geliştirmek için,  $\rho$  (eğrilerin şekli) ve

Delta (ilk ondalık azaltma için gerekli süre) değerlerini hesaplamak amacıyla hücre sayısı verilerine Weibull modelini yerleştirmişlerdir. İkincil modelleme içinse, depolama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Delta değerlerine bir polinom modeli yerleştirmişlerdir. Model tahmininin doğruluğunu değerlendirmek için, tahmin edilen verilerin gözlenen verilerle karşılaştırılmasıyla RMSE değerlerini hesaplamışlardır. Canlı kalan *S. aureus* hücre sayılarının tüm depolama sıcaklıklarında azaldığını gözlemlemişlerdir. Delta değerlerini 10 °C, 20 °C ve 25 °C değerlerinde 30 °C ve 35 °C değerlerinden daha uzun olarak hesaplamışlardır. İkincil modelin 0.920 R<sup>2</sup> değeriyle  $\rho$ 'nin sıcaklık üzerindeki etkisini iyi tanımladığını bildirmişlerdir. Ayrıca doğrulama analizinde, 0.325'lik RMSE değerlerinin model performansına uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ek olarak kurutulmuş sığır etinin düşük su aktivitesi değerine sahip olmasına rağmen, *S. aureus* kontamine olursa hücrelerin düşük sıcaklıkta uzun süre hayatta kalabileceğini ve gıda güvenliği sorunlarına neden olabileceğini de bildirmişlerdir.

*Lactobacillus sakei* suşu L115'in sıvı kültürde *Listeria monocytogenes*'e karşı inhibe etme kapasitesini 4, 8, 11, 15 ve 20 °C'de test eden Costa vd. [49], *Lb. sakei* L115'in varlığında birlikte kültürlendiğinde, *Listeria monocytogenes*'in maksimum popülasyon yoğunluğu ve büyüme oranının belirgin şekilde azaldığını, dolayısıyla *Lb. sakei* L115'in bir dizi karışık patojen suşuna karşı inhibe edici etkisini doğrulamışlardır. Hem monokültürde hem de ortak kültürde mikroorganizmaların büyümesini tanımlamak için kinetik parametreler (maksimum spesifik büyüme hızı ve maksimum popülasyon yoğunluğu) Baranyi büyüme modelinin modifikasyonlarına dayalı olarak geliştirilen Jameson etkisi, Modifiye Jameson etkisi ve Lotka-Volterra modellerinden yararlanarak tahmin etmişlerdir. *Lb. sakei* ve *L. monocytogenes* kokteylinin eşzamanlı büyümesi Lotka-Volterra modeli ve Modifiye Jameson modeli ile daha iyi simüle edilebileceğini belirtmişlerdir. Ortak kültürde, *L. monocytogenes* maksimum spesifik büyüme hızının azaldığını (örneğin, 4 °C'de inhibisyon katsayısı ( $\alpha$ ) =%31) ve maksimum popülasyon yoğunluğunun monokültürden çok daha düşük olduğunu (örneğin, 4 °C'de  $\alpha$  =%36) gözlemişlerdir. *Lb. sakei* L115'in yüksek konsantrasyonda kombinasyonu, düşük sıcaklıklar, besin tükenmesi ve bakteriyosin üretimi *L. monocytogenes*'in büyümesinin engellenmesinin ana nedenleri olabileceğini bildirmişlerdir.

Tarлак vd. [50] yaptıkları bir çalışmada farklı izotermal koşullarda (4, 12, 20 ve 28 °C) depoladıkları beyaz düğme mantarları (*Agaricus bisporus*) üzerinde *Pseudomonas spp.*'nin deneysel büyüme verilerini Baranyi modeli uygulayarak *Pseudomonas spp.*'in düğme mantarlar üzerindeki kinetik büyüme parametrelerini elde etmişlerdir. Baranyi modeli, tüm izotermal depolama sıcaklıklarında RMSE değerlerini 0.193'ten düşük ve ayarlanmış-R<sup>2</sup> değerlerini 0.975'ten yüksek verdiğini gözlemişlerdir. Baranyi modelinden elde edilen  $\mu_{max}$ 'ı Ratkowsky ve Arrhenius modelleri gibi ikincil modeller kullanılarak sıcaklık ile ilişkilendirmişlerdir. Ratkowsky modelinin  $\mu_{max}$ 'ın sıcaklık bağımlılığını Arrhenius modelinden daha iyi



tanımladığını bildirmişlerdir. Yüksek ayarlanmış-R<sup>2</sup> ve düşük RMSE değerleri, Ratkowsky modelinin mantarların depolama sıcaklığı ile *Pseudomonas spp*'nin maksimum spesifik büyüme hızı arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

### 3 Sonuçlar

Bu alanda yapılan çalışmaların verdiği sonuç matematiksel modellerin, zaman alıcı ve maliyetli kalite kontrol analizlerinin yerine daha kısa bir zaman içerisinde sonuç alınabilecek analizlere imkan tanımaktadır. Ayrıca ekonomik açıdan da faydalı olmaktadır. Elde edilen veriler ışığında Prediktif mikrobiyoloji modelleri, mikrobiyal gıda güvenliğini ve kalitesini iyileştirmek için pratik uygulama potansiyeline sahiptir. Gıdalar üzerindeki mikroorganizma sayısını belirlemek için geleneksel sayım tekniklerine bir alternatif olmaktadır.

Birçok gıda ürününün işlenmesi, paketlenmesi, dağıtılması ve depo koşullarının kontrolü, gıda güvenliğinin sağlanması gerek sağlık gerekse ekonomik önem taşımaktadır. Dolayısıyla gıda üretimi ve dağıtımındaki mikrobiyolojik riski kantitatif olarak değerlendirmek ve raf ömrünü belirlemek için prediktif modeller kullanılabilir. Gıda kaynaklı patojenlerin prediktif modeller kullanarak kontaminasyon riskini tahmin etmek için, bu mikroorganizmaların spesifik gıdalardaki davranışını analiz etmek gerekmektedir. Bu sebeple hammaddelerin tarladan sofraya kadar tüm aşamalarında mikroorganizmaların konsantrasyonu sürekli izlenmelidir. Böylece bozulmaya yatkın yiyeceğin kalitesini, mikrobiyal popülasyonun davranışı ve bunun çevre üzerindeki etkisi kolaylıkla tahmin edilebilir. Bu sayede gıda üretimi ve işleminde HACCP planlarında prediktif mikrobiyolojiden yararlanılabilir.

Prediktif mikrobiyoloji, hem gıda mikrobiyolojisi alanında hem de matematiksel modellemede yer alan bilim adamlarının disiplinler arası araştırma çabaları sayesinde ilerleme kaydetmiştir. Gıda ürünlerindeki modellerin doğrulanması, uygun modellerin geliştirilmesi ve bunların gıda güvenliği yönetimine doğrudan uygulanması önemlidir. Bunun için potansiyeli olan bu alanda yapılan çalışmalara ihtiyaç vardır.

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

### Kaynaklar

- [1] M. Mutlu, Matematik modelleme ve gıda mühendisliğinde kullanımı. 9. Gıda Kongresi, sayfa 31-32, Bolu, Türkiye, 24-26 Mayıs 2006.
- [2] Y. O. Devres ve M. Pala, Gıda sanayiinde matematiksel modellemenin önemi ve uygulama alanları. Gıda, 18 (3), 173-181, 1993.
- [3] L. Verschaffel, B. Greer and E. De Corte, Everyday knowledge and mathematical modeling of school word problems. In: Gravemeijer, K., Lehrer, R., Van Oers, B., Verschaffel, L. (eds) Symbolizing, Modeling and Tool Use in Mathematics Education. Mathematics Education Library, Springer, Dordrecht, vol 30, pp.

- 257-276, 2002. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3194-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3194-2_16).
- [4] T. A. Roberts, Mathematical modeling of microbial growth. 3th Karlsruhe Nutrition Symposium European Research Towards Safer and Better Food, pp 33-42, Karlsruhe, Germany, October 18-20, 1998.
- [5] H. Bozkurt and O. Erkmen, Predictive modelling of *Yersinia enterocolitica* inactivation in Turkish Feta cheese during storage. Journal of Food Engineering, 47, 81-87, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00102-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00102-3).
- [6] T. K. Soboleva, A. B. Pleasants and G. le Roux, Predictive microbiology and food safety. International Journal of Food Microbiology, 57 (3), 183-192, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(00\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(00)00265-8).
- [7] Y. Yoon, Principal theory and application of predictive microbiology. Food Science and Industry, 43 (1), 70-74, 2010. pISSN: 0257-2397.
- [8] M. H. Zwietering, I. Jongenburger, F. M. Rombouts and K. Vantriet, Modeling of the bacterial-growth curve. Applied and Environmental Microbiology, 56, 1875-1881, 1990. <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>.
- [9] M. H. Zwietering, J. C. de Wit and S. Notermans, Application of predictive microbiology to estimate the number of *Bacillus cereus* in pasteurised milk at the point of consumption. International Journal of Food Microbiology, 30, 55-70, 1996. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(96\)00991-9](https://doi.org/10.1016/0168-1605(96)00991-9).
- [10] L. Huang, A comprehensive data analysis tool for predictive microbiology. International Journal of Food Microbiology, 171, 100-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodmicro.2013.11.019>.
- [11] F. Devlieghere, K. Francois, B. De Meulenaer and K. Baert, Modelling Food Safety. In: Safety in the Agri-Food Chain. P. A. Luning, F. Devlieghere and R. Verhe (eds). Wageningen: Wageningen Academic Publishers, pp. 397-439, 2006.
- [12] R. C. Whiting and R. L. Buchanan, A classification of models for predictive microbiology. Food Microbiology, 10, 175-177, 1993.
- [13] J. Ha, E. Gwak, M. H. Oh, B. Park, J. Lee, S. Kim, H. Lee, S. Lee, Y. Yoon and K. H. Choi, Kinetic behavior of *Salmonella* on low NaNO<sub>2</sub> sausages during aerobic and vacuum storage. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 36 (2), 262-266, 2016. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.2.262>.
- [14] O. Erkmen, Gıda Mikrobiyolojisi. Efil Yayınevi, 2.Baskı, Ankara, 2010.
- [15] A. M. Gibson, N. Bratchell and T. A. Roberts, The effect of sodium chloride and temperature on the rate and extent of growth of *Clostridium botulinum* type A in pasteurized pork slurry. Journal of Applied Bacteriology, 62, 479-490, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1987.tb02680.x>.
- [16] J. Baranyi, T. A. Roberts and P. McClure, A non-autonomous differential equation to model bacterial growth. Food Microbiology, 10, 43-59, 1993. <https://doi.org/10.1006/fmic.1993.1005>.

- [17] R. L. Buchanan, Predictive food microbiology. Trends in Food Science Technology, 4, 6-11, 1993. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(05\)80004-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(05)80004-4).
- [18] R. C. Whiting, Microbial modelling in foods. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 35 (6), 467-494, 1995. <https://doi.org/10.1080/10408399509527711>.
- [19] D. A. Ratkowsky, R. K. Lowry, T. A. McMeekin, A. N. Stokes and R. E. Chandler, Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range. Journal of Bacteriology, 154 (3), 1222-1226, 1983. <https://doi.org/10.1128/jb.154.3.1222-1226.1983>.
- [20] B. Fu, P. S. Taoukis and T. P. Labuza, Predictive microbiology for monitoring spoilage of dairy products with time-temperature integrators. Journal of Food Science, 56 (5), 1209-1215, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1991.tb04736.x>.
- [21] İ. Y. Genç ve A. Diler, Matematiksel modelleme ve su ürünlerinde kullanılan raf ömrü tahmin modelleri. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yalvaç Akademik Dergisi, 2 (1), 13-18, 2017.
- [22] P. Dalgaard, O. Mejlholm and H. H. Huss, Application of an iterative approach for development of a microbial model predicting the shelf-life of packed fish. International Journal of Food Microbiology, 38, 169-179, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(97\)00101-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(97)00101-3).
- [23] K. Koutsoumanis, Predictive modeling of the shelf life of fish under nonisothermal conditions. Applied And Environmental Microbiology, 67 (4), 1821-1829, 2001. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.4.1821-1829.2001>.
- [24] S. Lopez, M. Prieto, J. Dijkstra, M. S. Dhanoa and J. France, Statistical evaluation of mathematical models for microbial growth. International Journal of Food Microbiology, 96, 289-300, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.026>.
- [25] H. Ölmez ve N. Aran, Sodyum laktatın *Bacillus cereus*'ün büyüme kinetiği üzerindeki etkisi. İtühendisi/d mühendislik, Cilt:4, Sayı:3, 32-38, 2005.
- [26] R. Gospavic, J. Kreyenschmidt, S. Bruckner, V. Popov and N. Haque, Mathematical modelling for growth of *Pseudomonas* spp. in poultry under variable temperature conditions. International Journal of Food Microbiology, 127, 290-297, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.07.022>.
- [27] Z. Yang, X. Jiao, P. Li, Z. Pan, J. Huang, R. Gu, W. Fang and G. Chao, Predictive model of *Vibrio parahaemolyticus* growth and survival on salmon meat as a function of temperature. Food Microbiology, 26, 606-614, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.04.004>.
- [28] A. Singh, N. R. Korasapati, V. K. Juneja, J. Subbiah, G. Froning and H. Thippareddi, Dynamic predictive model for the growth of *Salmonella* spp. in liquid whole egg. Journal of Food Science, 76 (3), 225-232, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02074.x>.
- [29] A. Lobacz, J. Kowalik and A. Tarczyska, Modeling the growth of *Listeria monocytogenes* in mold-ripened cheeses. Journal of Dairy Science, 96, 3449-3460, 2013. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5964>.
- [30] O. Ağyar ve F. Üçkardeş, Probiyotik özellikte üç farklı Laktik Asit Bakterileri grubu suşunun koloni büyüme eğrilerinin modifiye edilmiş Gompertz modeli ile modellenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 1 (3), 430-434, 2014.
- [31] M. Kološta, A. Slottová, M. Drončovský, L. Klapáčová, V. Kmet', D. Bujňáková, A. Lauková, G. Greif, M. Greifová and M. Tomáška, Characterisation of lactobacilli from ewe's and goat's a milk for their further processing re-utilisation. Potravinarstvo Scientific Journal for Food Industry, 8 (1), 130-134, 2014. <https://doi.org/10.5219/354>.
- [32] E. Bednarko-Młynarczyk, J. Sztejn, I. Białobrzewski, A. Wiszniewska-Łaszczych and K. Liedtke, Modeling the kinetics of survival of *Staphylococcus aureus* in regional yogurt from goat's milk. Polish Journal of Veterinary Sciences, 18 (1), 39-45, 2015. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2015-0005>.
- [33] J. Kowalik and A. Lobacz, Development of a predictive model describing the growth of *Yersinia enterocolitica* in Camembert-type cheese. International Journal of Food Science and Technology, 50, 811-818, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12715>.
- [34] K. S. Özdemir, Gıda ve biyoaktif gıda bileşenlerinin kaplanması: Proses ve depolama stabilitesi üzerine etkileri. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2015.
- [35] S. Kalkan, Probiyotik laktik asit bakterilerinin *Staphylococcus aureus*'a karşı antimikrobiyel etkilerinin farklı matematiksel modeller ile analizi. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1 (2), 150 - 159, 2016. ISSN: 2536-4383.
- [36] A. Lytou, E. Z. Panagou and G.-J. E. Nychas, Development of a predictive model for the growth kinetics of aerobic microbial population on pomegranate marinated chicken breast fillets under isothermal and dynamic temperature conditions. Food Microbiology, 55, 25-31, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.11.009>.
- [37] E. J. Quinto, J. M. Marín and D. W. Schaffner, Effect of the competitive growth of *Lactobacillus sakei* MN on the growth kinetics of *Listeria monocytogenes* Scott A in model meat gravy. Food Control, 63, 34-45, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.11.025>.
- [38] J. Szczawiński, M. E. Szczawińska, A. Łobacz and A. Jackowska-Tracz, Modeling the effect of temperature on survival rate of *Listeria monocytogenes* in yogurt. Polish Journal of Veterinary Sciences, 19 (2), 317-324, 2016. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0039>.
- [39] S. Vega, D. Saucedo, D. Rodrigo, C. Pina, C. Armero and A. Martínez, Modeling the isothermal inactivation curves of *Listeria innocua* CECT 910 in a vegetable beverage under low-temperature treatments and different pH levels. Food Science and Technology International, 22 (6), 525-535, 2016. <https://doi.org/10.1177/1082013215624807>.

- [40] S. Bursova, L. Necidova, D. Harustiakova and B. Janstova, Growth potential of *Yersinia enterocolitica* in pasteurised cow's and goat's milk stored at 8 °C and 24 °C. *Food Control*, 73, 1415-1419, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.11.006>.
- [41] L. D. A. Gonçalves, R. H. Piccoli, A. P. Peres, A. V. Saúde, Predictive modeling of *Pseudomonas fluorescens* growth under different temperature and pH values. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48, 352–358, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.12.006>.
- [42] A. Mishra, M. Guo, R. L. Buchanan, D. W. Schaffner and A. K. Pradhan, Development of growth and survival models for *Salmonella* and *Listeria monocytogenes* during non-isothermal time-temperature profiles in leafy greens. *Food Control*, 71, 32-41, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.009>.
- [43] D. Savran, Yoğurt üretimi ve depolaması sırasında *Salmonella Enteritidis*'in canlı kalma durumunun modellenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Türkiye, 2017.
- [44] N. B. Silva, D. A. Longhi, W. F. Martins, J. B. Laurindo, G. M. F. de Aragao and B. A. M. Carciofi, Modeling the growth of *Lactobacillus viridescens* under non-isothermal conditions in vacuum-packed sliced ham. *International Journal of Food Microbiology*, 240, 97–101, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.014>.
- [45] A. Bolívar, J. C. C. P. Costa, G. D. Posada-Izquierdo, A. Valero, G. Zurera and F. Pérez-Rodríguez, Modelling the growth of *Listeria monocytogenes* in Mediterranean fish species from aquaculture production. *International Journal of Food Microbiology*, 270, 14–21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.02.005>.
- [46] H. W. Kim, K. Lee, S. H. Kim and M. S. Rhee, Predictive modeling of bacterial growth in ready-to-use salted napa cabbage (*Brassica pekinensis*) at different storage temperatures. *Food Microbiology*, 70, 129-136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.09.017>.
- [47] A. Silvestri, E. Ferrari, S. Gozzi, F. Marchi and R. Foschino, Determination of temperature dependent growth parameters in psychrotrophic pathogen bacteria and tentative use of mean kinetic temperature for the microbiological control of food. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3023, 2018. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03023>.
- [48] J. Ha, J. Lee, S. Lee, S. Kim, Y. Choi, H. Oh, Y. Kim, Y. Lee, Y. Seo and Y. Yoon, Mathematical models to describe the kinetic behavior of *Staphylococcus aureus* in jerky. *Food Science of Animal Resources*, 39 (3), 371-378, 2019. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2019.e28>.
- [49] J. C. C. P. Costa, A. Bolívar, A. Valero, E. Carrasco, G. Zurera and F. Pérez-Rodríguez, Evaluation of the effect of *Lactobacillus sakei* strain L115 on *Listeria monocytogenes* at different conditions of temperature by using predictive interaction models. *Food Research International*, 131, 108928, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108928>.
- [50] F. Tarlak, M. Ozdemir and M. Melikoglu, Predictive modelling for the growth kinetics of *Pseudomonas spp.* on button mushroom (*Agaricus bisporus*) under isothermal and non-isothermal conditions. *Food Research International*, 130, 108912, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108912>.





# Shiitake mantarı (*Lentinula edodes*) ve eşsiz biyokaktif bileşeni: Lentinan

## Shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) and its unique bioactive compound: Lentinan

Emine Nakilcioğlu<sup>1</sup>, Selen Seyhan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir Türkiye

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, 35040, İzmir, Turkey

### Öz

Zengin besin içeriği ile bilinen mantarların insan sağlığı üzerine olumlu etkisi oldukça fazladır. Genellikle ilaç olarak kullanılmaktadır. Basidiomycetes sınıfına ait shiitake mantarı (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler), yenilebilir bir şapkalı mantar türüdür. Shiitake mantarı, nişasta, lif, kitin ve yüksek miktarda protein içermektedir. Ek olarak içeriğindeki gallik asit, gama aminobütirik asit (GABA), ergotionein ve kateşin ile shiitake mantarı araştırmacılar tarafından dikkat çekmektedir. Lentinan, yüksek moleküler ağırlığa sahip bir tür aktif polisakkarit olan *Lentinula edodes*'in ana etkili bileşenidir. Klinik ve farmakolojik çalışmalar, lentinanın antikanser, antitümör, bağışıklık fonksiyonunu düzenleyen ve interferon oluşumunu uyaran birçok fonksiyona sahip olduğunu göstermiştir. Bu derleme, lentinan ve sağlığa etkileri hakkında genel bir bakış sunmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Shiitake mantarı, Lentinan, Sağlık, *Lentinula edodes*, Fonksiyonel gıda

### 1 Giriş

İnsan sağlığını destekleyen gıdalardan biri de mantarlardır. Lif ve protein açısından zengin olmalarının yanı sıra kalorileri de oldukça düşüktür [1]. Ayrıca mineral (selenyum, potasyum ve bakır), vitamin (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>12</sub> C, D ve E), esansiyel aminoasitler açısından zengindir [2]. Aynı zamanda mantarlar, fenolik bileşikler, askorbik asit, tokoferoller, doymamış yağ asitleri ve karotenoid gibi biyoaktif bileşiklerin iyi kaynaklarıdır [3]. Genel olarak yenilebilir mantarlar incelendiğinde, anti-tümör, antiviral, antimikrobiyal, antioksidan, antidiyabetik ve immün düzenleyici etkileri olduğu görülmüştür [4]. Basidiomycetes sınıfında olan shiitake mantarı (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler), Çinlilerin 'kokulu mantar' olarak tanımladıkları şapkalı bir mantardır. Çin, Kore ve diğer Asya ülkelerinde yemek masalarında yer edinmiş önemli ve geleneksel bir yiyecektir. Dünya çapında yetiştirilen en yaygın ikinci mantar türüdür [5]. *Lentinula edodes*, modern biyoteknoloji alanına giren ilk tıbbi makrofungustur. Sadece besin değerine değil, aynı zamanda terapötik uygulamalar için olası potansiyele de atfedilen, küresel pazardaki en popüler ikinci yenilebilir mantardır [6]. Açık, kehribar mantarlar kestane, kayın veya dut gibi geniş yapraklı ağaçlarda

### Abstract

Mushrooms, known for their rich nutritional content, have a very positive effect on human health. It is often used as medicine. Shiitake mushroom (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler), belonging to the Basidiomycetes class, is an edible capped mushroom species. Shiitake mushrooms contain starch, fiber, chitin and high amount of protein. In addition, shiitake mushroom attracts attention with its gallic acid, gamma aminobutyric acid (GABA), ergothioneine and catechin content. Lentinan is the main active ingredient of *Lentinula edodes*, a kind of active polysaccharide with high molecular weight. Clinical and pharmacological studies have shown that lentinan has many functions such as anticancer, antitumor, regulating immune function and stimulating the formation of interferon. This review provides an overview of lentinan and its health effects.

**Keywords:** Shiitake mushroom, Lentinan, Health, *Lentinula edodes*, Functional food

bulunur. Shiitake mantarı, ondalık, düz veya düzensiz solungaçlara sahiptir. Hassas beyaz akınlarla kaplı bir gövdesi bulunmaktadır. Shiitake mantarları genellikle Asya'daki gıda pazarlarında satılmaktadır ve şu anda Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Avrupa'da yaygın olarak bulunmaktadır [7].

Lentinan, yenilebilir shiitake mantarının vejetatif kısımlarından elde edilen bir polisakkarittir. *L. edodes*'un meyve veren cisimlerinden veya miselyumundan ekstrakte edilen lentinan, ayrıca hücre duvarı bileşenidir [8].

Bu derlemenin amacı, yenilebilir mantar olan *Lentinula edodes*'in yetiştirilmesi, *Lentinula edodes*'ten elde edilen lentinanın besin değeri, elde edilmiş yöntemleri, kimyası ve sağlığa etkileri ile ilgili mevcut literatüre odaklanmaktadır.

### 2 Shiitake mantarının yetiştirilmesi

Shiitake Japonya ve Çin'de binlerce yıldır gıda ve ilaç olarak tanınmaktadır. Günümüze bakacak olursak Çin, ticari olarak satılanların %80-90'ını tedarik ederek dünyanın en büyük shiitake mantarı üreticisidir. Diğer birçok ülke, Kore, Japonya, Brezilya ve Amerika Birleşik Devletleri dahil olmak üzere shiitake mantarını daha az miktarda

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sselenseyhan@gmail.com (S. Seyhan)

Geliş / Received: 24.03.2022 Kabul / Accepted: 13.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1092860

üretmektedir. Küresel anlamda, her yıl yaklaşık olarak 150.000 ton shiitake mantarı üretilmektedir [9].

1982 yılında elde edilen raporlara göre bir tomurcuklanma yöntemi ile, Amerika Birleşik Devletleri'nde shiitake mantarının ticari ekimi için fırsatlar ortaya çıkmıştır [10]. Shiitake mantarı üretimi, günümüzde toplam mantar üretiminin (yıllık) yaklaşık %25'ine katkıda bulunmaktadır [11].

Shiitake mantarı, sentetik kütükler halinde (plastik gibi) veya sert ağaç kütüklerinde yetiştirilir. Kestane, meşe, akçaağaç, kayın, sığla ağacı, kavak, gürgen, demir ağacı, dut gibi ağaç kütüklerinde ve çürüyen ahşap üzerinde yetiştiği de görülmüştür. Doğal dağılımı, güneydoğu Asya'daki ılık ve nemli iklimleri içerir [7].

### 3 Shiitake mantarının besin değeri

Shiitake mantarı nişasta, lif, kitin ve yüksek miktarda protein içerir [12]. Shiitake mantarının besin değeri Tablo 1'de verilmiştir [13]. Çiğ shiitake mantarının, temel makro elementleri, potasyum, magnezyum ve fosfor'dur. Mikro temel element içeriği ise, kalsiyum, mangan, demir, bakır ve çinko'dur. Ek olarak, tiamin, niasin, kobalamin, askorbik asit, ergosterol ve folat içermektedir [14]. Yapılan bir çalışmada shiitake mantarının toplam fenolik içeriği, 4.26 mg GAE (gallik asit eşdeğeri)/g kuru madde şeklinde bulunmuştur. Ayrıca toplam antioksidan kapasitesi incelendiğinde, 1.40 µmol TE (Troloks eşdeğeri)/g kuru madde bulunmuştur. Toplam fenolik madde değeri diğer mantar türleri ile karşılaştırıldığında yüksek çıkmıştır [15].

Lee vd. [14], yaptıkları çalışmada, çiğ shiitake mantarlarındaki fonksiyonel bileşik içerikleri incelemişlerdir. İçeriğinde; gama aminobütirik asit (GABA), gallik asit, kateşin ve ergotionein bulunmuştur.

**Tablo 1.** Çiğ ve haşlanmış shiitake mantarının yaklaşık bileşimi (g/100 g kuru ağırlık)

	Çiğ Shiitake Mantarı	Kaynatılmış Shiitake Mantarı
Nem	87.83 ± 1.08	89.14 ± 0.24
Kül	7.36 ± 0.01	4.49 ± 0.10
Protein	16.82 ± 0.36	16.88 ± 0.08
Yağ	2.06 ± 0.01	1.57 ± 0.03
Karbonhidrat	73.43 ± 0.21	77.02 ± 0.14
Enerji (kcal/100g)	3.9 ± 0.1	3.5 ± 0.3

### 4 Lentinanın elde edilmesi

Mantar hücre duvarının yapısal bir bileşeni olan mantar polisakkaritleri için ekstraksiyon yönteminin seçimi hücre duvarının yapısına bağlıdır [8]. Ekstraksiyon yöntemi seçimi polisakkaritlerin yapısı ve suda çözünürlüğü ile değişmektedir. Doğal ürünlerden ham polisakkaritlerin ekstraksiyonu, bunların daha fazla saflaştırılması, karakterizasyonu ve kullanımı için önemli bir adımdır [16]. Ekstraksiyondaki amaç, mantarın hücre duvarını hafif veya güçlü ekstraksiyon koşullarıyla dış tabakadan iç tabakaya doğru kırmaktır [17]. Öncelikle shiitake mantarı (*Lentinula edodes*) hasat edilir ve kurutulmuş ve öğütme işlemine maruz bırakılmıştır. Ardından yapılacak ekstraksiyon yöntemi seçilerek ham polisakkarit elde edilmiştir. Rao vd. [16] yaptıkları çalışmada, lentinan için uygulanabilir ekstraksiyon yöntemlerini sıcak su ekstraksiyonu, asit

ekstraksiyonu, alkali ekstraksiyonu, mikrodalga ekstraksiyonu ve ultrasonik ekstraksiyon şeklinde bildirmişlerdir. Ardından ham polisakkarite dekolarizasyon (renksizleştirme), deproteinizasyon ve polisakkarit sınıflandırılması yapılmıştır. Zhang vd. [8], lentinan eldesi için yaptıkları çalışmada, ultra yüksek basınç uygulanmıştır.

### 5 Lentinanın kimyası

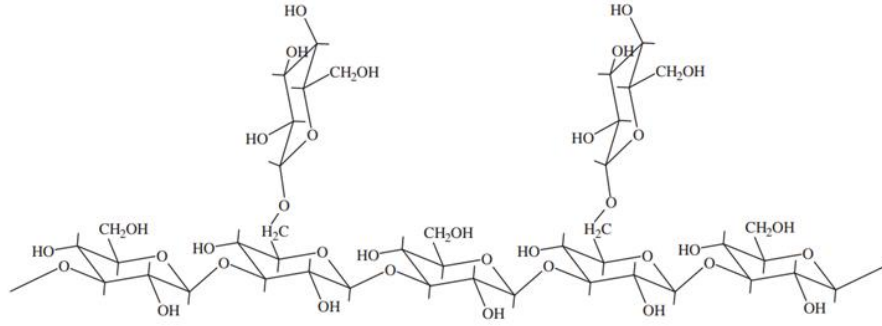
Doğal olarak oluşan polimerlerin yapısı çok karmaşıktır ve çeşitli biyoaktif etki gösteren yapıya sahiptirler. Bir polisakaritin kimyasal yapısı, monosakarit bileşimi, glikozidik bağların konumları, monosakarit dizisi ile tanımlanır. Lentinanın kimyasal yapısı, her beş (1-3)-β-glukopiranozid lineer bağlantısında iki adet (1,6)-β-glukopiranozid dalına sahiptir [8]. Ek olarak lentinan, suda çözünür ve yüksek molekül ağırlıklı bir polisakkarittir [18]. Zhang vd. [8], tarafından çalışmada lentinanın, yüksek basınçlı sıvı kromatografisi (HPLC), kızıl ötesi ışınım (IR) ve karbon-13 (C13) NMR spektroskopisi ile incelenmiş olup (1,6)-glukosil yan gruplarına sahip olduğu ve burada (1,3)-β-D-glukan içerdiği belirlenmiştir. Şizofilum komün mantarı tarafından üretilen nötr hücre dışı bir polisakkarit olan şizofilan, üçlü sarmal konformasyona sahiptir. Şizofilan, ana zincirdeki her üç β-(1,3)-D-glukopiranozid için bir β-(1,6)-D-glukopiranozid dallanmasına sahip β-(1,3)-D-glukandan oluşur. Lentinanın tekrar eden birimi şizofilandan farklıdır [8]. Bu yapı Şekil 1'de gösterilmektedir [19]. Lentinan, ısıya karşı stabil etki göstermektedir [20]. Sülfirik asit ve hidroklorik asit gibi güçlü asitlere karşı da oldukça karardır. Ayrıca lentinanın, birçok organik çözücülerde (alkol, eter, kloroform, pridin ve heksametilfosforamid vb.) çözünmediği gözlemlenmiştir. Ancak alkali ortamda sıcak su ile birlikte kolayca ayrışabildiği gözlemlenmiştir [21].

### 6 Lentinanın sağlığa etkileri

Mantarların ve özlerinin bağışıklık sistemine faydalı olduğu bilinmektedir. Ek olarak, antitümör ve antikanser etkiler göstererek potansiyel sağlık yararları olduğu görülmektedir. Bu sağlanan faydalar, β-glukanlar ya da polisakkaritler ve polisakkarit-protein komplekslerindeki içeriklerden kaynaklanmaktadır [7]. Genel olarak sağlığın iyileştirilmesi için glukan içeren doğal bileşikler Çin ve Japonya'da yıllardır yaygın olarak kullanılmıştır. β-(1,6) dallanmasına sahip β-(1,3)-glukan yapısındaki lentinan, shiitake mantarından saflaştırılarak elde edilen aktif maddedir [22]. Elde edilen genel klinik verilerde, lentinanın günlük yaşam kalitesini arttırdığı ve kanser tedavisi sırasında uygulanan yöntemlerin etkilerini iyileştirdiği kanıtlanmıştır [23]. Ayrıca tüberküloz üzerine olumlu etkileri vardır. Antibiyotikler ile vücuda alındıklarında mukozal bağışıklığı güçlendirirler [24].

#### 6.1 Tüberküloz

Lentinanın makrofajlar üzerinde önemli bir rol oynaması, hücre aracılı bağışıklık tepkisini geliştirme yeteneği ile açıklanabilir. Yapılan çalışmalarda, lentinanın alveolar makrofajlar ve *Mycobacterium tuberculosis* arasındaki etkileşimleri ve konakçı hücredeki mikobakterisidal etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. Lentinanın yineleyen birimi

Bu etkilerde, bir enfeksiyon durumu meydana gelmez veya alternatif olarak hemen ölüm gerçekleşmez. Konakçı hücre mikobakteriler tarafından hücre içi niş (mikroçevre) olarak kullanılmaktadır [24].

Markova vd. [25], lentinanın enfeksiyondan önce ve sonra uygulanması üzerine çalışmışlardır. Enfeksiyondan önce uygulaması, savunma potansiyelini oluşturmakta ve mikobakteriyel enfeksiyonu azaltabilmektedir.

Bağışıklık sisteminin modülasyonunun genel olarak tüberküloza karşı tedavi edici bir etki gösterdiği bilinmektedir. Bağışıklığı güçlendirmek için gerekli olan tepkiyi modüle etmek amaçlı yapılan çalışmada lentinan, hastalık ile ilgili herhangi bir enfeksiyon durumu meydana gelmeden incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, lentinan uygulanması bağışıklık sisteminin modülasyonunu güçlendirdiği gibi zaman içinde alveolar makrofajın aktivasyonunu hızlandırdığı ortaya konmuştur [26].

Markova vd. [24], bu konu üzerine yaptıkları çalışmada, lentinan ile etkileşimi olan alveolar makrofajlar tarafından nitrit üretiminin sonuçları incelenmiştir. Lentinan, reaktif nitrojen ara ürünlerinin indüksiyonu ile lizozomal enzimlerin aktivitesini arttırmıştır. Etkili olan fagolizozomal füzyon ve daha sonrasında yıkım ile ilişkili olan *M. tuberculosis*'e karşı gelişmiş bakterisidal etki ile kendini gösteren yüksek düzeyde alveolar makrofaj aktivasyonunu, lentinanın başlattığı görülmüştür.

Sonuç olarak, lentinan tarafından erken *M. tuberculosis*-alveolar makrofaj etkileşimlerinin modülasyonu, sonraki patogenez ve tüberküloz gelişimi üzerinde potansiyel bir etkiye sahip olabilir [24].

## 6.2 Kanser

Shiitake mantarından elde edilmiş bir polisakkarit olan lentinan, çeşitli biyoaktivitelere sahip doğal bir  $\beta$ -glukandır. Kanser tedavisinde kemoterapi ilaçları ile kombine edilebildiği ortaya konmuştur [27]. Kanser tedavisi maksimum anti-tümör etkinliği sağlamaya çalışırken son yıllarda kanser tedavisinde, minimum toksisite üzerine araştırmalar devam etmektedir [28]. Çin'de binlerce yıllık bir geçmişe sahip olan lentinan, antidiyabet, anti-inflamatuar ve antitümör özellikleri ile tıbbi değere sahiptir. Ek olarak metastatik kolorektal kanser (kolon kanseri), hepatoselüler karsinom (karaciğer kanseri), metastatik gastrointestinal

stromal tümörlerin tedavisinde FDA tarafından onaylanmış bir oral çoklu kinaz inhibitörüdür [27].

Wang vd. [29], lentinanın anti-kanser etkilerini arttırmak ve kanser kemoterapisinde kullanılan bir ilaç olan doksorubisin'in yan etkilerini azaltmak için yapılan çalışmada, bir konjugat oluşturulmuş ve sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlarda insan normal hücrelerine karşı toksik etkiyi azalttığı ve kemoterapötik etkiyi arttırdığı görülmüştür.

Selenyumun anti-tümör etkisi oldukça iyi bir seviyededir. Bu seviyeyi daha yükseltmek ve ilaç taşıyıcı olarak kullanmak amacıyla lentinan ile seleninik asit konjuge edilmiştir. Liu vd. [30], selenyum ve lentinanın etkisini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, melanom (cilt kanseri) ve kolon kanseri hücrelerinin büyümesini ve metastazını (organizmada herhangi bir yerde oluşan hastalığın yayılması) önemli ölçüde inhibe ettiği ve organlardaki toksik etkisinin azaldığı ortaya konmuştur. Lentinanın, selenyumun aktivitesini arttırdığı ve kemoterapi tedavisinin olası yan etkilerini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Li vd. [16], lentinanın meme kanseri hücreleri üzerine antitümör etkisini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, lentinanın, mitokondri apoptozisi (programlanmış hücre ölümü) ile hem in vitro hem de in vivo olarak meme kanseri hücreleri üzerinde sinerjistik, doğrudan antikanser etki uygulayan otofajiyi (vücudun zarar görmüş hücrelerin yerine sağlıklı ve yeni hücreler oluşturarak gerçekleşen bir temizleme işlemi) indükleyebildiği ortaya konmuştur.

Lentinan oldukça iyi bir seviyede biyoyoumluluğa ve antitümör aktiviteye sahiptir. Fakat damar yolu veya oral uygulanmasının ardından yapılan gözlemlerde biyoyararlanımının düşük olduğu ortaya çıkmıştır. Fiziksel yöntemlerle biyoyoumlu sünger benzeri lentinan-kitosan kompoziti oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalarda biyoyoumlu süngerin, uzun süreli lokal tutulması ve ameliyat sonrasında meme kanseri nüksünü inhibe ettiği gözlemlenmiştir [31].

Karaciğer kanseri, geç teşhis edilebilen ve kemo-direnç etkisi nedeniyle tedavi süreci zor olan ayrıca en yaygın tümörlerden biridir. Kemoterapide kanser hastalığını tedavi etmek amacıyla kullanılan bir ilaç olan sisplatinin ve lentinanın tedavi sürecinde hücre öldürme yeteneğini arttırdığı önceki çalışmalarda raporlanmıştır. Wang vd. [32],

yaptıkları çalışmada, lentinanın ve sisplatinin tedavide birlikte kullanımının mitokondriyal depolarizasyona neden olduğu ortaya konmuştur. Fakat bu durum, sisplatin ile lentinan kombine tedavisinin karaciğer tümör hücrelerini öldürmek amacıyla farklı bir sinyal gönderdiği ortaya konmuştur. Tedavi sürecinde sisplatin dozu azaltılıp, lentinan uygulaması artırıldığında kemo-direnç etkisinin azalabileceği ileri sürülmüştür.

Lentinanın tümör hücreleri üzerinde apoptoz (programlanmış hücre ölümü) fonksiyonu daha önceki yayınlarda ortaya konmuştur. Wang vd. [33], tarafından yapılan çalışmada lentinanın, karaciğerdeki tümör hücrelerinde immünojenik ölüm düzenleme mekanizmasının ve immünojenik ölümle ilgili protein ekspresyonunun (bir genin zamanı geldiğinde içeriğindeki bilginin protein sentezinde kullanılması) etkisi incelenmiştir. Sonuçlar uygulanan lentinan konsantrasyonuna bağlı olsa da 24 saat sonunda yapılan incelemede apoptoz oranının önemli ölçüde artış gösterdiği raporlanmıştır. Sonuç olarak, lentinanın karaciğer tümör hücrelerinde immünojenik ölüm sürecini indüklediği ortaya konmuştur.

Kemoterapi kanser tedavisi ile lentinan kombinasyonu, cerrahi müdahale edilemeyen veya tekrarlayan ilerlemiş mide kanseri hastaları için yeni bir potansiyel tedavi olabilir. [22]. Bir çalışmada, lentinan ve kemoterapi ilacı olan paklitakselin kombinasyonunun anti-kanser etkileri araştırılmıştır ve tek başına paklitaksel tedavisi ile karşılaştırılmıştır. Lentinanın, tümör hücre proliferasyonuna (hücrelerin bölünerek çoğalması) karşı inhibe edici etkisi olduğu belirtilmiştir. Kombinasyon halindeki tedavide, kaspaz-3 (apoptozda rol oynayan kaspaz proteini) aktivasyonunu indükleyerek hücre apoptoz oranını arttırdığı görülmüştür [34].

Kemoterapi tedavisi, mesane kanseri üzerine sınırlı anti-tümör etki sağlamaktadır. Lentinanın insan mesane kanseri üzerine etkisi incelenirken tedavi sürecinde lentinanın hücre içi reaktif oksijen (ROS) yoluyla apoptozu tetikleyebileceği bulunmuştur [35]. Sun vd. [28], yaptıkları çalışmada, kemoterapötik bir ilaç olan gemsitabin ve lentinanı kombine ederek mesane kanseri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Tümör hücre hattının proliferasyonu ve apoptozisi üzerindeki terapötik etkiyi belirlemek amaçlanmıştır. Çalışmada, tek başına gemsitabin tedavisi ile karşılaştırılma yapılmıştır. Lentinan ve gemsitabin konsantrasyonları arttırıldığında tümör hücrelerinin profilerasyonu azaldığı görülmüştür. Tek başına gemsitabin tedavisi ile karşılaştırıldığında lentinan ve gemsitabin kombinasyonu ile yapılan tedavi apoptozu önemli ölçüde indüklemeye yeteneğine sahiptir.

### 6.3 Bağımsızlık sistemi güçlendirici

Lentinan, hücre bölünmesini ve gelişimini kontrol eden mekanizmayı ve doğrudan anti-tümör aktiviteyi içermektedir. Ek olarak, taşıyıcı tümörlere karşı bağımsızlığın artırılması bakımından lentinan etkili olmaktadır. Bu etkilerin hepsi bağımsızlık sisteminin güçlendirilmesi ile ilişkilidir. T hücreleri lenfositlerin bir türüdür. Bu hücreler, enfekte olan hücreyi tespit ederek yok etmekle görevlidir. Biyolojik aktiviteler için T hücre bileşeni gereklidir.

Lentinan, T hücrelerini uyaran bir immüno-güçlendiricidir [36]. Ayrıca, hücre metabolizmasını düzenleyebildiği ortaya konmuştur [37]. Kanser tedavisinde insan vücudunda olumsuz etkiler (yorgunluk, iştahsızlık, bulantı vb.) meydana gelebilmektedir. Piotrowski vd. [38], tarafından yapılan çalışmada, kanser hastalarına lentinan uygulaması yapılmıştır. Kanser tedavisinin olası gözlemlenebilecek etkilerinin, lentinan uygulamasının bağımsızlık sistemini desteklemesi sebebiyle azalttığı görülmüştür. Lentinanın immün aktivitesinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada, makrofajların fagositik kapasitesini önemli ölçüde uyarabildiği raporlanmıştır [39].

### 6.4 Diğer sağlık etkileri

D<sub>2</sub> vitaminin (Ergokalsiferol) eksikliği, insanlarda raşitizm veya osteoporozu neden olmaktadır. Lentinan, D vitamini kaynağı olarak önerilmiştir. Ayrıca yüksek miktarda kalsiyum içeriğine sahiptir [40]. Shiitake mantarının D vitamini ve kalsiyum içeriği, meşe ağaçlarında, ultraviyole ışık (UV) altında yetiştirilmesi ile artış göstermiştir [41]. Lee vd. [41], yaptıkları çalışmada, lentinanın diyetle kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, kemik histolojisi, aktif kalsiyum taşıma genlerinin ekspresyonu ve serum kalsiyum seviyeleri değerlendirilmiştir. Sonuçlarda ise, D<sub>2</sub> vitamini, kemik üzerine doğrudan etki ederek böbrekte kalsiyum emici genlerin ekspresyonunu indüklediği ortaya konmuştur. Böylece, lentinanın, osteoporoz ve benzeri semptomlar üzerine faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

Lentinanın bir diğer faydası ise, kolesterol düşürücü etkisinin olmasıdır. Çalışmalarda, diyetle %2-5'lik lentinan kullanımının serum toplam kolesterol konsantrasyonunu düşürdüğü ortaya konmuştur [42]. Lentinan içeriğindeki beta-glukan yapısı ile kandaki kolesterol içeriğini azaltmaktadır [43]. Ayrıca vücut ağırlığını da azaltmaya yardımcı olmaktadır [44]. Lipit profili üzerine etkisi birçok çalışmada gözlemlenmemiştir. Fakat bu konuda hala araştırmalar devam etmektedir [42].

Lentinan, antimikrobiyal ve immünomodülatör etkileri de dahil olmak üzere birçok farmakolojik aktivitelere sahip bir polisakarittir [46]. Hearst vd. [45], gerçekleştirdiği çalışmada, lentinanın antimikrobiyal aktivitesi incelenmiştir. Mikrobiyal inhibisyonun gözlemlenmesi amacıyla 29 bakteri ve 10 mantar patojenden oluşan bir gruba karşı lentinan özütü uygulanmıştır. Lentinan özütü, bu mikroorganizmaların %84.6'sına karşı antimikrobiyal aktivite göstermiştir. Çalışmada dikkat çeken bir diğer konu ise, *Staphylococcus aureus*'a karşı inhibe edici etki göstermiş olmasıdır. Ayrıca lentinanın, çeşitli mantar türlerinde (*Physalospora piricola*, *Botrytis cinerea* ve *Mycosphaerella arachidicola*) misel büyümesini engellediği bildirilmiştir [47].

## 7 Sonuç

Basidiomycetes sınıfında olan shiitake mantarı (*L. edodes*), şapkalı ve yenilebilir bir mantar türüdür. Lentinan, yenilebilir Japon shiitake mantarının vejetatif kısımlarından türetilmiş bir polisakarittir. *L. edodes*'un meyve veren kısımlarından veya miselyumundan ekstrakte edilen hücre duvarı bileşenidir. Modern tıp ve gıda bilimlerine göre

lentinan, antioksidan aktivite, antikanser, antitümör, antibakteriyel, antiviral, etkilere sahiptir. Lentinan, vitaminler ve mineraller açısından da oldukça zengin olduğundan, kolesterol düşürülmesinde ve bağışıklık hücrelerinin güçlendirilmesinde de etkili bir rol oynamaktadır. Hayvan ve laboratuvar ortamı çalışmalarda, lentinan kemoterapötik tedavi sürecinde sinerjik bir etki göstermiştir. Lentinandan elde edilen  $\beta$ -(1,3)-glukan, immün sistemi uyardığından, yaygın olarak Çin ve Japonya'da üretilen ilaçların formülasyonlarına dahil edilmektedir. Lentinan sağlığa faydaları açısından oldukça önem taşımaktadır.

#### **Çıkar çatışması**

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### **Benzerlik oranı (iThenticate): %9**

#### **Kaynaklar**

- [1] S. A. Heleno, L. Barros, M. J. Sousa, A. Martins. And ICFR. Ferreira, Tocopherols composition of Portuguese wild mushrooms with antioxidant capacity. *Food Chem*, 119, 1443–1450, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.025>
- [2] F. S. Reis, L. Barros, A. Martins, and ICFR. Ferreira, Chemical composition and nutritional value of the most widely appreciated cultivated mushrooms: An interspecies comparative study. *Food Chem Toxicol*, 50, 191–197, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.10.056>
- [3] I. Palacios, M. Lozano, C. Moro, M. D'Arrigo, M. A. Rostagno, J. A. Martinez, Antioxidant properties of phenolic compounds occurring in edible mushrooms. *Food Chem*, 128, 674–678, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.085>
- [4] J. J. Zhang, Y. Li, T. Zhou, D. P. Xu, P. Zhang, and S. Li, Bioactivities and health benefits of mushrooms mainly from China. *Molecules*, 21, 1–16, 2016. <https://doi.org/10.3390/molecules21070938>
- [5] P.G. Miles, S.T. Chang, Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect and Environmental Impact. s. 241, 2014. <https://doi.org/10.1201/9780203492086>
- [6] P.S. Bisen, R. K. Baghel, B. S. Sanodiya, G. S. Thakur, and G. B. K. S. Prasad, Lentinus edodes: a macrofungus with pharmacological activities. *Current medicinal chemistry*, 17(22), 2419-2430, 2010. <https://doi.org/10.2174/092986710791698495>
- [7] S. Wasser, P. M. Coates, M. Blackman, M., and G. M. Cragg, Shiitake (*Lentinula edodes*). *Encyclopedia of dietary supplements*, 653-664, 2014.
- [8] Y. Zhang, S. Li, X. Wang, L. Zhang, and P. C. Cheung, Advances in lentinan: isolation, structure, chain conformation and bioactivities. *Food hydrocolloids*, 25(2), 196-206, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.02.001>
- [9] C. Liu, S. Bao, and D. Pei, The Xianggu Mushroom Industry in Xixia County, Henan: A Case Study(西峡香菇产业的个案研究). *Rural China*, 14(2), 375-404, 2017. <https://doi.org/10.1163/22136746-01402005>
- [10] G. F. Leatham, Cultivation of shiitake, the Japanese forest mushroom, on logs: a potential industry for the United States. Forest Products Laboratory, 1981.
- [11] C. H. Vane, Monitoring decay of black gum wood (*Nyssa sylvatica*) during growth of the shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using diffuse reflectance infrared spectroscopy. *Applied spectroscopy*, 57(5), 514-517, 2003. <https://doi.org/10.1021/jf073398s>
- [12] C. L. Dikeman, L. L. Bauer, E. A. Flickinger, and G. C. Fahey, Effects of stage of maturity and cooking on the chemical composition of select mushroom varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(4), 1130-1138, 2005. <https://doi.org/10.1021/jf0485411>
- [13] I. Roncero-Ramos, M. Mendiola-Lanao, M. Pérez-Clavijo, and C. Delgado-Andrade, Effect of different cooking methods on nutritional value and antioxidant activity of cultivated mushrooms. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 68(3), 287-297, 2017. <https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1244662>
- [14] K. Lee, H. Lee, Y. Choi, Y. Kim, H. S. Jeong, and J. Lee, Effect of different cooking methods on the true retention of vitamins, minerals, and bioactive compounds in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*). *Food Science and Technology Research*, 25(1), 115-122, 2019. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2021.50.8.799>
- [15] J. Vetter, Biological values of cultivated mushrooms—A review. *Acta Alimentaria*, 48(2), 229-240, 2019. <https://doi.org/10.1556/066.2019.48.2.11>
- [16] Z. Rao, Y. Dong, X. Zheng, K. Tang, and J. Liu, Extraction, purification, bioactivities and prospect of lentinan: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 37, 102163, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102163>
- [17] T. Xu, R. B. Beelman, and J. D Lambert, The cancer preventive effects of edible mushrooms. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 12(10), 1255-1263, 2012. <https://doi.org/10.2174/187152012803833017>
- [18] R. Zheng, S. Jie, D. Hanchuan, and W. Moucheng, Characterization and immunomodulating activities of polysaccharide from *Lentinus edodes*. *International Immunopharmacology*, 5(5), 811-820, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2004.11.011>
- [19] Y. Zhang, X. Xu, and L. Zhang, Gel formation and low-temperature intramolecular conformation transition of a triple-helical polysaccharide lentinan in water. *Biopolymers: Original Research on Biomolecules*, 89(10), 852-861, 2008. <https://doi.org/10.1002/bip.21025>
- [20] S. Garg, and S.E. Cockayne, Shiitake dermatitis diagnosed after 16 years!. *Archives of dermatology*, 144(9), 1241-1242, 2008. DOI: [10.1001/archderm.144.9.1241](https://doi.org/10.1001/archderm.144.9.1241)
- [21] G. Chihara, J. Hamuro, Y. Y. Maeda, Y. Arai, and F. Fukuoka, Fractionation and purification of the polysaccharides with marked antitumor activity,



- especially lentinan, from *Lentinus edodes* (Berk.) Sing.(an edible mushroom). *Cancer research*, 30(11), 2776-2781, 1970.
- [22] K. Ina, T. Kataoka, and Ando, The use of lentinan for treating gastric cancer. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 13(5), 681-688, 2013. DOI: [10.2174/1871520611313050002](https://doi.org/10.2174/1871520611313050002)
- [23] M. Zhang, Y. Zhang, L. Zhang, and Q. Tian, Mushroom polysaccharide lentinan for treating different types of cancers: A review of 12 years clinical studies in China. *Progress in molecular biology and translational science*, 163, 297-328, 2019. <https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2019.02.013>
- [24] N. Markova, L. Michailova, V. Kussovski, M. Jourdanova, and T. Radoucheva, Intranasal application of lentinan enhances bactericidal activity of rat alveolar macrophages against *Mycobacterium tuberculosis*. *Die Pharmazie-An International Journal of Pharmaceutical Sciences*, 60(1), 42-48, 2005.
- [25] N. Markova, V. Kussovski, I. Drandarska, S. Nikolaeva, N. Georgieva, and T. Radoucheva, Protective activity of Lentinan in experimental tuberculosis. *International immunopharmacology*, 3(10-11), 1557-1562, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1567-5769\(03\)00178-4](https://doi.org/10.1016/S1567-5769(03)00178-4)
- [26] I. Drandarska, V. Kussovski, S. Nikolaeva, and N. Markova, Combined immunomodulating effects of BCG and Lentinan after intranasal application in guinea pigs. *International immunopharmacology*, 5(4), 795-803, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2004.12.008>
- [27] Z. Suo, Q. Sun, X. Peng, S. Zhang, N. Gan, L. Zhao, and H. Li, Lentinan as a natural stabilizer with bioactivities for preparation of drug-drug nanosuspensions. *International journal of biological macromolecules*, 184, 101-108, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.056>
- [28] M. Sun, W. Zhao, Q. Xie, Y. Zhan, and B. Wu, Lentinan reduces tumor progression by enhancing gemcitabine chemotherapy in urothelial bladder cancer. *Surgical oncology*, 24(1), 28-34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.suronc.2014.11.002>
- [29] Y. Wang, J. Chen, Q. Han, Q. Luo, H. Zhang, and Y. Wang, Construction of doxorubicin-conjugated lentinan nanoparticles for enhancing the cytotoxicity effects against breast cancer cells. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 579, 123657, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123657>
- [30] Y. R. Liu, B. Sun, G. H. Zhu, W. W. Li, Y. X. Tian, L. M. Wang, and C. Yang, Selenium-lentinan inhibits tumor progression by regulating epithelial-mesenchymal transition. *Toxicology and applied pharmacology*, 360, 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.09.019>
- [31] S. Gu, J. Xu, W. Teng, X. Huang, H. Mei, X. Chen, and K. Wang, Local delivery of biocompatible lentinan/chitosan composite for prolonged inhibition of postoperative breast cancer recurrence. *International Journal of Biological Macromolecules*, 194, 233-245, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.186>
- [32] Z. Wang, K. Qu, L. Zhou, L. Ren, B. Ren, F. Meng, and H. Fan, Apaf1 nanoLuc biosensors identified lentinan as a potent synergizer of cisplatin in targeting hepatocellular carcinoma cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 577, 45-51, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2021.08.030>
- [33] W. Wang, X. Yang, C. Li, Y. Li, H. Wang, and X. Han, Immunogenic Cell Death (ICD) of Murine H22 Cells Induced by Lentinan. *Nutrition and Cancer*, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1080/01635581.021.1897632>
- [34] W. Liu, J. Gu, J. Qi, X. N. Zeng, J. Ji, Z. Z. Chen, and X. L. Sun, Lentinan exerts synergistic apoptotic effects with paclitaxel in A549 cells via activating ROS-TXNIP-NLRP3 inflammasome. *Journal of cellular and molecular medicine*, 19(8), 1949-1955, 2015. DOI: [10.1111/jcmm.12570](https://doi.org/10.1111/jcmm.12570)
- [35] Y. Zhang, M. Zhang, Y. Jiang, X. Li, Y. He, P. Zeng, and L. Zhang, Lentinan as an immunotherapeutic for treating lung cancer: a review of 12 years clinical studies in China. *Journal of cancer research and clinical oncology*, 144(11), 2177-2186, 2018. DOI: [10.1007/s00432-018-2718-1](https://doi.org/10.1007/s00432-018-2718-1)
- [36] X. Xu, H. Yan, J. Tang, J. Chen, and X. Zhang, Polysaccharides in *Lentinus edodes*: isolation, structure, immunomodulating activity and future prospective. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(4), 474-487, 2014. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.587616>
- [37] X. E. Wang, Y. H. Wang, Q. Zhou, M. Peng, J. Zhang, M. Chen, and G. M. Xie, Immunomodulatory effect of lentinan on aberrant T subsets and cytokines profile in non-small cell lung cancer patients. *Pathology & Oncology Research*, 26(1), 499-505, 2020. DOI: [10.1007/s12253-018-0545-y](https://doi.org/10.1007/s12253-018-0545-y)
- [38] J. Piotrowski, T. Jędrzejewski, and W. Kozak, Immunomodulatory and antitumor properties of polysaccharide peptide (PSP). *Postępy higieny i medycyny doświadczalnej (Online)*, 69, 91-97, 2015. DOI: [10.5604/17322693.1137086](https://doi.org/10.5604/17322693.1137086)
- [39] Y. Wang, H. Jin, J. Yu, C. Qu, Q. Wang, S. Yang, and J. Ni, Quality control and immunological activity of lentinan samples produced in China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 129-136, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.050>
- [40] V. J. Jasinghe, C. O. Perera, and P. J. Barlow, Bioavailability of vitamin D2 from irradiated mushrooms: an in vivo study. *British Journal of Nutrition*, 93(6), 951-955, 2005. DOI: [10.1079/bjn20051416](https://doi.org/10.1079/bjn20051416)
- [41] G. S. Lee, H. S. Byun, K. H. Yoon, J. S. Lee, K. C. Choi, and E. B. Jeung, Dietary calcium and vitamin D2 supplementation with enhanced *Lentinula edodes* improves osteoporosis-like symptoms and induces duodenal and renal active calcium transport gene expression in mice. *European journal of nutrition*,

- 48(2), 75-83, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00394-008-0763-2>
- [42] P. Nieminen, V. Kärjä, and A. M. Mustonen, Myo-and hepatotoxic effects of cultivated mushrooms in mice. *Food and Chemical Toxicology*, 47(1), 70-74, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.10.009>
- [43] A. Rivera, O. L. Benavides, and J. Rios-Motta, (22 E)-Ergosta-6, 22-diene-3 $\beta$ , 5 $\alpha$ , 8 $\alpha$ -triol: A new polyhydroxysterol isolated from *Lentinus edodes* (Shiitake). *Natural Product Research*, 23(3), 293-300, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786410802038671>
- [44] O. Rop, J. Mlcek, and T. Jurikova, Beta-glucans in higher fungi and their health effects. *Nutrition reviews*, 67(11), 624-631, 2009. DOI: [10.1111/j.1753-4887.2009.00230.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2009.00230.x)
- [45] R. Hearst, D. Nelson, G. McCollum, B. C. Millar, Y. Maeda, C. E. Goldsmith, ... and J. E. Moore, An examination of antibacterial and antifungal properties of constituents of Shiitake (*Lentinula edodes*) and Oyster (*Pleurotus ostreatus*) mushrooms. *Complementary therapies in clinical practice*, 15(1), 5-7, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ctcp.2008.10.002>
- [46] H. Yin, G. Xue, A. Dai, and H. Wu, Protective Effects of Lentinan Against Lipopolysaccharide-Induced Mastitis in Mice. *Frontiers in pharmacology*, 2559, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.755768>
- [47] P. H. Ngai, and T. B. Ng, Lentin, a novel and potent antifungal protein from shitake mushroom with inhibitory effects on activity of human immunodeficiency virus-1 reverse transcriptase and proliferation of leukemia cells. *Life Sciences*, 73(26), 3363-3374, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2003.06.023>





## Examination of rehydration ratio, color properties and drying kinetics of microwave dried garlic (*Allium sativum* L.)

### Mikrodalga'da kurutulan sarımsağın (*Allium sativum* L.) rehidrasyon oranı, renk değerleri ve kurutma kinetiğinin incelenmesi

Fatma Coşkun Topuz<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Hakkâri Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, 30000, Hakkâri Türkiye

#### Abstract

In this study, color values and rehydration ratios of dried garlic slices at four different microwave power (300W, 450W, 600W, and 700W) were determined. Thin-layer drying models were used for drying kinetics. It was determined that L\* and b\* values were lower and a\* values were higher in microwave-dried garlic compared to fresh garlic slices. It was observed that the C\* (Chroma) and h (hue angle) values of garlic decreased as the microwave power increased compared to fresh garlic. It was determined that the rehydration ratio decreased significantly with increasing microwave power. Therefore, the highest rehydration ratio was detected in the garlic samples applied at 300W. Moisture ratio (MR) versus time calculated as a result of microwave drying was compared with 5 (Lewis, Page, Henderson, and Pabis, Midilli et al. and Logarithmic) drying models in the literature. R<sup>2</sup> (coefficient of expression),  $\chi^2$  (chi-square), and RMSE (root mean square error) were calculated by SPSS and nonlinear regression analysis of dried garlic samples. It was determined that the highest R<sup>2</sup> (0.994-0.998), the lowest RMSE (0.016-0.022) and  $\chi^2$  (0.00033-0.00064) values belonged to the Lewis model.

**Keywords:** Drying, Garlic, Microwave, Modelling, Nonlinear analyses

#### 1 Introduction

Garlic plant has some using areas like spice or flavoring agent for food products. Garlic spice is known as the earliest food-flavoring vegetable, and this vegetable has been used in folk medicine for human diseases, and its medicinal benefits such as antioxidants and antimicrobial have lately been demonstrated by scientific studies [1, 2]. Fresh garlic is prone to germination and rot during storage, resulting in limited shelf life and significant economic losses for vendors. So, fresh garlic is mostly dried to remove 90% moisture to increase shelf life, create new products, and decrease transportation and storage costs. In addition, garlic powder, one of the most popular commercial garlic products, is obtained by drying and grinding garlic slices, and the demand for garlic powder is increasing day by day. Today,

#### Öz

Bu araştırmada, dört farklı mikrodalga gücünde (300W, 450W, 600W ve 700W) kurutulan sarımsak dilimlerinin renk değerleri ve rehidrasyon oranları tespit edilmiştir. Kurutma kinetiği için ince tabak kurutma modelleri kullanılmıştır. Taze sarımsak dilimlerine göre mikrodalgada kurutulan sarımsakların L\* ve b\* değerlerinin daha düşük, a\* değerlerinin ise daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Taze sarımsağa göre, mikrodalga gücü arttıkça sarımsakların C\* (kroma) ve h (hue açısı) değerlerinin düştüğü görülmüştür. Artan mikrodalga gücü ile rehidrasyon oranının belirgin bir şekilde azaldığı saptanmıştır. Bu nedenle, en yüksek rehidrasyon oranı 300W uygulanan sarımsak örneklerinde tespit edilmiştir. Yapılan mikrodalga kurutma sonucunda hesaplanan zamana karşı nem oranı (MR) verileri literatürde bulunan 5 (Lewis, Page, Henderson ve Pabis, Midilli ve ark. ve Logarithmic) kurutma modeli ile karşılaştırılmıştır. Kuru sarımsak örneklerinin SPSS ve nonlinear regresyon analizleri ile R<sup>2</sup> (belirtme katsayısı),  $\chi^2$  (ki kare) ve RMSE (hataların karelerinin karekök ortalamaları) hesaplanmıştır. En yüksek R<sup>2</sup> (0.994-0.998), en düşük RMSE (0.016-0.022) ve  $\chi^2$  (0.00033-0.00064) değerlerinin Lewis modeline ait olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kurutma, Sarımsak, Mikrodalga, Modelleme, Nonlinear analiz

garlic drying methods are divided into two, non-thermal and thermal drying methods. One of the best non-thermal drying methods is vacuum freeze-drying. For thermal drying systems, hot air, infrared, microwave, spray drying, belt dryers, etc. techniques are used. Compared to other thermal methods, the hot air drying technique is mostly used in industrial production. [3, 4]. Also, it can be said that the usage of microwave drying technology in the food industry has increased in the last two decades.

The microwave was first used in the communication field. Owing to the increased studies and with the development of microwave technology, the microwave has been mostly used in different industries like medicine, the food industry and wood industry, etc. [5]. Microwave drying with volumetric heating is a successful method for drying fresh foodstuffs. [6, 7]. The biggest reasons for this can be

\* Corresponding author, e-mail: fatmacoskun\_21@hotmail.com (F. C. Topuz)

Geliş / Received: 23.03.2022 Kabul / Accepted: 10.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1091829

shown as the microwave technique's shorter, faster drying, and improved quality, resulting in products with the high nutritional and sensorial quality compared to other traditional thermal drying techniques [8]. While drying, the microwave provides a heat flow in the same direction as the moisture flow, increases the drying speed, and decreases the processing time with high energy yield and less structural diversity.

This research focused on the changes in color and rehydration ability of garlic slices during drying and the determination of suitable thin-layer drying models for garlic samples. In addition, it can be said that garlic, which is used as a strong aroma and antimicrobial additive in the food industry, can be produced in a simple way at home. Unlike other garlic drying studies, it was aimed to obtain garlic slices that could be easily applied in daily recipes.

## 2 Materials and methods

### 2.1 Materials

Fresh garlics were purchased from a greengrocer in Kahramanmaraş region. The garlics have been preserved in the refrigerator at 4 °C until drying trials were conducted. Garlic samples were sliced 3 mm thick with a knife for drying in the microwave oven.

### 2.2 Drying process

At the end of the preliminary trials, it was decided to dry the sliced garlic at 300W, 450W, 600W, and 700W microwave powers. There have been encountered longer drying times at microwave power below 300 W and burning problems at levels above 700 W. To preserve the physical state of the samples, drying was done at the specified microwave powers. After 3-5 grams of samples were taken at certain minutes, while drying process was continued. The duration of the garlic samples was given in Table 1. Thus, weight loss during drying was detected. The final drying times of garlic slices at 300W, 450W, 600W, and 700W microwave powers were recorded as 30, 25, 20, and 15 minutes, respectively.

**Table 1.** Sampling times for different microwave powers from garlic slices

Sample name	Sample time (min)
300W	10., 15., 20. and 30.
450W	10., 15., 20. and 25.
600W	5., 10., 15., and 20.
700W	4., 8., 12. and 15.

### 2.3 Mathematical modelling

The experimental data obtained from the drying of garlic slices were fitted with 5 different drying models (Table 2) usually used for the modelling of drying curves. The moisture ratio (MR) of the samples was calculated according to Equation (1):

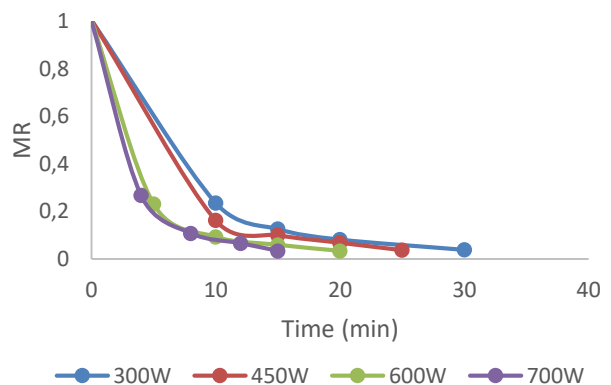
$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

$M_t$ ,  $M_0$ , and  $M_e$  are moisture content at any time while the drying process, initial moisture content, and equilibrium moisture content (kg water/kg d.m.), respectively, and lastly "t" is drying time (min). The numerical values of  $M_e$  are relatively small compared to  $M_t$  or  $M_0$ , hereby the  $M_e$  is equal to zero is insignificant [14]. Moisture ratios of samples are given in Fig 1.

**Table 2.** Thin-layer drying models used in microwave drying process

Model	Model's name	Reference
$MR = \exp(-kt)$	Lewis	[9]
$MR = \exp(-ktn)$	Page	[10]
$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis	[11]
$MR = a \exp(-ktn) + bt$	Midilli et al.	[12]
$MR = a \exp(-kt) + c$	Logarithmic	[13]

MR: moisture ratio, k, t, n, a, b, c, l, o: represent constants and coefficients.



**Fig 1.** MR (kg water/kg d.m.) of garlic slices at 300W, 450W, 600 W, and 700W (Moisture ratio vs. drying time).

### 2.4 Rehydration ratio (RR)

Rehydration experiments were made according to the method described by Kırmızııkaya and Çınar [15] with some modifications. 2 grams of dried garlic slices were immersed in 50 mL distilled water. After immersion, the dried garlic pieces were weighed. At the end of 10., 20., 30., 60. and 1440. minutes at room temperature, they were filtered and their weights were recorded. The rehydration ratio was calculated according to Equation (2) below:

Rehydration Ratio = (Rehydrated sample weight) / (Dried sample weight)

### 2.5 Color measurements

$L^*$  (brightness, darkness),  $a^*$  (redness, greenness),  $b^*$  (yellowness, blueness),  $C^*$  (chroma),  $h$  (hue angle), and  $\Delta E$  values of the samples were measured and recorded with the Minolta CR 400 (Tokyo, Japan).

### 2.6 Statistical evaluation

All experimental values were expressed as mean ± SD. In this study, a 3x2 factorial trial design was used. Analysis of the data was carried out using ANOVA (SPSS 20 program, IBM, USA). Differences between means were tested using Duncan's multiple range tests at p<0.05. Results of R<sup>2</sup> were determined using SPSS 20.0 program. RMSE and  $\chi^2$  values of models have been calculated with the following equations Equation (3) and Equation (4).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp} - MR_{pre})^2}{N-z} \quad (3)$$

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

MR<sub>exp</sub> and MR<sub>pre</sub> are experimental and predicted moisture rates, respectively, N is the number of observations, and z is the number of constants. The lower the values of the  $\chi^2$  and RMSE indicate the high compatibility of the model [14].

### 3 Results and discussion

Drying curves of garlic slices at 100 W, 200W, and 300W were given in Fig 1. The moisture value of fresh garlic was found to be 63.05%. The moisture content reduced rapidly at the beginning and then decreased slowly with an increase in drying time. In the last stage of drying, the change in the moisture content was insignificant, and the drying process was terminated when the moisture content fell below 6% (w.b). The time needed to reach under moisture content of 6% (w.b.) changed from 30 to 15 min, when the microwave power was increased from 300 to 700 W. The final drying time of samples was also reduced with the increase of microwave power, as expected.

L\*, a\*, b\*, C\*, h, and  $\Delta E$  results of fresh and dried garlic slices were given in Table 3. L\*, b\*, C\*, and h values of dried garlic were lower and a\* value was higher than fresh garlic.

**Table 3.** Color measurements of fresh and dried garlic slices

Sample name	Drying time (min)	L*	a*	b*	C*	h	$\Delta E$
Fresh garlic	-	81.03±2.43	-1.79±0.29	26.84±0.94	26.98±0.26	92.98±0.68	-
300W	10.	76.34±3.45 <sup>dA</sup>	-0.70±0.11 <sup>aA</sup>	25.52±0.80 <sup>bA</sup>	25.70±0.37 <sup>bB</sup>	85.59±1.29 <sup>cA</sup>	4.99±0.61 <sup>aA</sup>
	15.	71.80±2.43 <sup>cA</sup>	2.05±0.59 <sup>bA</sup>	23.72±3.51 <sup>abA</sup>	23.19±1.43 <sup>bB</sup>	81.04±1.31 <sup>bA</sup>	10.47±1.89 <sup>bA</sup>
	20.	64.70±1.87 <sup>bA</sup>	5.04±0.94 <sup>cA</sup>	22.63±2.92 <sup>bA</sup>	22.32±0.43 <sup>bA</sup>	77.65±2.67 <sup>bA</sup>	18.19±2.07 <sup>cA</sup>
	30.	56.89±2.79 <sup>aA</sup>	5.67±0.31 <sup>cA</sup>	19.90±1.02 <sup>aA</sup>	17.87±3.22 <sup>aA</sup>	73.55±0.17 <sup>aA</sup>	26.20±4.02 <sup>dA</sup>
450W	10.	74.95±4.21 <sup>cA</sup>	0.78±0.15 <sup>aA</sup>	23.74±2.49 <sup>bA</sup>	23.18±3.63 <sup>bB</sup>	86.89±4.46 <sup>bA</sup>	7.29±0.78 <sup>aA</sup>
	15.	69.21±5.51 <sup>bcA</sup>	3.89±0.86 <sup>aA</sup>	21.43±2.99 <sup>bA</sup>	22.90±1.32 <sup>bB</sup>	78.86±2.94 <sup>aA</sup>	14.19±2.11 <sup>bA</sup>
	20.	62.81±3.91 <sup>abA</sup>	5.84±0.68 <sup>aA</sup>	21.13±2.96 <sup>abA</sup>	19.81±1.54 <sup>abA</sup>	76.09±2.13 <sup>aA</sup>	20.56±3.87 <sup>cA</sup>
	25.	53.32±1.57 <sup>aA</sup>	5.86±0.59 <sup>aA</sup>	19.40±2.10 <sup>aA</sup>	18.20±2.60 <sup>aA</sup>	71.63±0.74 <sup>aA</sup>	29.69±4.75 <sup>dA</sup>
600W	5.	74.44±1.49 <sup>bA</sup>	1.58±0.12 <sup>aA</sup>	23.37±3.97 <sup>bA</sup>	24.04±2.30 <sup>abA</sup>	88.12±2.10 <sup>cA</sup>	8.17±1.24 <sup>aA</sup>
	10.	65.82±4.34 <sup>bA</sup>	3.43±0.12 <sup>aA</sup>	20.69±1.63 <sup>bA</sup>	19.50±1.27 <sup>abA</sup>	76.06±3.54 <sup>bA</sup>	17.22±3.10 <sup>bA</sup>
	15.	57.97±2.73 <sup>aA</sup>	5.51±1.98 <sup>aA</sup>	19.41±2.03 <sup>abA</sup>	17.60±2.69 <sup>aA</sup>	72.15±2.72 <sup>aA</sup>	25.30±3.93 <sup>cA</sup>
	20.	49.16±3.72 <sup>aA</sup>	6.74±1.08 <sup>aA</sup>	17.17±2.15 <sup>aA</sup>	14.32±3.16 <sup>aA</sup>	70.96±3.23 <sup>abA</sup>	34.38±4.44 <sup>dA</sup>
700W	4.	73.82±1.82 <sup>dA</sup>	-0.86±0.20 <sup>aA</sup>	22.89±0.20 <sup>bA</sup>	16.81±1.18 <sup>bB</sup>	89.70±2.15 <sup>cA</sup>	8.27±1.76 <sup>aA</sup>
	8.	66.84±3.23 <sup>cA</sup>	2.50±0.51 <sup>bA</sup>	19.85±4.04 <sup>bA</sup>	15.38±1.67 <sup>cB</sup>	79.21±1.85 <sup>bA</sup>	16.39±3.90 <sup>bA</sup>
	12.	54.17±2.66 <sup>bA</sup>	5.65±1.40 <sup>cA</sup>	17.58±2.60 <sup>bA</sup>	13.97±1.26 <sup>aA</sup>	71.31±4.63 <sup>aA</sup>	29.37±3.23 <sup>cA</sup>
	15.	46.13±2.46 <sup>aA</sup>	8.36±1.05 <sup>abA</sup>	16.56±2.55 <sup>aA</sup>	13.43±0.72 <sup>bA</sup>	68.55±2.73 <sup>aA</sup>	37.77±4.56 <sup>dA</sup>

Lowercase letters indicate the difference in drying times for different microwave powers, and uppercase letters show the difference between microwave powers (p<0.05).

For all microwave powers, it was observed that L\*, b\*, C\*, and h color results decreased while a\* results increased during the drying time. Browned areas were formed on the garlic surface with increasing microwave power. This problem was encountered especially with slices dried with 600W and 700W. While a tolerable level of browning was observed in slices dried with 450W, browning problems were not observed in samples that were applied 300W. As the microwave power increases, the decrease in L\*, b\*, C\*, and h values and the increase in a\* value are thought to be due to enzymatic browning reactions (Maillard reactions). For all microwave powers, the difference between drying times was statistically significant (p<0.05). Among the microwave powers, only the difference in C\* value was found to be statistically significant (p<0.05). For the C\* value, the differences between 300W-450W and between 600W-700W were found to be insignificant (p>0.05). The color change between fresh and dry samples was evaluated based on the  $\Delta E$  value. Significantly, it was determined that the highest color change was at 700W for dry samples and 300W for the lowest. It was thought that the reason why the color change in the products at 700 W was higher than the other microwave levels was the rapid drying at high microwave power. In addition, it was concluded that the color change occurred due to the degradation of pigments with increasing microwave power and enzymatic or non-enzymatic (Maillard) browning reactions. In a study, the color values of pears dried in different dryers were examined. It was stated that the total amount of color change ( $\Delta E$ ) increased with increasing microwave power [16].

According to another study, rosehip was dried in a microwave oven at 5 different levels (100W, 300W, 500W, 700W, and 1000W), and the color values of fresh rosehip and dry samples were compared. It has been stated that the L\*, b\* and C\* values of dried rosehips were lower than that of fresh rosehips [17]. According to another study in which carrot leathers were dried in a microwave oven (90W and 180W), it was noted that after drying, the L\* and b\* values decreased, while the a\* value increased [18].

**Table 4.** Conformance of experimental data for garlic slices with thin layer drying models

Model	Watt (W)	Constant and Coefficients		$\chi^2$	RMSE	R <sup>2</sup>		
Lewis	300	k=0.138		<b>0.00037</b>	<b>0.017</b>	<b>0.998</b>		
	450	k=0.166		<b>0.00033</b>	<b>0.016</b>	<b>0.996</b>		
	600	k=0.273		<b>0.00064</b>	<b>0.022</b>	<b>0.994</b>		
	700	k=0.307		<b>0.00040</b>	<b>0.018</b>	<b>0.994</b>		
Page	300	k=0.389	n=16.642	0.00145	0.038	0.883		
	450	k=0.544	n=12.415	0.00135	0.036	0.937		
	600	k=0.556	n=13.316	0.00113	0.033	0.900		
	700	k=0.512	n=16.580	0.00113	0.033	0.865		
Henderon and Pabis	300	k=1.000	a=0.266	0.00109	0.038	0.998		
	450	k=1.000	a=0.199	0.00101	0.036	0.996		
	600	k=1.000	a=0.247	0.00085	0.033	0.994		
	700	k=1.000	a=0.281	0.00084	0.033	0.994		
Logaritmik	300	k=4.667	a=0.884	c=0.120	0.11665	0.140	0.966	
	450	k=7.517	a=0.915	c=0.091	0.08530	0.111	0.987	
	600	k=15.241	a=0.902	c=0.104	0.10149	0.127	0.965	
	700	k=6.303	a=0.876	c=0.129	0.12997	0.152	0.948	
Midilli	300	k=0.392	a=1.004	b=0.004	n=31.582	0.02011	0.063	0.936
	450	k=4.729	a=1.007	b=0.004	n=10.879	0.01209	0.049	0.968
	600	k=3.818	a=1.006	b=0.005	n=20.810	0.01350	0.051	0.927
	700	k=3.493	a=1.005	b=0.007	n=25.694	0.01785	0.059	0.900

The rehydration ratio of garlic slices dried at different microwave powers was determined. Most of the weight gain (>70%) for all microwave powers occurred in the first 30 minutes. This rapid increase in weight is due to the fact that the final moisture content of the garlic (6%) is very low. It was determined that the rehydration ratio decreased as the applied microwave power increased. After 24 hours, it was observed that the rehydration ratio of dried garlic applied 300W was 15% higher on average than those applied 700W. The reason for this was thought to be that high microwave power disrupts the porous structure of the garlic and reduces its rehydration ability. For the rehydration ratio analysis, the difference between the microwave powers for all the minutes (10th, 20th, 30th, 60th, and 1440th) was found to be statistically significant (p<0.05). Studies with similar results to this study have been available in the literature. According to one of these, the garlic samples were dried in the microwave oven at 100W, 200W, and 300W, and the highest rehydration ratio was found in the samples applied at 100W [19]. Doymaz and Aktaş [20], dried eggplant samples at 40, 50, 60, and 70 °C with a cabinet dryer and stated that the rehydration ratio of eggplants was low at 70 °C.

The coefficients in these models are determined by performing a nonlinear regression analysis. Some statistical parameters need to be calculated to determine the most suitable model. These are the RMSE, R<sup>2</sup>, and  $\chi^2$  values. The estimated standard error (RMSE) shows the deviation between the estimated and experimental data obtained from the model and ( $\chi^2$ ) indicates the degree of goodness of fit. When choosing the most suitable model, it is taken into account that the RMSE and chi-square value are close to 0 and the coefficient of determination is close to 1 [21]. The nonlinear analysis results of some thin layer drying models used for garlic slices dried at different microwave powers were given in Table 4. According to the results of the analysis, it is seen that the highest R<sup>2</sup> values of the garlic samples (closest to 1) were

obtained with the Lewis model and Henderson and Pabis model. The lowest RMSE and  $\chi^2$  (closest to 0) values were calculated in the Lewis model. According to the data obtained, the most suitable drying model for all microwave powers (300W, 450W, 600W, and 700W) applied to the garlic slices was the Lewis model. With the use of Lewis model, the closest results to the experimental data can be obtained. İltter et al [22], made kinetic modeling of garlic samples dried in the microwave at 3 different levels (180W, 360W, and 540W). They stated that the most appropriate model was the Page model.

#### 4 Conclusion

This research has shown that dried garlic slices can be easily produced in home kitchens. It has been demonstrated that garlic powders can be easily produced in this way to add flavor to prepared foods (fries, stews, chips, etc.). It was determined that 700W microwave power caused serious damage to the garlic tissue against the short drying time, thus the rehydration ability of dried garlic was significantly reduced. Compared to other microwave powers, it was determined that the color values, especially L\* and a\* values of the samples applied with 700W adversely affected. Therefore, it was concluded that among the microwave powers used, garlic dried with 300W would be more suitable for foods to be prepared at home. The MR values of the garlic slices were compared with the 5 drying models in the literature, and it was determined that the model most compatible with the experimental data was Lewis.

#### Conflict of interest

The author declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

**Similarity rate (iThenticate):** 17%

## References

- [1] M. Younis, D. Abdelkarim, and A. El-Abdein, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25, 332–338, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>.
- [2] C. Condruso, F. Cinnotta, G. Tripodi, M. Merlino, and A. Verzera, Influence of drying technologies on the aroma of Sicilian red garlic. *LWT - Food Science and Technology*, 104, 180–185, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.026>.
- [3] Y. Feng, C. Zhou, A. Yagoub, Sun, Y. Sun, P. Owusu-Ansah, X. Yu, X. Wang, X. Xu, J. Zhang, and Z. Ren, Improvement of the catalytic infrared drying process and quality characteristics of the dried garlic slices by ultrasound-assisted alcohol pretreatment. *LWT - Food Science and Technology*, 116, 108577, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108577>.
- [4] C. Zhou, Y. Feng, L. Zhang, A. Yagoub, H. Wahia, H. Ma, Y. Sun, and X. Yu, Rehydration characteristics of vacuum freeze- and hot air-dried garlic slices. *LWT - Food Science and Technology*, 143, 111158, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111158>.
- [5] Y. Ling, Q. Li, H. Zheng, M. Omran, L. Gao, K. Li and G. Chen, Drying kinetics and microstructure evolution of nano-zirconia under microwave pretreatment. *Ceramics International*, 47, 22530–22539, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.263>.
- [6] L. Shen, Y. Zhu, C. Liu, L. Wang, H. Liu, M. Kamruzzaman, C. Liu, Y. Zhang and Zheng, X. Zheng, Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying. *Biosystem Engineering*, 195, 64-88, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.002>.
- [7] A. Moreno, A. J. Aguirre, R. H. Maqueda, G. Jimenez, and C.T. Mino, Effect of temperature on the microwave drying process and the viability of amaranth seeds. *Biosystem Engineering*, 215, 49-66, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.019>.
- [8] G. R. Carvalho, R. L. Monteiro, J. B. Laurindo and P. Augusto, Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 73, 102770, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102770>.
- [9] W. K. Lewis, The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432, 1921.
- [10] G. E. Page, Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. MSc Thesis, Purdue University, West Lafayette, 1949.
- [11] S. M. Henderson, and. Pabis, Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174, 1961.
- [12] A. Midilli, H. Küçük, and Z. Yapar, A new model for single-layer drying. *drying technology*, 20, 1503-1513, 2002.
- [13] İ. Doymaz, Drying of eggplant slices in thin layers at different air temperatures. *Journal of Food Process Preservation*, 35, 280-289, 2011. <http://doi:10.1111/j.1745-4549.2009.00454.x>.
- [14] İ. Doymaz, and O. Ismail, Experimental characterization and modelling of drying of pear slices. *Food Science and Biotechnology*, 21(5), 1377–1381, 2012. <https://10.1007/s10068-012-0181-3>.
- [15] E. S. Kırmızıyaka, İ. Çınar, Halojen ısıtıcılı kurutucuda kurutma sıcaklığının beyaz şapkalı mantarının (*agaricus bisporus*) kuruma süresi ve rehidrasyon oranına etkisi. *MANTAR DERGİSİ/The Journal of Fungus*, 172- 179, 2019. <https://10.30708.mantar.639359>.
- [16] G. İzli, Farklı kurutma uygulamalarının armut meyvesinin bazı kalite özellikleri üzerine etkileri. *Türk Tarım-Gıda Bilimi Teknolojisi Dergisi*, 6(4): 479-485, 2018. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i4.479-485.1800>.
- [17] S. Günaydın, Mikrodalga, konvektif ve gölgede kurutma yöntemleri kullanılarak kurutulmuş kuşburnu meyvesinin kurutma kinetiği, renk ve besin elementi içeriği açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [18] A. Özkan-Karabacak, Farklı yöntemlerle kurutulan havuç pestillerinin kurutma karakteristikleri ile bazı kalite parametrelerindeki değişimin modellenmesi ve in vitro biyoyararlıklarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 2021.
- [19] Ç. Hanmammadlı, Mikrodalga yöntemiyle bazı mantar çeşitlerinin kurutulmasında kurutma parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 2020.
- [20] İ. Doymaz, and C. Aktaş, Determination of drying and rehydration characteristics of eggplant slices. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 833-841, 2018. <https://10.17341/gazimmfd.416386>.
- [21] N. Kutlu, A. İşçi., and Ö. Demirkol-Şakıyan, Gıdalarda ince tabaka kurutma modelleri. *GIDA*, 40(1): p. 39-46, 2015. <https://10.15237/gida.GD14031>.
- [22] I. İlter, S. Akyıl, E. Devseren, D. Okut, M. Koç, and F. Kaymak-Ertekin, Microwave and hot air drying of garlic puree: drying kinetics and quality characteristics. *Heat and Mass Transfer*, 54, 2101–2112, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2294-6>.





## Frekans oranı, kanıt ağırlığı ve lojistik regresyon yöntemleri kullanılarak heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması

### Comparison of landslide susceptibility maps using frequency ratio, weight of evidence and logistic regression methods based on GIS

Aslan Cihat Başara<sup>1,\*</sup> , Yasemin Şişman<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği, 55270, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği, 55270, Samsun, Türkiye

#### Öz

Heyelan ülkemizde meydana gelme sayısı bakımından incelendiğinde sıkça karşılaştığımız doğal afetlerden biridir. Çalışmada eğim, bakı, yükseklik, eğrisellik, topoğrafik nemlilik indeksi, bitki indeksi, yıllık toplam yağış, tektonik unsura yakınlık, litoloji ve arazi kullanım durumu parametreleri kullanılmıştır. Parametreler frekans oranı yöntemi, kanıt ağırlığı yöntemi ve lojistik regresyon yöntemi kullanılarak heyelan envanter haritası ile ilişkilendirilmiş ve analiz edilmiştir. Analizler sonucunda heyelan duyarlılık haritaları üretilmiştir. Üretilen haritalar "çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek" olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Analizler sonucunda oluşan modellerin performanslarının değerlendirilmesinde ROC eğrisi ve AUC değerleri kullanılmış, model doğruluklarının değerlendirilmesinde eski heyelan olaylarının risk gruplarıyla uyumu incelenmiştir. Çalışma sonucunda Frekans Oranı Yöntemi %82.9 oranında, Kanıt Ağırlığı Yöntemi %83.5 oranında ve Lojistik Regresyon Yöntemi %77.1 oranında doğruluk göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Heyelan duyarlılık haritası, Frekans oranı yöntemi, Kanıt ağırlığı yöntemi, Lojistik regresyon yöntemi

#### 1 Giriş

Afetler, toplumun bir kısmında ya da bütününde fiziksel hasarlara, ekonomik kayıplara ve sosyal problemlere sebep olan, gündelik yaşamı ve insan etkinliklerini sona erdiren ya da yavaşlatan, etkisi altında kalan toplumun başa çıkamayacağı teknoloji kaynaklı, insan kaynaklı ve doğa kaynaklı olaylardır [1]. Afetler ayrıca etkisini gösterdiği toplumda maddi-manevi zararlara ve günlük hayatın akışında büyük problemlere neden olur [2].

Doğal afetler, insan etkileri dışında gerçekleşen can ve mal kaybına sebebiyet veren tehlikeli ve geneli itibariyle büyük alanlarda etkisini gösteren olaylardır. Ülkemizde doğal afetlerin sebep olduğu hasarlar incelendiğinde, deprem olaylarının ardından en fazla mal kaybına ve can kaybına sebebiyet veren doğal afetin heyelan olduğu görülmektedir [3]. Afetlerden kaynaklanabilecek maddi ve manevi

#### Abstract

When examined in terms of the number of occurrences in our country, one of the natural disasters which we encounter frequently is landslides. slope, aspect, elevation, curvature, topographic wetness index, NDVI, annual total precipitation, proximity to fault lines, lithology and land use status parameters were used in the study. Parameters were correlated and analyzed with the landslide inventory map using the frequency ratio method, the weight of evidence method and the logistic regression method. landslide susceptibility maps were produced as a result of the analysis. The maps produced are divided into 5 classes as "very low, low, medium, high and very high". The ROC curve and AUC values were used to evaluate the performance of the models created as a result of the analysis, the compatibility of the old landslide events with the risk groups was examined in the evaluation of the model accuracy. As a result of the study, accuracy rates of 82.9% for the Frequency Ratio Method, 83.5% for the Weight of Evidence Method and 77.1% for the Logistic Regression Method were obtained.

**Keywords:** Landslide susceptibility map, Frequency ratio method, Weight of evidence method, Logistic regression method

kayıpların önüne geçmek için duyarlılık haritaları çok önemlidir. Heyelan duyarlılık haritaları, gelecekteki heyelanların tahmin edilmesinde ve arazi kullanım planlamasının sağlanmasında büyük önem taşımaktadır [4-5].

Bu çalışmayla arazi kullanımı, bakı, eğim, eğrisellik, tektonik unsura yakınlık, litoloji, bitki indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi, yıllık yağış ve yükseklik parametreleri kullanılarak Frekans Oranı, Kanıt Ağırlığı ve Lojistik Regresyon yöntemleriyle elde edilen heyelan duyarlılık haritalarının CBS tabanlı karşılaştırılması amaçlanmıştır. Heyelan duyarlılık analizi sonucunda üretilen haritaların doğrulukları test edilmiştir. Çalışma sonucunda Frekans Oranı Yöntemi %82.9 oranında, Kanıt Ağırlığı Yöntemi %83.5 oranında ve Lojistik Regresyon Yöntemi %77.1 oranında doğruluk göstermiştir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aslancihatbasara@gmail.com (A. C. Başara)

Geliş / Received: 30.01.2022 Kabul / Accepted: 12.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1065284



## 2 Metot

Heyelan duyarlılık haritaları, teknolojiye ve coğrafi bilgi sistemlerinde meydana gelen gelişmelerle bağlantılı olarak heyelan duyarlılık değerlendirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler, niteliksel ve niceliksel yöntemler olmak üzere iki sınıf altında toplanmaktadır. Niceliksel yöntemler sınıfında yer alan istatistiksel yöntemler çalışmalarda yaygın kullanıma ve yüksek doğruluğa sahiptir [2,5,8,10]. Bu sınıflandırmada kullanılan envantere dayalı yöntemin, oluşturulan haritaları doğrulamada kullanılması ve değerlendirme çalışmalarına girdi oluşturması sebebiyle diğer bütün yöntemler için ilk adım olarak gerekli olduğu söylenebilir [6].

Çalışmadan anlamlı bir sonuç elde edilmesi için yöntem seçimi çok önemlidir. Bu nedenle bölgesel olarak değişim gösterebilen heyelanı etkileyen parametreleri en iyi irdeleyen yöntem belirlenmelidir. Daha önceden yapılmış çalışmalarda kullanılan yöntemlerin doğruluk oranları karşılaştırılmalıdır. Niceliksel yöntemler en çok kullanılan yöntemler arasında yer alır [7]. İstatistiksel analizler, geçmişte meydana gelmiş heyelan özelliklerinin farklı parametreler kullanarak analiz edilmesi ve değerlendirilmesini kapsamaktadır [8]. Konumsal analizlerin yapılabildiği Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS)'nin kullanımının artmasıyla bu yöntemlerin kullanımı da artmıştır [9]. CBS, nesnelere coğrafi verilerinin toplanması, işlenmesi ve analizine imkan sağlar. Konumsal analizler ile verileri coğrafi bilgiye dönüştürmek ve coğrafi verileri görüntülemek, gündelik faaliyetlerin planlanmasına yardımcı olur [10-12].

Niceliksel yöntemlerin içerisinde yer alan istatistiksel yöntemler; iki değişkenli ve çok değişkenli parametre analizi olarak iki grupta toplanmaktadır. Çalışmalar uygulanan yöntem bakımından incelendiğinde; en fazla uygulanan analiz yöntemlerinin Frekans Oranı (FR), Kanıt Ağırlığı (WoE), Lojistik Regresyon (LR), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve Destek Vektör Makinası (SVM) olduğu görülmektedir [13-14]. Bu çalışmada istatistiksel yöntemler arasında dünya genelinde yaygın kullanıma sahip FR, WoE Yöntemi ve LR yöntemleri kullanılmıştır.

### 2.1 Frekans oranı yöntemi (FR)

FR uygulanması ve anlaşılması kolay bir olasılık modeline sahip olması açısından çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. FR yönteminin temeli yoğunluk analizine dayanmakta olup, temel prensibi dikkate alınacak tüm parametrelerin CBS ortamına aktarılıp, heyelan envanter haritası ile ilişkilendirilerek, yoğunluk analizlerinin yapılması esasına dayanmaktadır [15]. FR yöntemi için heyelan duyarlılık analizi Denklem (1) ile hesaplanır.

$$FO = \frac{A1}{A2} \quad (1)$$

Bu eşitliğe göre FO, Frekans Oranı değerine; A1, parametre alt grubundaki heyelanlı alanların toplam heyelanlı alanlara oranına; A2, parametre alt grubundaki alanın toplam alana oranına karşılık gelmektedir.

Yöntem her bir parametre alt grubu için hesaplanan FR değerlerinin normalleştirme ve parametre haritalarına atanmasıyla oluşturulan yeni parametre haritalarının birbirleri ile toplanmasıyla heyelan duyarlılık haritasının oluşturulmasına dayanmaktadır. FR yöntemine göre değerin >1 olması, heyelan oluşumunda daha etkin olduğunu, <1 olması heyelan oluşumunda daha az etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Heyelan duyarlılık indeksi ise Denklem (2) ile hesaplanır.

$$LSI = \Sigma FO \quad (1)$$

Bu eşitliğe göre LSI, Landslide Susceptibility Index (Heyelan Duyarlılık İndeksi); ΣFO, dikkate alınan alandaki her bir parametre sınıfı için hesaplanan FR değerlerinin matematiksel toplamını ifade etmektedir [15].

### 2.2 Kanıt ağırlığı yöntemi (WoE)

Kanıt Ağırlığı (WoE) yöntemi istatistiksel yöntemlerden olup, ilk olarak maden araştırmalarında kullanılmıştır ve bu yöntemle yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır [16-20]. WoE yöntemi Bayes olasılık teoreminin log-linear biçimine dayanmaktadır. Bu teorem, bir olayın gerçekleşme olasılığı ile ilgili öncül olasılık beklentilerinin, olayın gerçekleşmesi durumunda elde edilen yeni bilgilerle güncelleştirilerek, soncul olasılıkların bulunmasını sağlayan bir olasılık teoremidir [16].

Bu çalışmada, heyelanı etkileyen faktörlerin alt kategorilerinin ağırlıkları Denklem (3-5) kullanılarak hesaplanır [19-21].

$$(W+) = \ln[(A1/(A1 + A2))/(A3/(A3 + A4))] \quad (3)$$

$$(W-) = \ln[(A2/(A1 + A2))/(A4/(A3 + A4))] \quad (4)$$

$$C = (W+) - (W-) \quad (5)$$

Bu eşitliklere göre A1, seçilen bir alt kategorideki heyelanlı alanları; A2, seçilen kategori dışındaki toplam heyelanlı alanları; A3, seçilen kategorideki heyelansız alanları; A4, seçilen kategori dışındaki toplam heyelansız alanları; A1+A2, toplam heyelanlı alanları; A3+A4, çalışma alanındaki toplam heyelansız alanları, C ise ağırlıkların farkını ifade etmektedir [20]. C heyelan olayı ile tahmin değişkeni arasındaki nihai konumsal ilişkiyi gösterir. Sıfıra eşit bir fark değeri heyelana neden olan faktörün alt kategorisinin analiz için önemli olmadığını gösterirken. pozitif ya da negatif fark ise pozitif ya da negatif bir konumsal ilişkiyi göstermektedir.

### 2.3 Lojistik regresyon yöntemi (LR)

Heyelan duyarlılığını modellemek için kullanılan Lojistik Regresyon (LR) olasılıklı istatistiksel bir yöntemdir. LR yönteminde sınıflandırılmış bağımlı bir değişken ile birden çok bağımsız değişken arasındaki ilişki belirlenir. LR yönteminin en avantajlı yönü diğer çok değişkenli istatistiksel yöntemlerin gerektirdiği varsayımsal kabullenmeleri dikkate almaması ve daha az teorik varsayım gerektirmesidir [22].

LR'nin temel ilkesi, 0-1 ya da yanlış-doğru gibi ikili değişkenlerle ölçülen sonuçlarda, bir veya daha fazla bağımsız faktörün analiz edilmesine dayanır. Geleneksel

olarak, heyelan duyarlılığı haritalamasında LR'nin uygulanması, genellikle, bağımsız parametrelerin ve bağımlı heyelan envanter haritalarının hazırlanmasını ve heyelan verilerinin yokluğu veya varlığı göz önüne alınarak binom (veya ikili) LR'nin uygulanmasını içerir. Başka bir deyişle, LR genellikle bir veya daha fazla bağımsız değişken (ler) ile ikili bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir modelin tahmininde kullanılmaktadır [23-24].

Heyelan duyarlılık uygulamalarındaki LR kullanımında, bağımlı değişken olarak adlandırılan heyelanlı piksellere "1", heyelan olmayan piksellere ise "0" değeri atanır. Bağımlı değişken ikili olduğunda, dağılım y tek bir değere azalır. Bu durumda olasılık Denklem (6) ile hesaplanır.

$$p = Pr(y = 1) \quad (6)$$

Bu eşitliğe göre p, 0 ile 1 arasında değişirken, açıklayıcı değişkenlerin doğrusal kombinasyonları  $+\infty$  ile  $-\infty$  arasında değişebilmektedir. Olasılıklar 0 ile 1 arasında değişirken olasılık oranı 0 ve  $\infty$  arasında değişir. Olasılık oranının logaritmasını alarak, LR modelinde  $+\infty$  ile  $-\infty$  arasında değişen bir dönüştürülmüş değişken elde edilmiş ve olasılık oranının doğal logaritması açıklayıcı veya bağımsız değişkenlerle; Denklem (7) eşitliğindeki doğrusal bir model ile ilişkilendirilir [25].

$$p = Pr(y = 1) \quad (7)$$

P dönüşümünün teorik olarak  $-\infty$  ile  $+\infty$  arasındaki herhangi bir değeri alabileceği unutulmamalıdır. Buna ek olarak, ikili veri değişimi, regresyonun bağımlı değişkeninin sürekli olmasını ve yeni bağımlı değişkenin (olasılık logit dönüşümü) sınırsız olmasını ve tahmin edilen olasılığın 0 ile 1 aralığında sürekli olmasını sağlar. Bu modül bağımsız parametrelerin en iyi uyum değerini (best fit) bulmak için maksimum tahmin algoritmasını kullanır [24].

### 3 Materyal

Heyelan Duyarlılık Haritası için çalışma alanı Samsun ili olarak belirlenmiştir. Çalışma Samsun ilinin tüm ilçelerini kapsamaktadır (Şekil 1). Samsun ili Karadeniz Bölgesi'nin Orta Karadeniz Bölümü'nde, Türkiye coğrafyasının en kuzeyinde merkezi bir konumda yer almaktadır.



Şekil 1. Çalışma alanı

Heyelan duyarlılık analizi konusunda daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde kullanılacak parametreler için bir standart bulunmadığı tespit edilmiştir. Heyelan duyarlılık analizinde kullanılan parametrelerin istatistiksel olarak oranlarının incelendiği bir çalışmadan [13] parametre seçimi için Tablo 1'deki oranlar elde edilmiştir.

Tablo 1.Çalışmalarda parametrelerin kullanım oranları

Heyelan Parametresi	Kullanım Oranı (%)	Heyelan Parametresi	Kullanım Oranı (%)
Eğim Durumu	86.47	Arazi Kullanım Durumu	46.62
Litolojik Durum	67.29	Eğrisellik Durumu	40.60
Bakı Durumu	59.77	Tektonik Unsura Yakınlık	28.57
Yükseklik Durumu	55.64	Bitki İndeksi	24.06
Drenaj Ağlarına Yakınlık	50.75	Toprak Özellikleri	23.68

Çalışmada eğim, litoloji, bakı, yükseklik, arazi kullanımı, eğrisellik, tektonik unsura yakınlık, bitki indeksi, topoğrafik nemlilik indeksi ve yıllık yağış verileri materyal olarak belirlenmiştir. Materyale ait verilerden ArcGIS yazılımıyla haritalar üretilmiştir.

Parametrelere ait haritaların heyelan duyarlılık analizinde kullanılmasından önce heyelan olaylarının hangi aralıklarda daha sık görüldüğünün ayırt edilmesi ve hangi aralıktaki verilerin birbirlerine benzer özellikler gösterdiğinin belirlenmesi amacıyla sınıflandırılmaları gereklidir. Bu sınıflandırma işlemi sayesinde raster formattaki eğim, bakı, yükseklik, topoğrafik nemlilik indeksi, eğrisellik, bitki örtüsü indeksi gibi parametrelerin 0-255 renk aralığındaki değerlerinin normalleştirilmesi de sağlanmış olur [2].

Çalışma kullanılan verilere ait veri modelleri ve veri kaynakları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan veri kaynakları

Çalışmada Kullanılan Materyal	Veri Modeli	Veri Kaynağı
Eğim	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Litoloji	Vektör	orbbodies.com
Bakı	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Yükseklik	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Arazi Kullanımı	Vektör	land.copernicus.eu
Eğrisellik	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Tektonik Unsura Yakınlık	Vektör	atag.itu.edu.tr
Bitki İndeksi	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	Raster	earthexplorer.usgs.gov
Yıllık Yağış	Vektör	tr.climate-data.org
Heyelan Envanteri	Raster	Samsun AFAD

#### 3.1 Eğim

Yamaç eğimi, kütle hareketlerinin meydana gelişini ve hareketli malzemenin hareket alanını belirleyen etmenlerdendir ve temel duraylılık parametresidir. Yamaç eğiminin heyelan duyarlılık alanında yapılan analizlerde bir girdi parametresi olması konusunda araştırmacılar bir fikir birliğine varmıştır. Fakat bütün yamaç eğimi sınıflarındaki

heyelan olma ihtimallerinin birbirine yakın olması durumunda yamaç eğiminin çalışma yapılacak alanlarda etkili bir parametre olmadığını da göstermiştir [21].

Eğim haritasının üretilmesinde, 25 metre çözünürlüğe sahip (SRTM 1 Arc-Second Global) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisinden yararlanılmıştır. Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. SYM verisine ArcMap uygulamasının ArcToolbox menüsünde yer alan “3D Analyst Tools -> Raster Surface -> Slope” işlemi uygulanarak harita üretilmiştir. Çalışma alanında Eğim parametresi 6 alt sınıfta incelenmiştir. (Tablo 3, Şekil 2).

**Tablo 3.** Eğim sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzelik Dilim
0 – 2 derece	1 730,037	17.81%
2 – 5 derece	1 284,435	13.23%
5 – 10 derece	1 896,264	19.53%
10 – 15 derece	1 682,291	17.32%
15 – 20 derece	1 386,938	14.28%
20 – 71 derece	1 731,387	17.83%

### 3.2 Litoloji

Litoloji, kohezyon denilen cisimlerin suya yapışma oranı ile yamacın duraylılığını etkileyen çok fazla öneme sahip olan parametrelerden biridir. Malzemelerin dayanım, geçirimsizlik, sertlik gibi çeşitli özellikleri ile ilişkilidir [26-27]. Heyelanlar, litolojik çeşitliliklerin gözlemlendiği alanlarda daha fazla meydana gelmektedir [28].

Litoloji haritasının üretilmesi için gerekli veriler “https://orrbodies.com/” adresinden indirilmiştir. Türkiye’ye ait veriler ArcMap programıyla ArcToolbox menüsünde bulunan “Analysis Tools-> Extract -> Clip” işlemi uygulanarak çalışma alanına uygun olacak şekilde kırılmış ve Samsun iline ait vektör veri üretilmiştir. Üretilen veriler litolojik kodlarına göre haritalanmıştır. Çalışma alanında Litoloji parametresi 12 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 4, Şekil 3).

**Tablo 4.** Litoloji sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzelik Dilim
Üst Kretase	4 637,472	48.10%
Mesozoyik	219,632	2.28%
Kuvaterner	1,009	0.01%
Jura	333,797	3.46%
Neojen	573,219	5.95%
Eosen	1 336,226	13.86%
Permyen	9,952	0.10%
Oligosen	20,746	0.22%
Holosen	1 612,706	16.73%
Pleyistosen	25,046	0.26%
Kretase	85,272	0.88%
Diğer	786,211	8.15%

### 3.3 Bakı

Bakı (Yamaç eğim açısı), arazi yüzeyinin güneş ışınlarını almasına göre yönünü gösteren parametredir. Yüzeyin herhangi bir noktasındaki teğet düzleminin baktığı yöndür [8]. Çalışmacılar bakı kavramının heyelanın meydana

gelmesinde etkili bir parametre olduğunu, yamacın nem tutmasının ve bitki örtüsünün bakı tarafından denetlendiğini belirtmektedir [29].

Bakı haritasının üretilmesinde, 25 metre çözünürlüğe sahip (SRTM 1 Arc-Second Global) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisinden yararlanılmıştır. Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. SYM verisine ArcMap uygulamasının ArcToolbox menüsünde yer alan “3D Analyst Tools -> Raster Surface -> Aspect” işlemi uygulanarak harita üretilmiştir. Çalışma alanında Bakı parametresi 3 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 5, Şekil 4).

**Tablo 5.** Bakı sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzelik Dilim
Kuzey	3 297,772	33.96%
Düz	3 280,286	33.78%
Güney	3 133,295	32.26%

### 3.4 Yükseklik

Rüzgar, dalga, gel-git, ısı değişimi, akıntılar gibi dış bozucu etkilerden arınmış olarak düşünülen ortalama okyanus yüzeyinden ve bunun karalar altından da devam ettiği varsayımıyla oluşan kapalı denge yüzeyine jeoid adı verilir. Yeryüzündeki herhangi bir noktanın çekül doğrultusu boyunca jeoide olan uzaklığına ortometrik yükseklik denir ve pratikte kullanılan yükseklik kavramına denk gelir [30-31].

Yüksekliğin, heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında en fazla kullanılan parametre olmasına karşı, litolojik yapı, bitki örtüsü, eğim durumu ve bakı gibi diğer parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gereklidir [2].

Araştırmacılar çok yüksek yamaçlarda bulunan birimlerin, genelde kayaç tipi malzemelerden meydana geldiğini ve alçak yamaçlarda bulunan malzemelere kıyasla heyelan olaylarına karşı daha düşük duyarlılığa sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Ayrıca, orta yükseklikte bulunan yamaçlarda, yüksek yamaçlardan gelmiş olan malzeme sebebiyle meydana gelecek toprak örtüsünün heyelan olaylarına karşı duyarlılığı arttıracak, çok düşük yüksekliklerdeki yamaçlarda ise heyelan olaylarına karşı duyarlılığın daha az olacağını belirtmişlerdir [32-33].

Yükseklik haritasının üretilmesinde, 25 metre çözünürlüğe sahip (SRTM 1 Arc-Second Global) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisinden yararlanılmıştır. Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. SYM verisi yükselti değerleri belirgin olacak şekilde renklendirilmiştir. Çalışma alanında Yükseklik parametresi beş alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 6, Şekil 5).

**Tablo 6.** Yükseklik sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzelik Dilim
-27 – 100 m	2 055,003	21.13%
100 – 400 m	1 730,900	17.80%
400 – 700 m	2 295,427	23.60%
700 – 1000 m	2 660,269	27.36%
1000 – 1982 m	982,916	10.11%

### 3.5 Arazi kullanımı

Bitkilerin bir yamacın duraylılığı üzerinde bazen pozitif bazen negatif etkileri olmaktadır. Özellikle büyük ve güçlü köklere sahip bitkilerin yoğun olduğu yerlerde yamaç duraylılığını pozitif etkilediği görüşü yaygındır. Bitkiler yaprakları aracılığıyla suyu emmekte ve buharlaştırarak, yağışın süzülme etkisini düşürmektedir ayrıca bitkinin kök ve gövdeleri zemin yüzeyinin geçirgenliğini yükselterek, yüzeyde bulunan suyun zemin içerisine direkt olarak geçebilmesinin önünü açmaktadır [34]. Arazi kullanımı parametresinde; yerleşim alanları, ormanlık alanlar, tarım alanları, seyrek ve yoğun bitki örtüsü içeren alanlar gibi alanların heyelanlarla olan bağlantısı değerlendirilmiştir.

Arazi Kullanımı haritasının üretilmesi için gerekli veriler “https://land.copernicus.eu/” adresinden “ESRI Geodatabase” formatında vektör biçimde indirilmiştir. Veriler 2018 yılına ait olup tüm Avrupa ülkelerini içermektedir. Veriler ArcMap programıyla ArcToolbox menüsünde bulunan “Analysis Tools-> Extract -> Clip” işlemi uygulanarak çalışma alanına uygun olacak şekilde kırılmış ve CORINE arazi örtüsü sınıfları standardına göre renklendirilmiştir. Çalışma alanında Arazi Kullanımı parametresi 11 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 7, Şekil 6).

**Tablo 7.** Arazi kullanımı sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdellik Dilim
100 - Yerleşim Yerleri	194,336	2.00%
211 - Susuz Tarım Alanları	1 375,378	14.14%
212 - Sulu Tarım Alanları	536,893	5.52%
213 - Çeltik Tarlaları	39,308	0.40%
222 - Meyve Bahçeleri	581,342	5.98%
231 - Mera Alanları	88,493	0.91%
240 - Karışık Tarım Alanları	2 460,672	25.30%
310 - Orman Alanları	3 899,160	40.10%
330 - Kumsal Ve Kayalıklar	239,655	2.46%
400 - Bataklık Ve Tuz Sahaları	98,632	1.01%
500 - Su Kütleleri	210,677	2.17%

### 3.6 Eğrisellik

Eğrisellik parametresi, çoğunlukla arazi yüzeyiyle bir düzlemin kesişimi sonucu oluşan bir hattın ikinci türevinin alınmasıyla belirlenmektedir [35]. Geleneksel olarak yamaç eğriselliği; pozitif (+) ise dışbükey yamaç, negatif (-) ise içbükey yamaç, sıfır (0) değeri ise düz yamaç olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Yaygın görüş; iç bükey olan yamaçlarda genellikle dairesel kayma türü heyelanların, dış bükey yamaçlarda ise akma türü heyelanların oluştuğu yönündedir [36].

Eğrisellik haritasının üretilmesinde, 25 metre çözünürlüğe sahip (SRTM 1 Arc-Second Global) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisinden yararlanılmıştır.

Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. SYM verisine ArcMap uygulamasının ArcToolbox menüsünde yer alan “3D Analyst Tools -> Raster Surface -> Curvature” işlemi uygulanarak harita üretilmiştir. Çalışma alanında Eğrisellik parametresi 3 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 8, Şekil 7).

**Tablo 8.** Eğrisellik sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdellik Dilim
İç Bükey Yamaç	3 118,244	32.07%
Düz	3 366,546	34.62%
Dış Bükey Yamaç	3 239,726	33.32%

### 3.7 Tektonik unsura yakınlık

Tektonik unsurlara yakın mesafelerde daha fazla heyelan oluşmasının nedeni, depremlerin malzemeyi zayıflatmasıdır. Tektonik unsurlara yakınlık parametresi kullanırken, farklı yakınlıklar dikkate alınarak, birden fazla tampon bölge oluşturulmalıdır [37].

Fay Hatları haritasının üretilmesi için gerekli veriler ATAG’ın (Aktif Tektonik Araştırma Grubu) “https://atag.itu.edu.tr/” internet adresinden temin edilmiştir. Türkiye’ye ait veriler ArcMap programıyla ArcToolbox menüsünde bulunan “Analysis Tools-> Extract -> Clip” işlemi uygulanarak çalışma alanına uygun olacak şekilde kırılmış ve Samsun iline ait vektör veri üretilmiştir. Fay verilerine tampon analizi yapılarak, çalışma alanında Tektonik Unsura Yakınlık parametresi 5 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 9, Şekil 8).

**Tablo 9.** Tektonik unsur sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdellik Dilim
0 – 1 km	676,635	6.96%
1 - 2,5 km	671,933	6.91%
2,5 – 5 km	834,976	8.59%
5 – 10 km	1 705,980	17.54%
10+ km	5 835,115	60.00%

### 3.8 Bitki indeksi (NDVI)

Bitki örtüsünün heyelanlar üzerindeki etkisi ile ilgili olarak araştırmacılar arasında farklı görüşler mevcut olup, genellikle bitki örtüsünün hem olumlu, hem de olumsuz etkileri olduğu belirtilmektedir Bitki örtüsü değerlendirmesinde -1 ile + 1 arasında değişen bitki indeksi (NDVI -Normalized Difference Vegetation Index) değerleri haritası üretilerek değerlendirilmeler yapılır. NDVI değerinde, negatif değerler çoğunlukla çıplak / kayalık alanları, 1’e yakın pozitif değerler ise sağlıklı bitki örtüsünü ifade eder [38].

Bitki İndeksi haritasının üretilmesinde, 30 metre çözünürlüğe sahip (Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1) uydu görüntüsü verileri kullanılmıştır. Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. Haritanın üretilmesi için gerekli Band4 ve Band5 verileri ArcMap programıyla ArcToolbox menüsünde

bulunan “Spatial Analyst Tools-> Map Algebra -> Raster Calculator” kısmından “float(Band5-Band4) / float(Band5+Band4)” işlemi uygulanarak üretilmiştir. Çalışma alanında Bitki İndeksi parametresi 3 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 10, Şekil 9).

**Tablo 10.** NDVI sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdelerik Dilim
Zayıf Bitki Örtüsü	352,168	3.62%
Geçiş Alanı	3 625,509	37.28%
Güçlü Bitki Örtüsü	5 746,826	59.10%

### 3.9 Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI)

Topoğrafik nemlilik indeksi (TWI) haritaları, yüzey akış modeline bağlı olarak üretilen ve bir alanın bağlı nemliliğine bakarak ne kadar ıslak olduğunu gösteren verilere sahiptir. Eğime bağlı olarak yamaçlardaki su muhtevasının artma ihtimalinin ve dolayısıyla suya doygun, kaymaya karşı duyarlı hale gelen zeminlerin belirlenmesinde bir değerlendirme parametresidir. Yüksek TWI değerleri, suyun birikerek heyelan oluşumuna karşı duyarlı hale geldiği yerlerdir [2].

Topoğrafik Nemlilik Haritasının üretilmesinde, 25 metre çözünürlüğe sahip (SRTM 1 Arc-Second Global) Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) verisinden yararlanılmıştır. Veriler “https://earthexplorer.usgs.gov/” internet adresinden temin edilmiştir. SYM verisine ArcMap uygulamasının ArcToolbox menüsünde yer alan “Spatial Analyst Tools -> Hydrology -> Flow Direction -> Flow Accumulation” işlemleri ve “Spatial Analyst Tools -> Surface -> Slope” işlemleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler “Raster Calculator” yardımıyla işlenmiş ve harita üretilmiştir Çalışma alanında Topoğrafik Nemlilik İndeksi parametresi 7 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 11, Şekil 10).

**Tablo 11.** TWI Sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdelerik Dilim
2,37 - 5,12	1 325,817	13.65%
5,12 - 5,72	1 499,493	15.44%
5,72 - 6,23	1 432,049	14.75%
6,23 - 6,83	1 497,107	15.42%
6,83 - 7,52	1 381,274	14.22%
7,52 - 8,72	1 320,621	13.60%
8,72 - 24,26	1 255,045	12.92%

### 3.10 Yıllık yağış

Heyelanların oluşmasındaki en önemli parametrelerden birinin yağış olduğu bilinmektedir. Ayrıca şiddetli yağışlar volkanik birimlerin ayrışma derecelerinin çok fazla olmasından dolayı, ayrışmış malzemenin su içeriğini artırmakta ve heyelan oluşumunu hızlandırmaktadır [39].

Yıllık Yağış haritasının üretilmesi için gerekli veriler “http://tr.climate-data.org/” adresinden temin edilmiştir. Çalışmada Samsun ilinin 17 ilçesine ve 30 farklı lokasyona ait yıllık ortalama toplam yağış miktarı verileri

kullanılmıştır. ArcMap programıyla ArcToolbox menüsünde bulunan “Geostatistical Analyst Tools-> Interpolation -> IDW” işlemi uygulanarak harita üretilmiştir. Çalışma alanında Yıllık Yağış parametresi 5 alt sınıfta incelenmiştir (Tablo 12, Şekil 11).

**Tablo 12.** Yıllık yağış sınıflarının alansal dağılımı

Sınıflar	Toplam Alan (km <sup>2</sup> )	Yüzdelerik Dilim
448 – 500 mm	804,730	8.30%
500 – 575 mm	3 010,807	31.05%
575 – 650 mm	1 452,067	14.97%
650 – 725 mm	2 666,217	27.49%
725 – 919 mm	1 763,693	18.19%

### 3.11 Heyelan envanteri

Heyelan envanteri, bir bölgedeki heyelanların konumu, türü, aktivitesi ve fiziksel özellikleri gibi konulara ilişkin bilgileri içeren veri topluluğu olarak tanımlanmaktadır. Heyelan duyarlılık değerlendirmelerinde yapılacak ilk aşama geçmişte olmuş olan heyelanlar hakkında bilgi edinmektir. Çünkü, gelecekte olabilecek heyelanların geçmişte olmuş heyelanlarla benzer şartlar altında gerçekleşebileceği varsayılmaktadır [40].

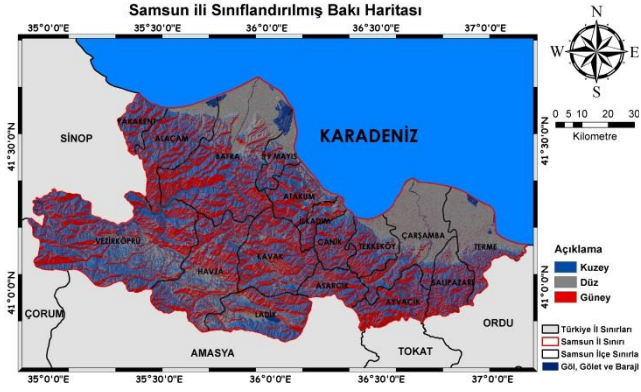
Bu bilgilerden de yola çıkarak Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) bünyesinde kayıtlı 01.01.1950-01.08.2020 yıllarını kapsayan heyelan verilerinden yararlanılarak çalışma alanına ait Heyelan Envanter Haritası oluşturulmuş ve Şekil 12’de verilmiştir.



**Şekil 2.** Eğim haritası



**Şekil 3.** Litoloji haritası



Şekil 4. Bakı haritası



Şekil 8. Tektonik unsura yakınlık haritası



Şekil 5. Yükseklik haritası



Şekil 9. NDVI haritası



Şekil 6. Arazi kullanımı haritası



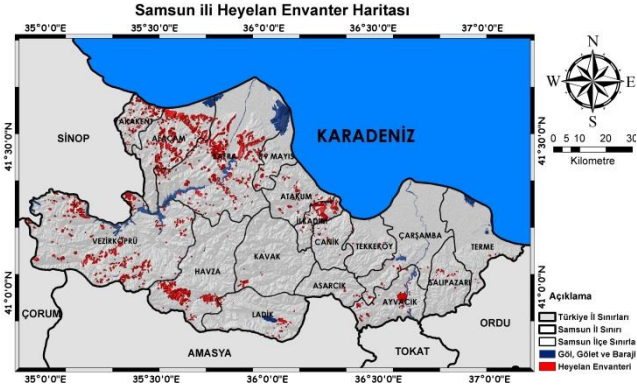
Şekil 10. TWI haritası



Şekil 7. Eğrisellik haritası



Şekil 11. Yıllık yağış haritası



Şekil 12. Heyelan envanter haritası

Heyelan duyarlılık haritasının üretilmesini anlatan iş akışı Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. İş akışı

## 4 Bulgular

### 4.1 FR Yöntemi ile heyelan duyarlılık haritası üretimi

FR yönteminin uygulanması için çalışma bölgesinde seçilen 10 parametre ve alt sınıfları incelenmiştir. Yönteme ilişkin parametre verileri ArcGIS yazılımının ArcToolbox menüsünde yer alan “Spatial Analyst Tools -> Zonal -> Tabulated Area” işlemi kullanılarak temin edilmiştir. Elde edilen veriler yönteme uygun olarak işlenmiş ve Tablo 13'te verilmiştir.

FR değerleri hesaplanan parametre alt sınıfları, parametrelerin birbirlerine göre heyelanı etkileme öncelikleri dikkate alınmadan eşit ağırlıklı olarak ArcGIS programıyla Ağırlıklı Çakıştırma işlemi uygulanarak işlenmiş ve Heyelan Duyarlılık Haritası üretilmiştir. Üretilen harita çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek olmak üzere “Natural Breaks” sınıflandırma işlemi uygulanarak 5 sınıfta yeniden sınıflandırılmıştır (Şekil 14).

### 4.2 WoE yöntemi ile heyelan duyarlılık haritası üretimi

WoE yönteminin uygulanması için çalışma bölgesinde seçilen 10 parametre ve alt sınıfları incelenmiştir. Yönteme ilişkin parametre verileri ArcGIS yazılımının ArcToolbox menüsünde yer alan “Spatial Analyst Tools -> Zonal -> Tabulated Area” işlemi kullanılarak temin edilmiştir. Elde edilen veriler yönteme uygun olarak işlenmiş ve Tablo 13'te verilmiştir.

WoE değerleri hesaplanan parametre alt sınıfları, parametrelerin birbirlerine göre heyelanı etkileme öncelikleri dikkate alınmadan eşit ağırlıklı olarak ArcGIS programıyla Ağırlıklı Çakıştırma işlemi uygulanarak işlenmiş ve Heyelan Duyarlılık Haritası üretilmiştir. Üretilen harita çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek olmak üzere “Natural Breaks” sınıf ayırma yöntemiyle 5 sınıfta ayrılmıştır (Şekil 15).

### 4.3 LR yöntemi ile heyelan duyarlılık haritası üretimi

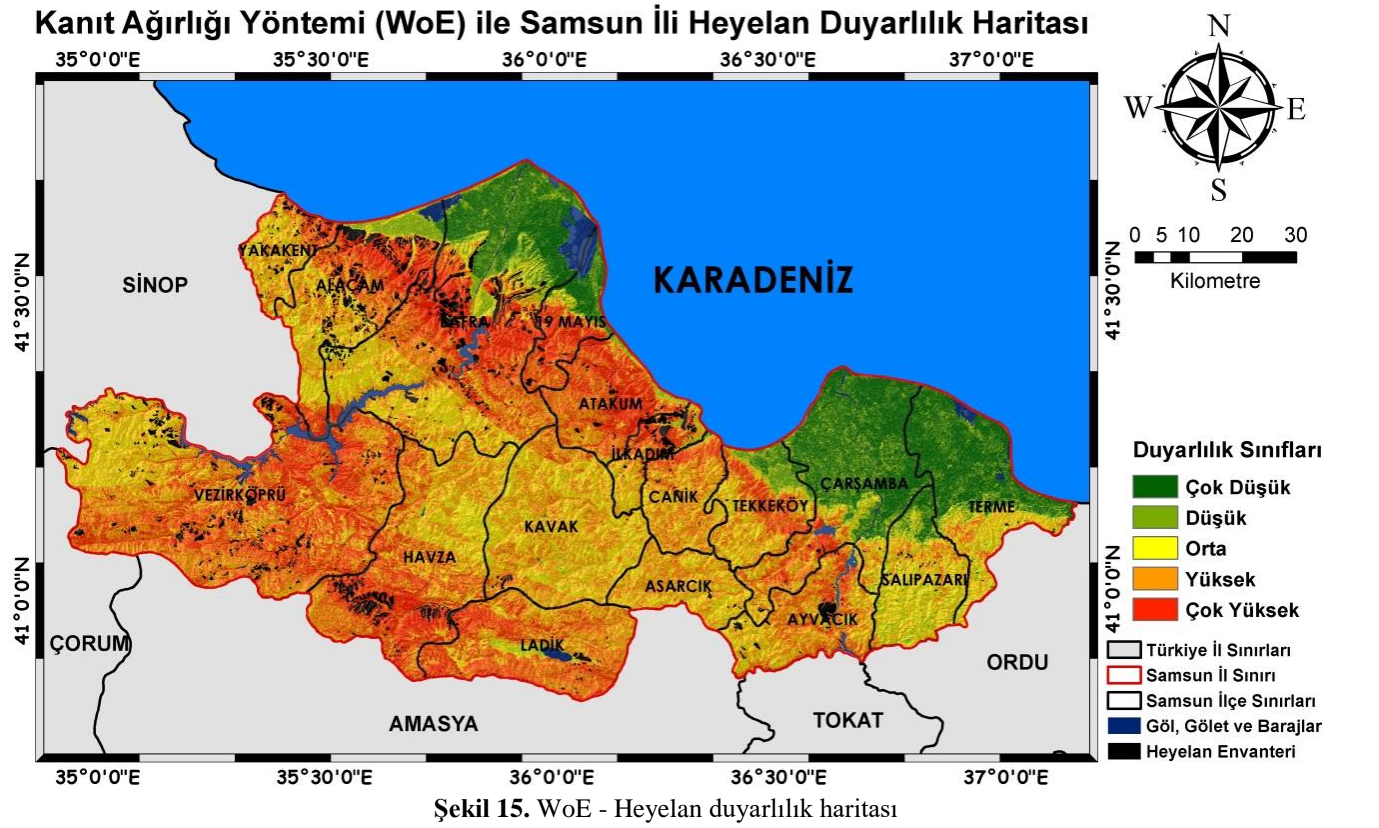
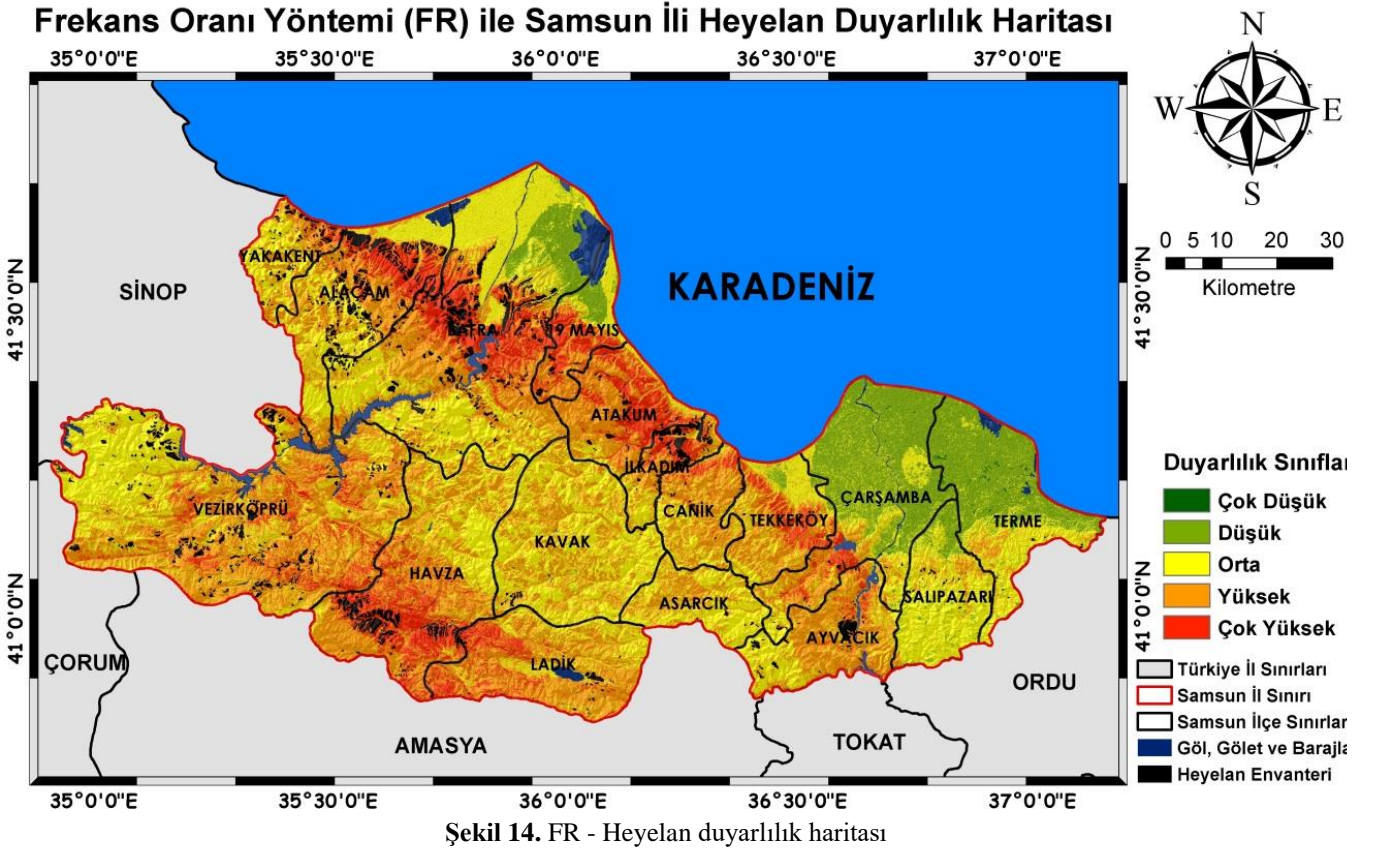
LR yönteminin uygulanması için çalışma bölgesinde seçilen 10 parametre incelenmiş, parametrelere ait alt sınıflar için ise WoE yöntemi için hesaplanan veriler kullanılmıştır. Lojistik Regresyon yöntemine ilişkin parametre verileri ArcGIS yazılımının ArcToolbox menüsünde yer alan “Spatial Analyst Tools -> Zonal -> Tabulated Area” işlemi kullanılarak temin edilmiştir. Elde edilen veriler Minitab yazılımı kullanılarak yönteme uygun olarak işlenmiş ve Tablo 13'te verilmiştir.

Lojistik regresyon yöntemine ait katsayıları hesaplanan parametreler, ArcGIS programıyla Raster Hesaplayıcı kullanılarak işlenmiş ve Heyelan Duyarlılık Haritası üretilmiştir. Üretilen harita çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek olmak üzere “Natural Breaks” sınıf ayırma yöntemiyle 5 sınıfta ayrılmıştır (Şekil 16).

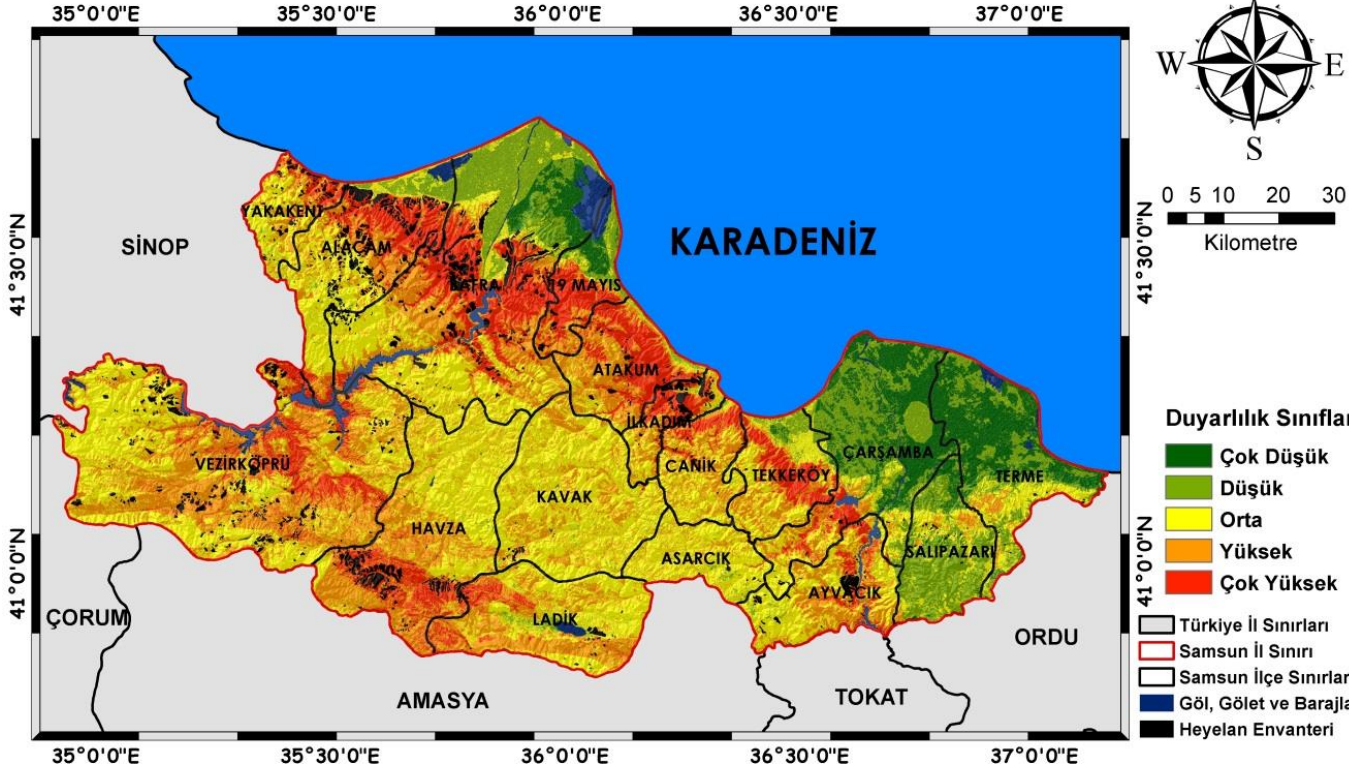
**Tablo 13.** Analiz verileri (FR, WoE, LR)

Parametre	Alt Sınıf	FR	WoE	LR
Regresyon Sabiti				-3.3247
Yükseklik	-27 - 100	0.623	-0.589	
	100 - 400	1.866	0.875	
	400 - 700	0.915	-0.119	0.05778
	700 - 1000	0.895	-0.155	
	1000 - 1982	0.744	-0.335	
Eğim	0 - 2	0.166	-2.000	
	2 - 5	1.117	0.135	
	5 - 10	1.758	0.806	
	10 - 15	1.251	0.290	0.1592
	15 - 20	0.988	-0.015	
	20 - 71	0.682	-0.466	
Bakı	Kuzey	1.246	0.371	
	Düz	0.696	-0.525	0.01678
	Güney	1.059	0.089	
Bitki İndeksi	Zayıf Bitki Örtüsü	0.611	-0.524	
	Geçiş Alanı	1.169	0.273	-0.1034
	Güçlü Bitki Örtüsü	0.917	-0.208	
Yıllık Yağış	448 - 500	1.508	0.480	
	500 - 575	0.692	-0.516	
	575 - 650	0.985	-0.019	0.2699
	650 - 725	1.780	0.970	
Topoğrafik Nemlilik İndeksi	725- 919	0.128	-2.273	
	2.37 - 5.12	0.845	-0.199	
	5.12 - 5.72	1.066	0.079	
	5.72 - 6.23	1.140	0.163	
	6.23 - 6.83	1.087	0.104	-0.01743
	6.83 - 7.52	0.935	-0.081	
Eğrisellik	7.52 - 8.72	0.952	-0.059	
	8.72 - 24.26	0.942	-0.071	
	İç Bükey Yamaç	1.072	0.108	
Arazi Kullanımı	Düz	0.950	-0.080	0.00455
	Dış Bükey Yamaç	0.983	-0.027	
	100 - Yerleşim Yerleri	0.817	-0.214	
	211 - Susuz Tarım Alanları	1.825	0.787	
	212 - Sulu Tarım Alanları	0.375	-1.042	
	213 - Çeltik Tarlaları	0.000	-14.286	
	222 - Meyve Bahçeleri	0.239	-1.513	
	231 - Mera Alanları	0.615	-0.506	0.23356
	240 - Karışık Tarım Alanı	1.503	0.622	
310 - Orman Alanları	0.614	-0.744		
Litoloji	330 - Kumsal ve Kayalık	2.187	0.864	
	400 - Bataklık. Tuz Sahası	0.000	-15.213	
	500 - Su Kütleleri	0.213	-1.598	
	Üst Kretase	0.772	-0.468	
	Mesozoyuk	1.645	0.540	
	Kuvaterner	9.748	2.721	
	Jura	0.707	-0.370	
	Neojen	2.706	1.186	
	Eosen	1.653	0.645	
	Permıyen	0.000	-12.918	0.2623
	Oligosen	5.907	2.011	
Tektonik Unsuru Yakınlık	Holosen	0.254	-1.547	
	Pleyistosen	1.120	0.119	
	Kretase	1.418	0.370	
	Diğer	1.287	0.291	
	0 - 1	2.361	1.027	
	1 - 2.5	1.973	0.798	
	2.5 - 5	1.629	0.577	0.09523
	5 - 10	1.137	0.164	
10+	0.600	-1.021		





## Lojistik Regresyon Yöntemi (LR) ile Samsun İli Heyelan Duyarlılık Haritası



Şekil 16. LR - Heyelan duyarlılık haritası

## 5 Tartışma

### 5.1 Model performanslarının irdelenmesi

Üretilen heyelan duyarlılık haritalarının performans değerlendirmelerinde hata matrislerinden faydalanılmaktadır [41]. ROC eğrileri model performansını test etmek için birçok alanda uygulanır. ROC eğrileri ile iki sınıf arasındaki ayrımı ve sınıflandırıcının performansını görselleştirmek mümkündür [42]. ROC eğrileri analizlerde test ve eğitim verilerinden faydalanan ve işlemlerde ayırt ediciliği göstermekle beraber, farklı modellerin performans açısından karşılaştırılmasında, eğri altında kalan alana (AUC) gereksinim olur. AUC bir olayın meydana gelme ya da gelmeme durumunu güvenli bir biçimde tahmin etme yeteneğini tanımlayarak oluşturulan modelin kalitesini ifade etmektedir [38]. AUC değerinin 1'e yakınlığı ideal durumu

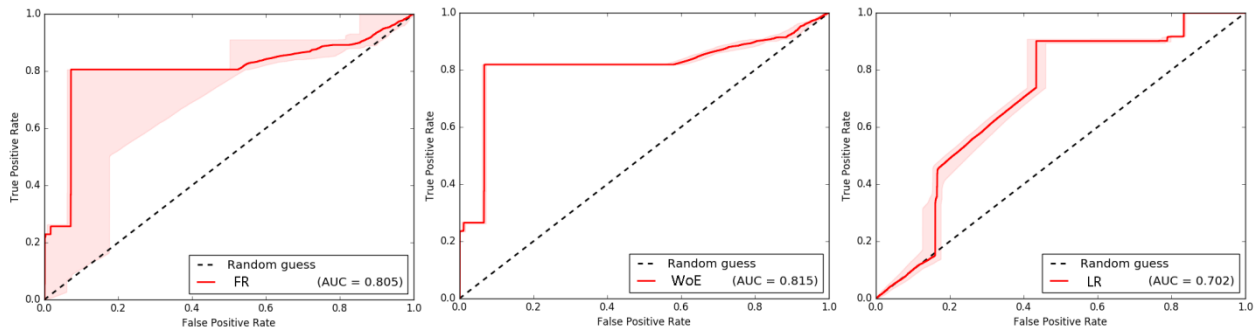
gösterirken, 0.5'e yakın bir değer ise söz konusu modelin performansının oldukça az olduğunu işaret etmektedir.

Model performanslarına ilişkin veriler Şekil 17'de verilmiştir.

### 5.2 Model doğruluklarının irdelenmesi

Heyelan duyarlılık haritalarının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer yöntem de genel doğruluk değeridir. Bu değer hesaplanması için üretilen heyelan duyarlılık haritaları ile heyelan envanter haritası karşılaştırılır. Bu işlem sonucunda eski heyelan olaylarının hangi heyelan duyarlılık sınıfından kaldığı alansal olarak incelenerek yüksek ve çok yüksek duyarlılık sınıfından yer alan heyelan verileri doğruluğun belirlenmesinde kullanılmıştır. Heyelan duyarlılık haritasının yüksek ve çok yüksek sınıfında kalan alanlar ise riskli alanlar olarak kabul edilmiştir.

Model doğruluklarına ilişkin veriler Tablo 14'te verilmiştir.



Şekil 17. Model performansları (FR, WoE, LR)

**Tablo 14.** Model Doğrulukları (FR, WoE, LR)

Duyarlılık Sınıfları	Heyelanlı Alan		
	FR	WoE	LR
Çok Düşük	%0.00	%0.24	%0.03
Düşük	%0.33	%2.03	%0.96
Orta	%16.76	%14.23	%21.96
Yüksek	%41.94	%30.30	%34.04
Çok Yüksek	%40.97	%53.20	%43.01
Doğruluk	%82.91	%83.50	%77.05

## 6 Sonuçlar

Samsun ili ve ilçelerini kapsayan 9376 km<sup>2</sup>'lik bölge çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çalışma alanında daha önce meydana gelmiş heyelanlara ait Heyelan Envanter Haritası T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'ndan temin edilmiştir. Seçilen parametreler heyelan envanter haritasıyla ilişkilendirilerek çalışmada kullanılan yöntemler ile analiz edilmiştir.

Heyelan Duyarlılık analizleri sonucunda üretilen haritalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1- Heyelan duyarlılık haritalarına ait model performansları ROC eğrisi kullanılarak incelendiğinde FR Yöntemi %80.5 oranında, WoE Yöntemi %81.5 oranında ve LR Yöntemi %70.2 oranında performans göstermiştir.

2- Heyelan duyarlılık haritalarına ait model doğrulukları heyelan envanter haritası ile karşılaştırma işlemi uygulanarak incelendiğinde FR Yöntemi %82.9 oranında, WoE Yöntemi %83.5 oranında ve LR Yöntemi %77.1 oranında doğruluk göstermiştir.

3- Modellerin performansları ve doğrulukları birlikte irdelendiğinde en uygun modelin WoE Yöntemi kullanılarak üretildiği tespit edilmiştir. Yöntem Türkiye'de gerçekleştirilen heyelan duyarlılık analizi çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaması açısından da önemlidir.

4- Seçilen modele göre Samsun ilinin %11.36'sı çok düşük risk grubunda, %9.13'ü düşük risk grubunda, %22.43'ü orta risk grubunda, %32.63'ü yüksek risk grubunda ve %26.37'si çok yüksek risk grubunda bulunmaktadır.

5- Çalışmada kullanılan parametreler analiz sonucunda elde edilen 3 model (FR, WoE, LR) ile birlikte değerlendirilmiştir.

- Eğim parametresinin her 3 model de çalışma alanı için anlamlı olduğu ve en yüksek riskin 5 – 10 derece aralığında olduğu görülmüştür.

- Litoloji parametresinin her 3 modelde de çalışma alanı için anlamlı olduğu ve en yüksek riskin kuvaterner sınıfında olduğu görülmüştür.

- Bakı parametresinin her 3 modelde de çalışma alanının için anlamlı olduğu ancak kuzey ve güney yönelimli alanların risk değerlerinin birbirine yakın olması ayırt ediciliği düşürmüştür.

- Yükseklik parametresinin her 3 modelde de çalışma alanı için anlamlı olduğu ve en yüksek riskin 100 – 400 metre aralığında olduğu görülmüştür.

- Arazi kullanımı parametresinin her 3 modelde de çalışma alanı için anlamlı olduğu ve en yüksek riskin susuz tarım alanlarında olduğu görülmüştür.

- Eğrisellik parametresinin alt sınıfları incelendiğinde risk değerlerinin her 3 modelde de genel olarak birbirine yakın olması parametrenin ayırt ediciliğini düşürmüştür ve çalışma alanı için parametrenin uygun olmadığını göstermiştir.

- Tektonik unsura yakınlık parametresinin her 3 model de çalışma alanı için anlamlı olduğu ve en yüksek riskin 0 – 10 km aralığında olduğu 10 km üzerindeki alanlarda heyelanlara nadiren rastlandığı görülmüştür.

- NDVI parametresinin her 3 model de anlamlı olduğu ve en yüksek riskin zayıf bitki örtüsünden güçlü bitki örtüsüne geçiş alanlarında olduğu görülmüştür.

- TWI parametresi incelendiğinde nemlilik indeksi değerlerinin artış ve azalışıyla risk değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin her 3 modelde de olmayışı parametrenin çalışma alanı için uygun olmadığını göstermiştir.

- Yıllık yağış parametresi incelendiğinde yağış değerlerinin artış ve azalışıyla risk değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin her 3 modelde de olmayışı parametrenin çalışma alanı için uygun olmadığını göstermiştir.

Elde edilen bütün sonuçlar ışığında insan yaşamını çok yakından ilgilendiren yerleşim alanları, okul alanları, sağlık tesisleri, alış-veriş merkezleri gibi konut alanlarının planlanmasında, ulaşımda kullanılan yolların planlanmasında, tarımsal faaliyetlerin gerçekleştirildiği arazilerinin planlanmasında, hayvancılık faaliyetlerinin gerçekleştirildiği mera alanlarının planlanmasında ve daha birçok planlama faaliyetinde bu çalışmayla oluşturulan heyelan duyarlılık haritalarının önemi yüksektir.

Heyelan duyarlılık haritalarının üzerinde tehlike oluşturan sahalarda gerekli önlemlerin alınmasında ve yeni alt ve üst yapı tesislerinin belirlenmesinde altlık olarak kullanılabilceği düşünülmektedir. Heyelan duyarlılık haritalarının doğru ve güncel olarak üretilmesi afet planlaması başta olmak üzere heyelan kaynaklı maddi ve manevi kayıpların önlenmesi amacıyla gerçekleştirilen planlama faaliyetleri açısından son derece önemlidir. Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde araştırmacılar tarafından dikkate alınması gereken en önemli husus ise, bu haritaların güncel verilerle değişen şartlara göre yeniden üretilmesi gerekliliğidir.

## Teşekkür

Bu çalışma Aslan Cihat Başara tarafından Yasemin Şişman danışmanlığında Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanan yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %19**

#### Kaynaklar

- [1] AFAD, Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2014.
- [2] A. C. Başara, İstatistiksel Yöntemler Kullanılarak Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesi ve Konumsal Hassasiyetlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [3] B. Ildır, Türkiye’de heyelanların dağılımı ve afetler yasası ile ilgili uygulamalar. 2nd National Landslide Symposium, Sakarya, Türkiye, Eylül 1995.
- [4] A. C. Başara and Y. Şişman, Landslide Susceptibility Mapping of Tokat (Turkey) Province Using Weight of Evidence and Random Forest. *Advanced GIS*, 1(1), 1-7, 2021.
- [5] R. Karagüzel, Y. Mahmutoğlu, M. Erdoğan Topçuoğlu, G. Şans and A. Dikbaş, Susceptibility mapping for sinkhole occurrence by GIS and SSI methods: A case study in Afsin-Elbistan coal basin. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(8), 1353-1359, 2020. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.69812>.
- [6] B. Balaban, Gölpazarı (Bilecik) ve çevresinin heyelan duyarlılık analizleri. Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [7] P. Aleotti and R. Chowdhury, Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58(1), 21-44, 1999. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>.
- [8] S. Dağ, Çayeli (Rize) ve çevresinin istatistiksel yöntemlerle heyelan duyarlılık analizi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [9] A. C. Başara, M. E. Tabar and Y. Şişman, Landslide Susceptibility Mapping of Samsun (Turkey) Province Using Frequency Ratio and AHP Methods. *Turkish Journal of Geographic Information Systems*, 3(1), 24-30, 2021.
- [10] A. Akgun and N. Türk, Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 595-611, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0373-1>.
- [11] M. Çeliker, O. Yıldız and N. N. Koçer, Evaluating solid waste landfill site selection using multi-criteria decision analysis and geographic information systems in the city of Elazığ, Turkey. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 683-691, 2019. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.70493>.
- [12] M. Uyan, Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 343-351, 2017. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.59489>.
- [13] Ç. Tetik Biçer, Heyelan Risk Haritalaması Üzerine Yarı Sayısal Bir Değerlendirme. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [14] E. Akyol, M. Alkan and H. Akgündüz, Determining Settlement Suitability by Geographic Information Systems and Analytical Hierarchy Process. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (6) , 254-259, 2016. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.40412>.
- [15] S. Lee and J. A. Talib, Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental geology*, 47(7), 982-990, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>.
- [16] G. F. Bonham Carter, F. P. Agterberg and D. F. Wright, Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 54(11), 1585-1592, 1988.
- [17] W. Chen, W. Li, E. Hou, Z. Zhao, N. Deng, H. Bai and D. Wang, Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model for the Chencang District of Baoji, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(11), 4499-4511, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1369-z>.
- [18] S. Doğan, H. Akıncı ve C. Kılıçoğlu, Bayes olasılık teoremi kullanılarak Samsun il merkezinin heyelan duyarlılık haritasının üretilmesi. 65. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, Türkiye, 2012.
- [19] A. Ozdemir and T. Altural, A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 180-197, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014>.
- [20] N. R. Regmi, J. R. Giardino and J. D. Vitek, Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>.
- [21] C. J. Van Westen, N. Rengers and R. Soeters, Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 399-419, 2003. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e>.
- [22] M. Ercanoglu and F. Temiz, Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 949-964, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-0912-4>.
- [23] H. Tatlıdil, Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz. Türkiye, Akademi Matbaası, Ankara, 1996.
- [24] J. Eastman, Idrisi Taiga, guide to GIS and image processing, user’s guide (Ver. 15). Press Clark University, Worcester, USA, 328, 2009.
- [25] R. L. Ott and M. Longnecker, An introduction to statistical methods and data analysis. 5th ed. Belmont, California, USA, Duxbury Press, 2001.

- [26] C. Baeza and J. Corominas, Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 26(12), 1251-1263, 2001. <https://doi.org/10.1002/esp.263> .
- [27] J. Remondo, A. González, J. R. D. De Terán, A. Cendrero, A. Fabbri and C. J. F. Chung, Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30(3), 437-449, 2003. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007201.80743.fc> .
- [28] M. Komac, A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology*, 74(1-4), 17-28, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.005> .
- [29] F. C. Dai and C. F. Lee, Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00087-3) .
- [30] W. Torge, *Geodesy*. Berlin, Germany, Walter de Gruyter, 1991.
- [31] P. Vanicek and E. Krakiwsky, *Geodesy: The Concepts*. Amsterdam, Netherlands, North Holland Publ. Company, 1982.
- [32] D. Caniani, S. Pascale, F. Sdao and A. Sole, Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards*, 45(1), 55-72, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9169-3> .
- [33] P. V. Gorsevski and P. Jankowski, Discerning landslide susceptibility using rough sets. *Computers, environment and urban systems*, 32(1), 53-65, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2007.04.001> .
- [34] C. Gökçeoğlu ve M. Ercanoğlu, Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler. *Yerbilimleri Dergisi*, 22(23), 189-206, 2001.
- [35] S. Lainas, N. Sabatakakis and G. Koukis, Rainfall thresholds for possible landslide initiation in wildfire-affected areas of western Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 75(3), 883-896, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0762-5> .
- [36] J. P. Wilson and J. C. Gallant, *Terrain analysis: principles and applications*. USA, John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [37] D. J. Wachal and P. F. Hudak, Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *GeoJournal*, 51(3), 245-253, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1017524604463> .
- [38] J. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351(1974), 309, 1974.
- [39] R. Selçuk, T. Bayrak, A. Yalçın, M. Atasoy, R. Nişancı ve S. Ekercin, Rize Bölgesinde Yağış Heyelan İlişkisi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, (99), 5-9, 2008.
- [40] D. J. Varnes, *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris, France, United Nations, 1984.
- [41] K. Şahin, Heyelan duyarlılık haritası için adımsal regresyona dayalı faktör seçme yönteminin etkinliğinin araştırılması. *Harita Dergisi*, 159, 1-15, 2018.
- [42] J. A. Swets, Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285-1293, 1988. <https://doi.org/10.1126/science.3287615> .





## Farklı regresyon modelleriyle kestirilen zenit troposferik gecikmelerin değerlendirilmesi

### Evaluation of zenith tropospheric delays estimated by different regression models

Ali Utku Akar<sup>1,\*</sup> , Cevat İnal<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

#### Öz

Yapay zekâ ve makine öğrenimi alanındaki gelişmeler, GNSS uygulamalarındaki sorunlara alternatif çözümler sunmakta veya mevcut çözümlerin verimliliğini artırmaya imkân sağlamaktadır. GNSS’de karşılaşılan birçok hata vardır ve bu hatalar kullanıcılar için problem oluşturmaktadır. Troposferik gecikme bunlardan birisidir. GNSS teknolojisine ilginin artmasıyla beraber öğrenme algoritmalarının atmosfer/troposfer çalışmalarında kullanımı, troposferik gecikme kestirimi için yeni modellerin oluşturulmasını önemli hale getirmiştir. Bu çalışmada, Radyal Tabanlı Destek Vektör Regresyonu (RTF-DVR), Ridge ve Elastik-Net regresyon modelleriyle zenit troposferik gecikmenin (ZTD) kestirilmesi amaçlanmış, makine öğrenimi esasına göre eğitilmiş yeni regresyon modellerinin ZTD kestiriminde alternatif olarak tercih edilebilirliği araştırılmıştır. Bunun için farklı yöntemlerden elde edilen sonuç ZTD modelleri karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından RTF-DVR modelinin daha iyi sonuçları verdiği, bunu Elastik-Net ve Ridge modellerinin takip ettiği tespit edilmiştir. Sonrasında yeni modellerden elde edilen ZTD değerleri, Canadian Spatial Reference System–Precise Point Positioning (CSRS-PPP) ZTD değerleriyle karşılaştırılıp modellerin performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre, CSRS-PPP’ye en uyumlu modelin RTF-DVR olduğu sonucuna varılmıştır

**Anahtar kelimeler:** ZTD kestirimi, Makine öğrenimi, RTF-DVR, Ridge ve elastik-net regresyonu, CSRS-PPP

#### 1 Giriş

Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) içerisinde önemli bir yeri olan sinyaller, atmosferde yayılırken iyonosferdeki elektron içeriğinden ve nötr troposferdeki hava kütlelerinden etkilenmektedir [1]. GNSS sinyallerinde, iyonosferik etkinin giderilebilmesi için tekli, ikili ve üçlü faz farkları kullanılır veya uygulamada çift frekanslı GNSS alıcıları tercih edilir [2, 3]. Bu durum iyonosferik etkiyi elimine ederken troposfer etkisini ortadan kaldırmaz. GNSS sinyallerinin troposferdeki kütleler ile etkileşimi sonucu doğrusal hareket etmemesi ve buna bağlı olarak sinyallerin alıcıya beklenen sürede ulaşmaması troposferik gecikme olarak tanımlanmaktadır. İzdüşüm fonksiyonları yardımıyla zenit yönündeki

#### Abstract

Advances in artificial intelligence and machine learning provide alternative solutions to the problems in GNSS applications or enable to increase the efficiency of existing solutions. There are many errors encountered in GNSS and these errors pose a problem to users. The tropospheric delay effect is one of them. The increasing interest in GNSS technology as well as the use of learning algorithms in atmosphere/troposphere studies have made it important to create new models for tropospheric delay estimation. In this study, it was aimed to estimate the zenith tropospheric delay (ZTD) by using Radial Basis Function-Support Vector Regression (RBF-SVR), Ridge and Elastic-Net regression models. The new regression models trained according to machine learning was investigated its preferability as an alternative in ZTD estimation. For this reason, the results obtained from different methods were analyzed by comparing the ZTD models. From the analysis results, it was determined that the RBF-SVR model gave the best results, followed by the Elastic-Net and Ridge models. Afterward, the ZTD values obtained from the new models were compared with the Canadian Spatial Reference System–Precise Point Positioning (CSRS-PPP) ZTD values and the performance of the models was evaluated. According to the evaluation results, it was concluded that RBF-SVR is the most compatible model to CSRS-PPP.

**Keywords:** ZTD Estimation, Machine learning, RBF-SVR, Ridge and elastic-net regression, CSRS-PPP

indirgenmiş durumu ise zenit troposferik gecikmesi (ZTD: Zenith Tropospheric Delay) şeklinde ifade edilmektedir. Gecikme etkisi, hidrostatik ve ıslak bileşenden oluşur. Genellikle hidrostatik bileşen deneysel (ampirik) modellerle doğrudan hesaplanabilmektedir [4]. Ancak su buharının dağılımı düzensiz olduğu için ıslak bileşene ait kesin bir model söz konusu değildir. Islak gecikmenin belirlenmesinde, öncül olarak kullanılan hidrostatik bileşen değerlerinin doğru tespiti, ıslak bileşenin gerçeğe yakın kestirilebilmesinde önemli bir unsurdur böylelikle bileşenlerin her ikisinin de iyi kestirilmesinde fayda vardır [5]. Söz konusu bileşenler, kısıtlayıcı faktörler olduğu için konum belirleme veya meteoroloji alanında daha yüksek

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: auakar@ktun.edu.tr (A. U. Akar)

Geliş / Received: 15.03.2022 Kabul / Accepted: 07.04.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1088375

hassasiyetin sağlanması adına GNSS gözlemlerine dâhil edilmelidir [6].

Troposfer tabakası, atmosferin yeryüzüne en yakın bölgesinde olup, kalınlığı ekvatoran kutuplara doğru gidildikçe azalmaktadır. Bu farklılığı göstermesinin temel nedeni, ekvatoral bölgelerde hem sıcaklığa bağlı olarak ısınan havanın yükselmesi hem de dış kuvvet etkilerinin kutuplara nazaran daha büyük olmasıdır [7]. Ayrıca kalınlık farkları mevsimlere göre çok fazla değişiklik gösterebilmektedir. Bu açıdan troposfer tabakasına bağlı gecikme etkisi; bölgeden bölgeye, yüksekliğe, hava değişimine ve meteorolojik olaylara göre değişmektedir. Mevsimsel ve konumsal değişkenlik, GNSS konumlandırma ve navigasyon uygulamalarında önemli bir hata kaynağı olarak kabul edilir [8].

Günümüze kadar, troposferik hatanın giderilmesi için farklı kuruluşlar/kişiler tarafından çeşitli troposfer modelleri geliştirilmiştir [9, 10]. Üstelik modeller; atmosfer fiziği değişimi, hava ve iklim çalışmaları, ZTD ve yoğunlaşabilir su buharı (PWV: Precipitable Water Vapor) gibi birtakım atmosferik ürünlerin elde edilmesinde bir araç olarak kullanılmaya başlamıştır. Geliştirilen modeller, birbirinden farklı olsa bile her birinin kendine özgü kısıtlamaları bulunmaktadır. Örneğin; Hopfield [11], Saastamoinen [12] ve Black [13] gibi yüzey meteorolojik modelleri, yüzeyde ölçülen sıcaklık, basınç ve bağıl nem parametrelerini kullanarak gecikme etkisini belirler. Ölçülemeyen yüzey parametreleri ise matematiksel model üzerinden belirlendiği için ZTD tahmininde kullanılan meteorolojik parametreler hava koşullarından bağımsız olabilir. Dolayısıyla gerçek zamanlı uygulamalarda anlık meteorolojik verileri elde etmek zordur ve bu da pratik çalışmaları kısıtlar [14]. Küresel Basınç ve Sıcaklık/Küresel İzdüşüm Fonksiyonu (GPT: Global Pressure and Temperature/GMF: Global Mapping Function) serileri ve UNB3m (University of New Brunswick) gibi diğer ampirik modeller, belirli periyotlarda ortalama enlem-boylam değerleri ile belirlenen meteorolojik gridleri kullanır [15]. Bu modeller uzun vadeli ortalamalara dayandığı için küresel ısınma sonucu ani hava değişimlerine karşı duyarsız hale gelebilmektedir [16]. Diğer taraftan yaygın internet ağı, donanım arızaları, sinyal bozulmaları, elektrik kesintisi gibi sorunlar istasyondaki veri akışlarını bozarak model hatalarında artışa sebep olur. Veri akışındaki tutarsızlık nedeniyle veri arşivi ve ZTD ürünlerinin kalitesi bozulur. Mevcut troposfer ürünlerini böyle kullanmaya ek olarak, istasyon bazında elde edilen meteorolojik verilerle oluşturulmuş makine öğrenimi modeli, alternatif bir yaklaşım olarak görülebilir. Öğrenme modelleriyle veri arşivindeki hataların/eksikliklerin ortaya çıkartılıp giderilmesi de söz konusu olabilmektedir [17].

GNSS teknolojisine ilginin artmasıyla birlikte öğrenme algoritmalarının troposfer çalışmalarında kullanılmasının önemi ortaya çıkmıştır [18]. Çalışmalarda ilk olarak, atmosferdeki sıcaklık, basınç, kütsel gazlar ve su buharı basıncı gibi karmaşık parametrelerin kestirimi için sinir ağlarına dayalı modellerin oluşturulması üzerine ağırlık verilmiştir [7, 19]. Parametre kestirimleri dışında Łoś vd. [20], Polonya için rastgele orman sınıflama yaklaşımını kullanarak 0-2 saatlik fırtınaları tahmin etmede entegreli su

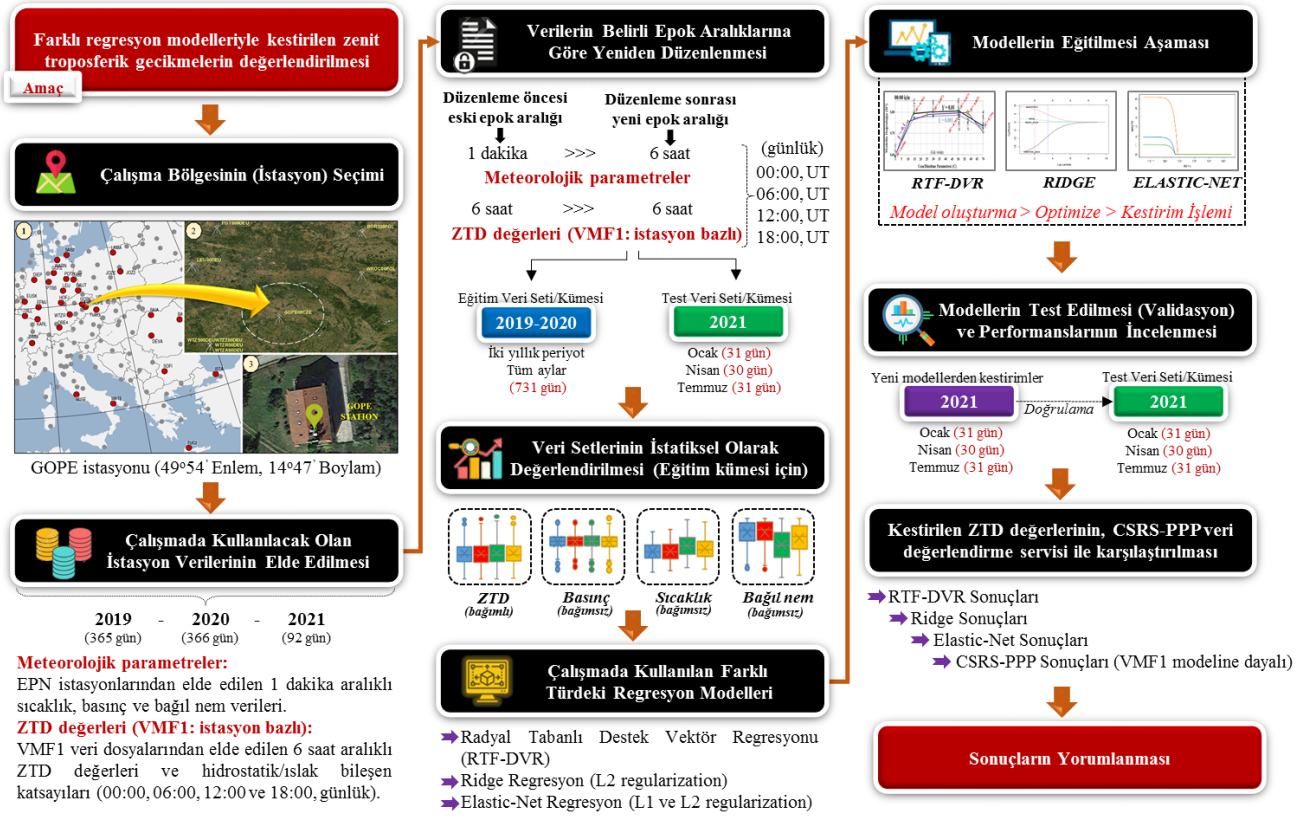
buharı ve tomografi tabanlı düşey profillerin sinerjisini kullanmak için model sunmuştur. Manandhar vd. [21] tarafından, su buharı basıncının düzensizliği üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş olup PWV ve meteorolojik sensörler kullanılarak saatlik yağış tahmini yapılmıştır. Selbesoğlu [22], GNSS istasyonları ve meteorolojik verilerin entegre edilmesi ile Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı troposferik ıslak gecikmenin enterpolasyonu için doğruluk araştırması gerçekleştirmiştir. Deng vd. [23], uzun mesafeli az sayıdaki referans istasyonu altında troposferik gecikme enterpolasyonunun düşük hassasiyeti problemini çözmek için Destek Vektör Regresyonu'na (DVR) dayalı yöntem önermiştir. Çeşitli yöntemlerin troposfer modellemesinde kullanımı, troposferik gecikme kestirimi için yeni modellerin oluşturulmasını tetiklemiştir [24].

Bu çalışmada, makine öğrenimine dayalı Radyal Tabanlı Destek Vektör Regresyonu (RTF-DVR), Ridge ve Elastik-Net regresyon modellerinin ZTD kestirimi için alternatif yöntemler olarak tercih edilebilirliği araştırılmıştır. Modellemeler için ilk olarak, çalışma bölgesi (istasyon) seçimi gerçekleştirilmiş ardından çalışmada kullanılacak olan meteorolojik ve istasyon bazlı VMF1 (Vienna Mapping Function) ZTD verileri temin edilmiştir. Veriler; 2019-2020 olmak üzere iki yıllık dönem ile 2021 yılındaki Ocak, Nisan ve Temmuz'u içeren üç aylık dönemi kapsamaktadır. 2019 ve 2020 yılı verileri modellerin eğitilmesi, 2021 yılındaki üç aya ait veriler ise test/doğrulama amacıyla kullanılmıştır. Eğitilen modeller üzerinden ZTD'ler kestirilerek farklı regresyon modeli türleri analiz edilmiştir. Son olarak, yeni modellerden elde edilen ZTD değerleri, internet tabanlı GNSS değerlendirme servislerinden Canadian Spatial Reference System–Precise Point Positioning (CSRS-PPP) ZTD değerleriyle karşılaştırılıp yeni modellerin performansı değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

Küresel ısınma, iklim değişikliği ve atmosfer fiziğindeki değişimler sonucu atmosferik parametrelerde ani hareketlilik veya beklenmeyen dönemlerde beklenmedik hava koşulları gözlemlenmektedir. GNSS sinyalleri bu durumdan doğrudan etkilenir ve troposferik gecikmenin tahmini zorlaşır. Dolayısıyla mevcut durumdaki yüzey meteorolojik ve ampirik troposfer modelleri gecikme etkisini tam olarak yansıtamamaktadır. Ayrıca referans istasyonlarındaki elektrik kesintisi, donanım arızaları ve sinyal bozulmaları gibi çeşitli faktörler, troposferik gecikme dosyalarının arşivlenmesini engeller. Bu türden sorunlara alternatif çözümler sunma açısından makine öğrenimi çerçevesindeki farklı regresyon modelleri kullanılmış ve modellerin ZTD kestirimindeki performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan iş akış süreci Şekil 1'de özetlenmiştir.

Uygulamadaki süreci takiben, ilk olarak istasyon seçimi gerçekleştirilmiş ve istasyon verileri düzenlenerek modellemeler için hazır hale getirilmiştir. Veri setlerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi yapıldıktan sonra farklı regresyon modelleri kurulmuş ayrıca test edilmiştir. En son, yeni modellerden kestirilen ZTD değerleri, CSRS-PPP'ye ait ZTD değerleriyle karşılaştırılmıştır.



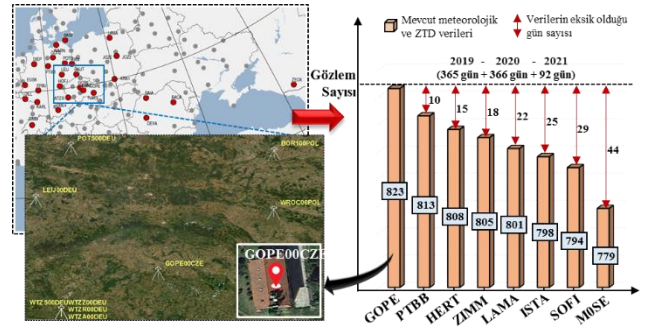
Şekil 1. Çalışma kapsamında takip edilen iş akış süreci

## 2.1 Çalışma bölgesinin (istasyon) seçimi

ZTD kestirimi yapabilmek için girdi verilerine yani meteorolojik parametrelere ihtiyaç vardır. Bu parametreler, referans istasyonu üzerindeki meteorolojik sensörlerden üretilmektedir. Ancak dünya genelinde, GNSS ve meteorolojik sensörlerin birlikte çalıştığı çok az sayıda referans istasyonu (46 istasyon) mevcuttur. Bu çalışmada, EUREF Sabit GNSS Ağı (EPN: EUREF Permanent GNSS Network) içerisinde farklı bölgelerde bulunan GNSS-meteorolojik sensörlü istasyonlar araştırılmış ve bu yönde istasyon seçimi gerçekleştirilmiştir. İstasyon seçiminde, regresyon modellerinden yüksek performans elde edilmesi açısından yeterli veri sayısının sağlanması, eksiksiz, düzenli ve doğru atmosferik parametrelerin modelde kullanılması gibi unsurlara dikkat edilmiştir. 2019-2020 yılları arasındaki tüm günler ile 2021'deki üç farklı ayı (Ocak-31, Nisan-30 ve Temmuz-31) kapsayan 92 güne ait veriler incelenmiş ve ardından eksik gözlem sayıları bulunmuştur. Burada 2019 ve 2020 yılı verileri regresyon modellerinde eğitim veri seti açısından, 2021 yılındaki ocak, nisan ve temmuz ayları ise test veri seti açısından önemlidir. Dolayısıyla, tüm incelemeler sonucunda, farklı regresyon teknikleriyle ZTD kestirimi yapılabilmesi için Çek Cumhuriyeti bünyesindeki GOPE (GOPE00CZE) istasyonu kullanılmıştır (Şekil 2).

GOPE istasyonu, Avrupa bölgesinde yer almakta olup yaklaşık olarak 49°54'(N) enlemi ve 14°47'(E) boylamında konumlanmaktadır. Bu istasyon, Avrupa'yı kapsayan EPN ile Uluslararası GNSS Servisi (IGS: International GNSS

Service) olmak üzere her iki farklı GNSS ağına da aktif rol oynamaktadır.



Şekil 2. Çalışma kapsamındaki istasyonun seçilmesi

Ek olarak EPN'de güvenilir istasyon olması, anlık meteorolojik verileri toplayacak sensörün bulunması ve üretilen ham verilerin VMF/GPT Serileri gibi veri servislerinde de kabul görmesi GOPE istasyonunun tercih edilmesinde etken olmuştur.

## 2.2 Verilerin elde edilmesi ve düzenlenmesi

Çalışmada kullanılan veriler; yerinde ölçülen meteorolojik parametreler ve VMF1 istasyon bazındaki ZTD değerleridir. Meteorolojik parametreler, EPN istasyonlarına ait ham veri ve analiz sonuçlarının 1 dakika aralıklarla yayınlandığı <https://www.epncb.oma.be/> adresinden temin



edilmiştir. ZTD değerleri ise, VMF veri sunucusundan elde edilen analiz sonuçlarının 6 saat aralıklarla (00:00, 06:00, 12:00 ve 18:00, günlük) daha sonra yayımlandığı <https://vmf.geo.tuwien.ac.at/> adresinden alınmıştır. VMF1 modeline dayalı ZTD değerlerinin kullanılmasının iki nedeni vardır:

1) VMF1 modelinin, ZTD değerini kestirmede en yüksek doğruluğa sahip olması, güvenilir model olması ve yerinde gözlemlerle atmosferik parametreleri iyi belirlemesi,

2) Regresyon modellerinden kestirilen ZTD değerlerini karşılaştırmak amacıyla kullanılan CSRS-PPP'nin troposferik model olarak VMF1'i kullanması ve sonuç dosyasının bu formatta hazırlanmasıdır.

2019-2020 yılları ile 2021 yılındaki üç ayı içeren veri dosyaları ilgili yerlerden elde edildikten sonra verilerin hazırlanması aşamasına geçilmiştir. Farklı kuruluşlar/veri servisleri, istasyon verilerini farklı epok aralıklarında paylaştıkları için veri setleri çalışmanın içeriğine göre oluşturulmalıdır. Bu bağlamda dosyaların belirli formata getirilmesi için Python v3.8 programlama dili kullanılmıştır. CSRS-PPP'den 30 saniye aralıklarla elde edilen gecikme değerleri, düzenleme sonucunda 6 saat aralıklı çıktı dosyasına dönüştürülmüştür. Benzer işlem meteorolojik parametreler için de uygulanmıştır (1 dakikadan 6 saatliğe). Sonuç olarak tüm kullanılan veriler dört farklı zaman dilimine (00, 06, 12, 18) göre düzenlenmiştir.

### 2.3 Veri setlerinin istatistiki değerlendirilmesi

Kullanıcının kararlarını bilimsel forma dönüştürme, modellerin en etkin bir şekilde çalışmasına yardımcı olma, veri yapısını kolay tanıma ve yorumlama açısından verilerin istatistiki olarak değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Özellikle belirsizlik durumlarında, çeşitli değerlendirmeler sonucu çözüm üretilerek veride nereye bakılacağı, hangi noktaya odaklanılacağı ve yapısının nasıl olacağı konularında karar vericiye fikirler sunulur. Bu bakımdan çalışma kapsamında modellerin eğitilmesi sırasında kullanılacak olan 2019 ve 2020 verileri değerlendirilmiştir. Basınç, sıcaklık, bağıl nem ve ZTD değerleri üzerinden kutu grafikleri (boxplot) oluşturulmuştur (Şekil 3).

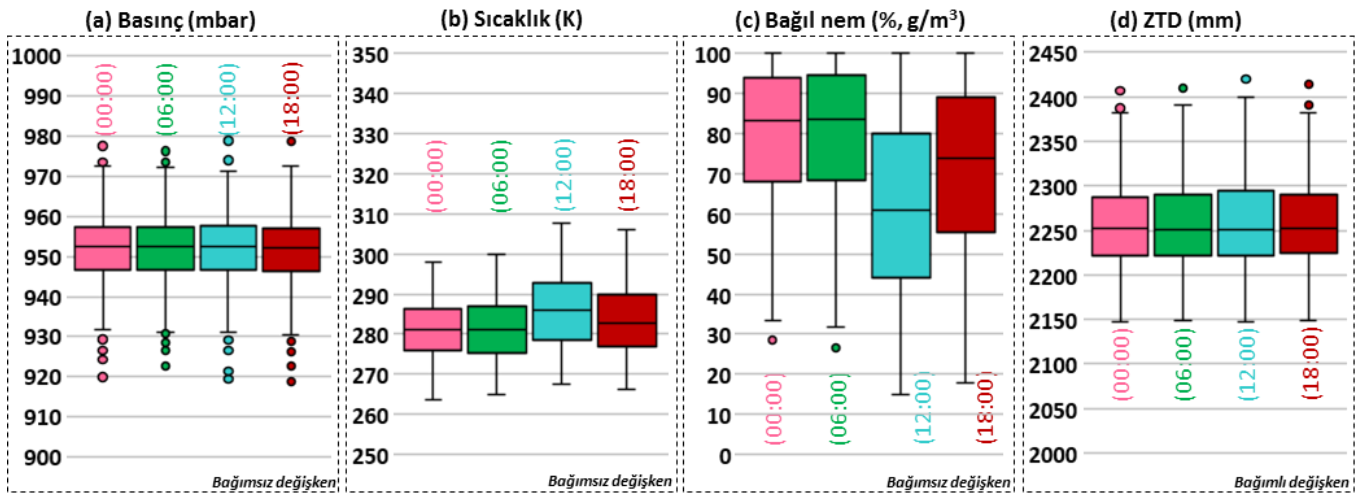
Şekil 3'deki değişkenlere bakıldığında, uç sınırların dışında kalan bazı noktalar bulunmaktadır. Bu noktalar gözlem yapılan gündeki verinin genel dağılıma uymadığını yani aykırı olduğunu ifade etmektedir. Normal koşullarda aykırı olan verilerin veri setinden çıkartılması gerekir, ancak burada farklı yol izlenmiştir. Aykırı olarak belirlenen veri/değişkenin diğer değişkenlerle olan ilişkisi incelenmiş gözlem dosyalarındaki genel dağılımına bakılmıştır. Eğer aykırılık tüm değişkenlerde aynı güne ait ise o günün verileri modellerin eğitilmesinde tercih edilmemiştir. Bu bağlamda iki yıllık periyot içerisinde 6 günün (2019: 23 ve 30 Temmuz, 10 ve 21 Ağustos, 23 Ekim; 2020: 4 Eylül) verileri aykırı olarak tespit edilmiş ve modelin başarısını düşürmemesi adına bu veriler eğitim kümesinde kullanılmamıştır. Sadece sonuç grafikleri oluşturma ve yorumlama aşamasında ilgili günün verileri dâhil edilmiştir.

### 2.4 Radyal tabanlı destek vektör regresyonu (RTF-DVR)

Destek vektör regresyonu (DVR), destek vektör makinelerinin (DVM) bir formu olup regresyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. DVR'de çözülmesi gereken ana konu, gözlem yapılan eğitim veri setindeki hatayı en az yapmak yerine genelleştirilmiş hata sınırını minimuma indirmektir [25]. Regresyonda kullanılan destek vektörlerinin genel ifadesi Denklem (1)'de verilmiştir.

$$(X_1, Y_1) \dots (X_n, Y_n); X \in R^d; Y \in R; f(X) = w \cdot X_i + b \quad (1)$$

Burada,  $X_n$ : d-boyutlu uzayda giriş vektörünü,  $Y_n$ : giriş vektörüne karşılık gelen çıkış vektörünü,  $w$ : ağırlık vektörünü,  $b$ : sapmayı ifade etmektedir. DVR'nin matematiği, e-duyarsız ( $\epsilon$ ) kayıp fonksiyonu olarak adlandırılan bir kayıp fonksiyonu tanımlamaya dayanmaktadır ve buna bağlı olarak gerçek değerlerin belirli bir mesafesi içinde olan hatalar görmezden gelinir. Amaç, her bir  $X_i$  değerini kullanarak, önceden kestirilen e-duyarsız ( $\epsilon$ )



Şekil 3. Basınç (a), sıcaklık (b), bağıl nem (c) ve ZTD (d) değerlerine ait kutu grafikleri

değerinden daha büyük olmayan bir mesafede  $Y_i$  değerini tespit edebilen  $f(X)$  fonksiyonunu bulmaktır. Yöntemin genel fonksiyonu Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$f(X) = |Y_i - (w \cdot X_i + b)| \leq \varepsilon \quad (2)$$

Burada algoritma,  $\varepsilon$ 'den küçük olduğunda hata olmadığını, ancak  $\varepsilon$ 'den büyük olduğunda ise bir hataya sahip olduğunu bulur. Destek vektörleri, yüksek boyutlu öznelik uzayında  $\varepsilon$  fonksiyonunu kullanarak lineer regresyon gerçekleştirir ve eş zamanlı olarak  $\|w\|^2$ 'yi en aza indirerek model karmaşıklığını ortadan kaldırır. Ancak lineerlik her zaman oluşmaz. Dolayısıyla, doğrusal olmayan uygulamalarda bir çekirdek fonksiyonu kullanılarak girdi verilerinin yüksek boyutlu uzaya dönüştürülmesiyle sonuç bulunabilir [26, 27].

DVR yönteminde model kestirim performansını üç kontrol mekanizması etkiler. Bu mekanizmalar; 1) Çekirdek tipi, 2) Çekirdek fonksiyonu ve 3) Düzeltme (C) parametresidir. Çekirdek tipi olarak ifade edilen şey modelin lineer, polinom ve radyal tabanlı fonksiyon (RTF) çekirdeklerinden en uygun olanının seçimidir. Çekirdek fonksiyonu ve düzeltme parametreleri, seçilen çekirdek türünün özellikleridir. Doğrusal, polinom gibi çekirdeklerin çözemediği karmaşık problemlerde ise RTF tercih edilir [28]. Radyal tabanlı fonksiyonun temel yapısı Denklem (3),

$$e^{-\gamma \|X_i - Y_i\|^2} \quad (3)$$

ile gösterilmektedir.  $e$ , doğal logaritmik tabanı ifade ederken,  $\gamma$  parametresi kullanıcı tarafından modelin optimizasyonu esnasında belirlenmektedir.

## 2.5 Ridge regresyonu

1970'de Hoerl ve Kennard tarafından önerilen yöntemin amacı, hataların kareleri toplamını en aza indiren katsayıları düzeltme uygulayarak bulmaktır [29]. En Küçük Kareler (EKK) yönteminden farklı olarak, parametre kestirimlerinin varyanslarını küçültmek ve daha güvenilir kestirimler elde etmek için korelasyon matrisine  $\lambda_2$  parametresi eklenir [30]. Diğer bir deyişle, EKK yönteminden elde edilen katsayılar yanlış değildir. Ancak varyans önemli ölçüde yüksektir ve katsayılar gerçek değerlerden uzaktır. Ridge regresyonunda ise, kestirimlere bir miktar yanlışlık eklenir ve bu da standart sapmanın azalmasına neden olur. Bu nedenle daha güvenilir kestirimler elde edilebilir.  $L_2$  normu ya da Ridge regresyon olarak bilinen yöntemin matematiği Denklem (4)'te verilmiştir [31].

$$\beta_{Ridge} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j^2 \quad (4)$$

(hataların kareleri toplamı) (düzeltme terimi)

Düzeltme terimi içerisinde yer alan  $\lambda_2$  parametresi  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$  katsayılarını sıfıra doğru daraltmakta olup düzeltme teriminin regresyon katsayılarını kontrol etmeyi sağlar.  $\lambda_2$  parametresi sadece  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$  katsayıları ile etkileşim

halindedir  $\beta_0$ 'ı etkilememektedir [32]. Ridge regresyonu için düzeltme terimindeki  $\lambda_2$ 'nin 0'a eşit olması, parametrenin hiçbir etkisinin olmadığı ve eşitliğin EKK yöntemine dönüştüğü anlamına gelmektedir.  $\lambda_2$ 'nin sonsuza doğru ilerlemesi ise, parametrenin büyüdüğünü ve regresyon katsayılarının neredeyse sıfıra eşit olacağı anlamını taşımaktadır. EKK yöntemi katsayı kestirimleri için sadece tek bir sonuç verirken, Ridge regresyon  $\lambda_2$ 'nin her farklı değeri için farklı katsayı kestirimleri sunmaktadır. Dolayısıyla katsayı kestirimleri sürekli değiştiğinden, Ridge regresyonda en iyi  $\lambda_2$  değerinin seçimi önemlidir. Modelin elde edilmesinde kullanılacak olan en iyi  $\lambda_2$  değerinin belirlenmesi için çapraz doğrulama (cross-validation) yöntemi tercih edilmektedir [33]. Ridge regresyon yönteminin bazı avantajları şunlardır:

\* Tüm değişkenler ile modeli kurar ve modeldeki ilişkisiz değişkenleri modelden çıkarmak yerine katsayılarını sıfıra yaklaştırır.

\* Aşırı öğrenmeye (overfitting) karşı dirençli bir yapıdadır.

\* Değişken sayısı fazlaysa EKK'ya göre daha iyi sonuçlar sunar ve çoklu doğrusallık problemi için etkilidir.

\* Yanlıdır ancak varyansı düşüktür.

## 2.6 Elastik-Net regresyonu

Elastik-Net regresyonu, Ridge ve Lasso regresyon yöntemlerinden yola çıkılarak 2005 yılında Zou ve Hastie tarafından geliştirilmiştir [34]. Ridge regresyonunda olduğu gibi aynı işlem adımı takip edilerek düzeltme işlemi gerçekleştirilir. Her bir katsayının, hatalarının kareleri toplamındaki rolüne göre  $\lambda_2$  parametresi,  $\beta$  katsayılarına düzeltme uygular. Değişken seçimi ise Lasso regresyon yöntemindeki gibi yapılır. Anlamsız değişkenlerin katsayıları sıfır yapılır ve otomatik değişken seçimi gerçekleşmiş olur [35].  $L_1$  ve  $L_2$  normları olarak tanımlanan Elastik-Net regresyonunun matematiği Denklem (5),

$$\beta_{els} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij})^2 + \lambda_2 \sum_{j=1}^p \beta_j^2 + \lambda_1 \sum_{j=1}^p |\beta_j| \quad (5)$$

(hataların kareleri toplamı) (düzeltme terimleri)

ile gösterilmektedir.  $\lambda_1, \lambda_2$  parametrelerinin seçimi, k-katlı çapraz doğrulama yöntemiyle yapılır.  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  için, belirli değerleri içeren bir küme seçilir ve her bir değer test hataları hesaplanır. En düşük hata değerini veren  $\lambda_{1,2}$  parametreleri seçilerek elastik net regresyon modeli oluşturulur [36].

## 2.7 Model performans değerlendirme ölçütleri

Farklı regresyon yöntemlerini ve yöntemlerden elde edilen kestirim değerleri ile CSRS-PPP'nin yayınladığı gecikme değerlerini karşılaştırmak için  $R^2$  değeri (Belirleme katsayısı), Karesel Ortalama Hata (KOH), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH) sonuçları performans analizlerinde kullanılmıştır.  $R^2$  değeri, kestirilen regresyon doğrusunun gözlemler kümesinin eğilimini ne derecede temsil ettiğini gösteren bir katsayı olduğu için çalışmada önem arz etmektedir. Model

performans değerlendirme ölçütleri, Denklem (6), Denklem (7), Denklem (8) ve Denklem (9)'da sunulmaktadır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y})^2} \quad (6)$$

$$KOH = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad (8)$$

$$OMYH = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|}{n} * 100 \quad (9)$$

$y_i$ : gözlenen/gerçek değerlerini,  $\bar{y}_i$ : model kestirim değerlerini,  $\hat{y}$ : ortalama değerleri ve  $i$ : 1,2, ...,  $n$ 'i temsil etmektedir.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Modellerin eğitim sonuçları

Çalışma kapsamında GOPE referans istasyonunun iki yıllık (2019-2020) verileri düzenlenerek RTF-DVR, Ridge ve Elastik-Net regresyon modellerinin eğitilmesi amaçlanmıştır. Modellemeler için kullanılan eğitim veri setleri, meteorolojik veriler ve istasyon bazında VMF1 modelinden elde edilen ZTD değerleri içermektedir. Modellerden yüksek performansa sahip kestirim sonuçları elde etmek için en uygun parametrelerle modelin eğitilmesi gerekir. Dolayısıyla her bir modele ait en uygun parametrelerin belirlenmesi amacıyla optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Eğitime, optimizasyon ve kestirim işlemleri numPy, scikit-learn, matplotlib, pandas, seaborn, statsmodels ve sciPy kütüphaneleri aracılığıyla Python v3.8

programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Modellerin eğitim ve test doğrulukları için parametrelerin seçiminde 10-katlı çapraz doğrulama ve grid arama (grid-search) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Farklı modellerin optimizasyon öncesi başlangıç parametreleri, optimizasyon sonrası en uygun parametreleri ve bu parametrelere bağlı  $R^2$  ile KOH değerleri Tablo 1'de sunulmuştur. Optimizasyon yöntemleri sonucu parametre değişikliklerine dayalı model doğrulukları değerlendirilmiş ve regresyon modelleri için en uygun parametreler seçilmiştir.

Tablo 1'de, RTF-DVR modelinde kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken parametrelerin, C ve  $\gamma$  parametreleri olduğu görülmektedir. RTF için iki parametre olan C ve  $\gamma$ 'nın model sonucuna etkisi kesinlikle söz konusudur. Ancak kullanılan hangi parametre çiftinin modelde en iyi sonucu verdiği bilinmemektedir. Optimize edilmeden önce parametreler, başlangıç değeri olarak C=1 ve  $\gamma$ =1 şeklinde modelde tanımlanmaktadır. Optimizasyon yöntemleri ile bu parametreler, oluşturulacak olan gecikme kestirim modeli için tespit edilmiştir. İlk aşamada C parametresi; [1, 1000] eşik aralıklarında değeri 10 artırılarak denenmiş ve en uygun eşik değeri "C=160" olarak tespit edilmiştir. C'nin 160 olduğu durumda model, yüksek  $R^2$  ve düşük KOH değerlerine sahip olmuştur. İkinci aşamada ise ilk aşamada belirlenen parametrelerin yakınında daha küçük bir aralıkta ikinci bir arama yapılarak daha iyi parametre değerlerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Ancak bu kısımda sadece C parametresi değil  $\gamma$  parametresi de hesaba katılmıştır. C; [150, 170] eşik aralıklarında değeri 1 artırılarak denenmiştir. Diğer taraftan  $\gamma$  parametresi;  $[10^{-3}, 10^{-1}]$  eşik aralığında değeri 0.01 artırılarak sonuçlardaki farklılıklar araştırılmıştır. C ve  $\gamma$  ikili parametresi tüm değerler için irdelenmiş olup değerlendirmeye alınmıştır. Değerlendirme sonucuna göre, C'nin 165 ve  $\gamma$  parametresinin 0.02 olduğu durumda model en yüksek  $R^2$  ve en düşük KOH değerlerine ulaşmıştır. Yani, RTF-DVR modelinin "C=165" ve " $\gamma$ =0.02" parametre değerleriyle eğitilmesi sonucuna varılmıştır.

**Tablo 1.** Modellerin optimizasyon öncesi ve sonrası parametre değerleri

Model	RTF-DVR (Radyal tabanlı fonksiyon)	
Parametre	Optimizasyon öncesi: (C = 1, $\gamma$ = 1)	Optimizasyon sonrası: (C = 165, $\gamma$ = 0.02)
Saat	Tüm saatler için (Ort.)	Tüm saatler için (Ort.)
R <sup>2</sup> değeri	0.831	0.871
KOH (mm)	± 20.2	± 17.1
Model	Ridge Regresyonu (L <sub>2</sub> normu)	
Parametre	Optimizasyon öncesi: $\lambda_2$ (alpha) = [0, ∞]	Optimizasyon sonrası: $\lambda_2$ (alpha) = 0.005
Saat	Tüm saatler için (Ort.)	Tüm saatler için (Ort.)
R <sup>2</sup> değeri	0.768	0.793
KOH (mm)	± 24.6	± 22.7
Model	Elastik-Net Regresyon (L <sub>1</sub> ve L <sub>2</sub> normları)	
Parametre	Optimizasyon öncesi: $\lambda_1$ = [0, ∞]; $\lambda_2$ = [0, ∞]	Optimizasyon sonrası: $\lambda_1$ = 0.520; $\lambda_2$ = 0.524
Saat	Tüm saatler için (Ort.)	Tüm saatler için (Ort.)
R <sup>2</sup> değeri	0.770	0.794
KOH (mm)	± 24.4	± 22.5

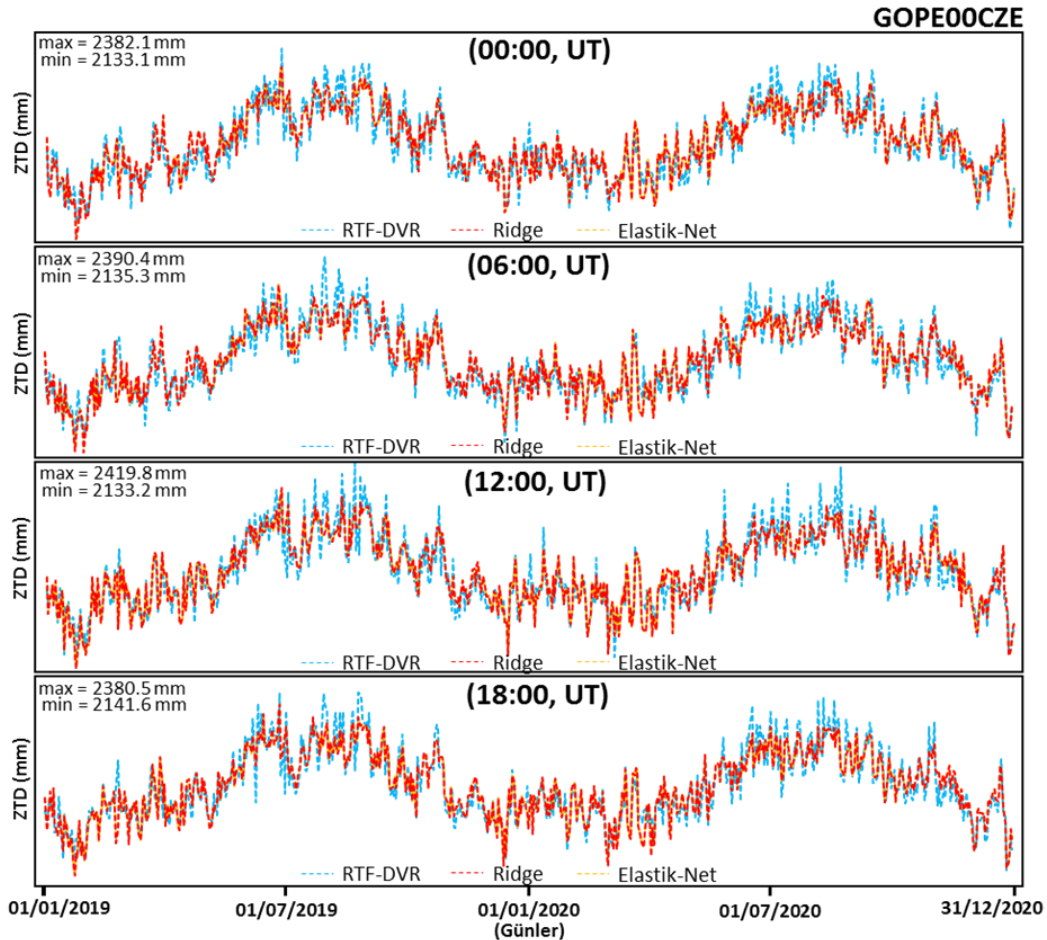
Ridge ve Elastik-Net regresyon modelinde ise belirlenmesi gereken parametreler ve işlem adımları, birbirine benzerlik göstermektedir. Bu modellerde düzeltme teriminin olduğu kısımdaki parametreler ( $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$ ) kullanıcı tarafından belirlenir. Burada  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$ 'in 0'a yaklaşması, parametrenin hiçbir etkisinin olmadığı ve eşitliğin EKK yöntemine dönüştüğünü, sonsuza doğru ilerlemesi ise, parametrenin büyüdüğünü ve regresyon katsayılarının neredeyse sifira eşit olacağını ifade etmektedir.

Optimize edilmeden önce bu parametreler, başlangıç değeri olarak  $\lambda_1=0.00$  ve  $\lambda_2=0.00$  şeklinde modelde tanımlanmakta ve sonsuza ( $\infty$ ) doğru gidebilmektedir. Optimizasyon işlemleri ile bu parametreler, oluşturulacak olan gecikme kestirim modeli için tespit edilmiştir. Optimum  $\lambda_{1,2}$  parametrelerine ulaşmak için  $[0, \infty]$  eşik aralıklarında değerler 0.001 artırılarak sonuçlar incelenmiştir. Çalışmadaki veri setinin düşük  $\lambda_{1,2}$  parametrelerinde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüş ve bu bağlamda  $[0, 1]$  eşik aralığında optimum parametrelerin araştırılması düşünülmüştür. Ridge regresyonu için  $\lambda_2$  parametresinin 0.005 olduğu durumda, en yüksek  $R^2$  ve en düşük KOH değerlerine ulaşılmıştır. Bu nedenle " $\lambda_2(\alpha)=0.005$ " parametresi Ridge modelinin eğitilmesinde kullanılmıştır. Elastik-Net regresyonunun eğitilmesi için " $\lambda_1=0.520$ " ve " $\lambda_2=0.524$ " en uygun parametreler olarak bulunmuştur.

Parametreler aracılığıyla eğitilen modellerin, 2019-2020 yıllarındaki sonuç ZTD değerleri (eğitim için) arasındaki uyum değerlendirilmiştir (Şekil 4).

Buna göre Şekil 4'de, Ridge ve Elastik-Net regresyon modellerinin birbirine çok yakın sonuçlar ürettiği, RTF-DVR modelinin ise bu iki modele göre biraz daha farklı sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Ridge ve Elastik-Net ile RTF-DVR modelleri arasındaki farklılıkların özellikle, yaz dönemine karşılık gelen temmuz ve ağustos aylarında arttığı tespit edilmiştir. Bu farklılıkların nedeni, sıcaklık ve nemin yükselmesiyle, su buharı basıncı ve gecikme etkisinin büyümesidir. Buna bağlı olarak yaz aylarında elde edilen gecikme değerlerinin tüm yıl içerisinde elde edilen değerlere nazaran normal dağılım sergilememesi sonucu modellerin matematiğine göre sonuçlar farklılaşmaktadır. Ridge ile Elastik-Net modelinin arka planındaki matematiksel denklemin benzerlik göstermesinden dolayı büyük ZTD farklılıkları oluşmamıştır. Yaz aylarının dışındaki dönemlerde ise farklılıklar saptanmamakla birlikte modeller arasındaki en az değişimler kış aylarında gerçekleşmiştir. Şekil içerisinde yer alan min ve max değerleri çeşitli saat dilimlerinde gözlemlenen en düşük ve en büyük ZTD değerlerini ifade etmektedir.

Modellere ait dört farklı zaman dilimi için hesaplanan  $R^2$ , KOH, OMH ve OMYH değerleri Tablo 2'de sunulmuştur.



Şekil 4. Eğitilen modellerdeki sonuç ZTD değerlerinin birbiriyle uyumu

**Tablo 2.** Modellerdeki ilgili zaman dilimleri için elde edilen sonuçlar

MODEL:	RTF-DVR				Ridge Regresyonu				Elastik-Net Regresyon			
	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00
Saat:	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00
R <sup>2</sup> değeri	0.855	0.845	0.901	0.883	0.791	0.773	0.811	0.798	0.792	0.775	0.812	0.799
KOH (mm)	± 18.2	± 18.9	± 15.2	± 16.3	± 23.0	± 23.8	± 21.9	± 22.3	± 22.8	± 23.6	± 21.6	± 22.0
OMH (mm)	10.7	11.5	8.6	9.4	18.0	18.8	16.9	17.1	17.9	18.6	16.9	17.0
OMYH	0.47	0.51	0.38	0.41	0.79	0.82	0.74	0.75	0.79	0.81	0.74	0.72

Tablo 2'ye göre, tüm modeller için en iyi sonuç değerlerin 12:00'da, en kötü sonuçların 06:00 saat diliminde elde edildiği sonucuna varılmıştır. Ridge ve Elastik-Net yönteminde tüm saatlerdeki değerler birbirine yakınlık göstermektedir. Ancak bu yöntemlerin eğitime başarısı RTF-DVR yöntemine göre düşüktür. Tablo 1 ve Tablo 2'de de görüldüğü üzere RTF-DVR yönteminin eğitimdeki model başarısı daha yüksek olarak tespit edilmiştir.

### 3.2 Yeni ZTD değerlerinin kestirilmesi ve test edilmesi

Modellerin eğitimi aşaması tamamlandıktan sonra, sonuç modeller üzerinden ZTD kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç modellerin doğruluğu ve performansı, 2021 yılındaki ocak, nisan ve temmuz aylarına ait 92 günün verisi kullanılarak test edilmiştir. Uygulamada bu ayların seçilme nedeni, troposferik gecikme etkisinin bu dönemlerde sırasıyla en az, ortalama seviyede ve en fazla olarak görülmesidir. Çalışmada ilk olarak modellerden kestirilen ZTD değerleri, ilgili yerden temin edilen ZTD değerleriyle test edilmiştir. Test etmek için temin edilen veri seti, VMF veri sunucusundan istasyon bazında sonradan yayınlanan

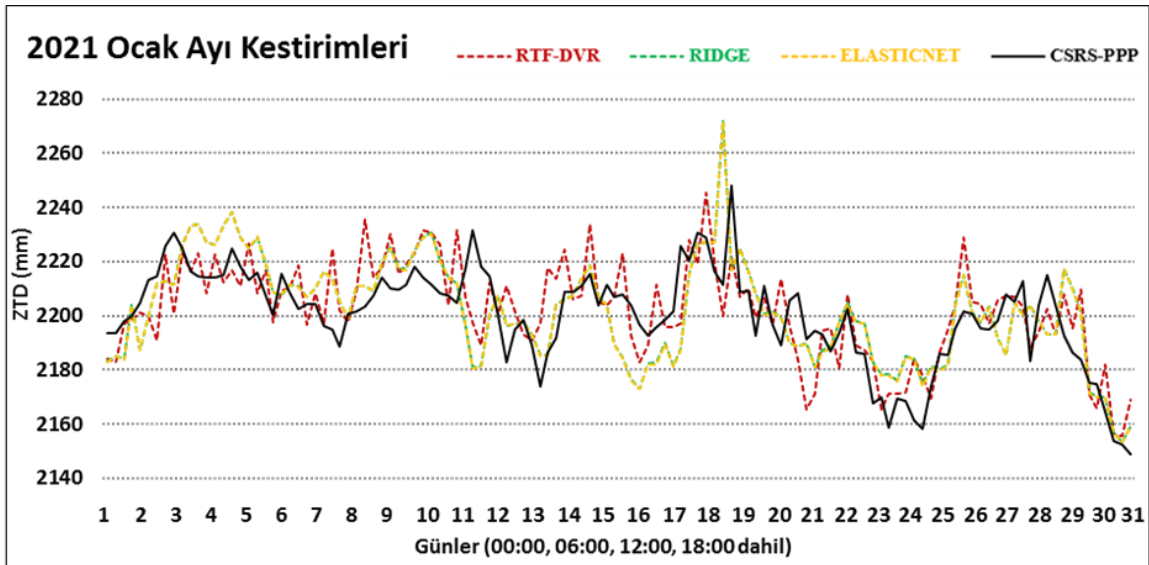
gecikme değerleridir. Model performanslarının değerlendirilmesi için KOH ölçütü kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre; RTF-DVR ile VMF veri sunucusundan temin edilen veriler arasındaki KOH; ocak, nisan ve temmuz ayları için sırasıyla; ± 13.3 mm, ± 16.4 mm ve ± 24.8 mm olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Ridge ve Elastik-Net ile VMF veri sunucusuna ait veriler arasındaki KOH'lar sırasıyla, ± 13.9 mm, ± 16.8 mm ve ± 27.2 mm bulunmuştur. Tüm model sonuçları ele alındığında, yaz günlerinin model başarılarını düşürdüğü diğer kış ve ilkbahar günlerinin başarıyı çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır.

### 3.3 Kestirilen ZTD değerlerinin CSRS-PPP ile karşılaştırılması

Çalışmanın son aşamasında, yeni modellerden kestirilen ZTD değerleri, CSRS-PPP'ye ait ZTD değerleriyle karşılaştırılmıştır. Farklı yöntemlere göre üç farklı ay için kestirilen ZTD'lere ait istatistiksel sonuçlar Tablo 3'de verilmiş ve Şekil 5, 6 ve 7'de grafik olarak sunulmuştur. Grafiklerde günler içerisindeki saat dilimleri (00:00, 06:00, 12:00 ve 18:00) ardışık olarak devam etmektedir.

**Tablo 3.** Farklı yöntemlerden elde edilen ZTD ile CSRS-PPP ZTD'nin karşılaştırılması

Servis	Aylar (2021)	RTF-DVR			Ridge Regresyonu			Elastik-Net Regresyon		
		KOH (mm)	OMH (mm)	OMYH	KOH (mm)	OMH (mm)	OMYH	KOH (mm)	OMH (mm)	OMYH
CSRS-PPP	Ocak	± 13.8	10.6	0.48	± 15.1	11.7	0.53	± 15.0	11.6	0.52
	Nisan	± 14.4	11.5	0.52	± 15.8	11.7	0.53	± 15.0	11.6	0.52
	Temmuz	± 25.4	20.4	0.88	± 27.3	22.0	0.94	± 27.2	21.9	0.93



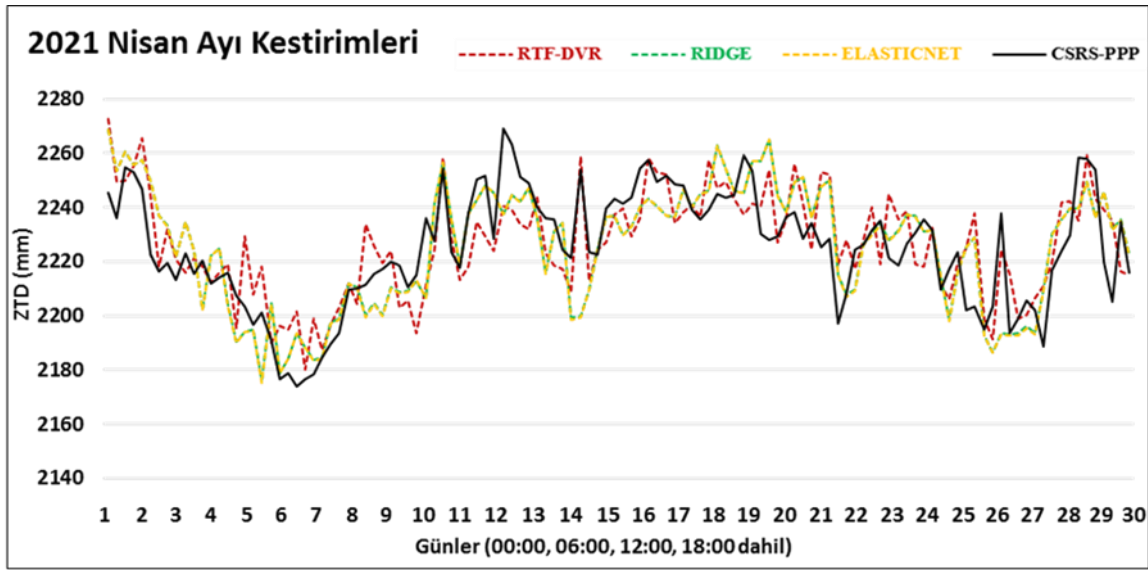
**Şekil 5.** 2021 Ocak ayındaki ZTD değerlerinin karşılaştırılması

RTF-DVR modelinin ocak ve nisan aylarında, daha düşük karesel ortalama hata değeriyle (sırasıyla  $\pm 13.8$  ve  $\pm 14.4$  mm) CSRS-PPP'ye yakın sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. Bu aylarda Ridge ile Elastik-Net modelleri RTF-DVR'ye kıyasla daha düşük başarılar elde etse de sonuçlar birbirine yakındır ve CSRS-PPP ile aralarındaki hata farkları düşüktür. Ridge ve Elastik-Net modellerinden elde edilen değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir (Şekil 5 ve Şekil 6).

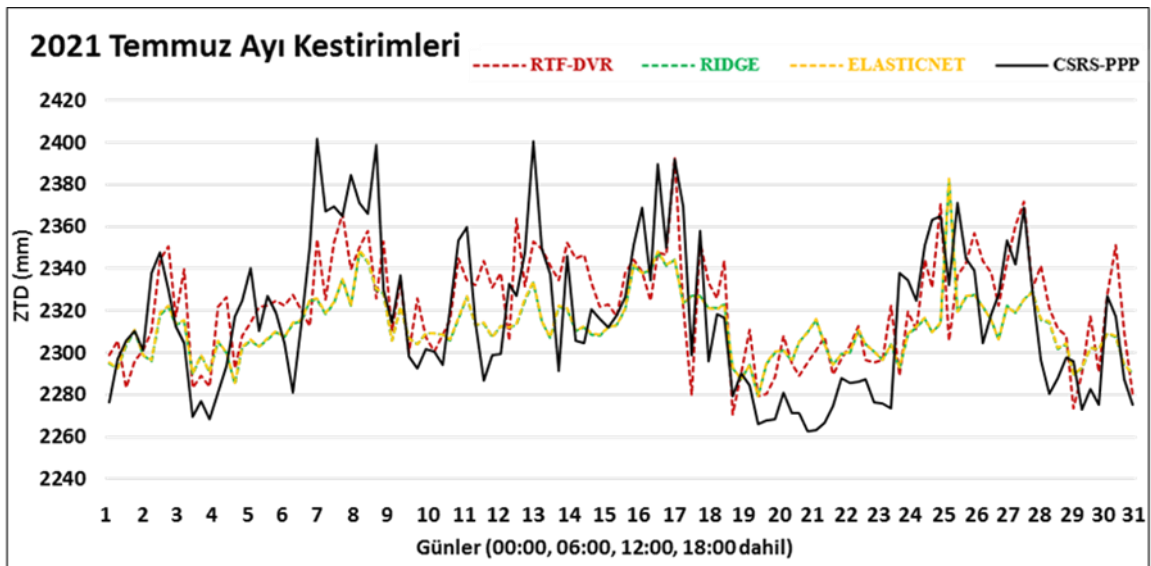
Genel olarak, alternatif yaklaşım şeklinde değerlendirilebilecek RTF-DVR modeli, CSRS-PPP gibi uluslararası kullanımı olan servislere göre  $\pm 14.1$  mm KOH

(ocak ve nisan ayı için) ile sonuçlar üretmektedir. Ridge ve Elastik-Net modelleri ise sırasıyla,  $\pm 15.4$  ve  $\pm 15.0$  mm KOH ile sonuçları elde etmektedir.

Diğer taraftan, tüm kestirim modelleri CSRS-PPP'ye göre temmuz ayında daha çok sapmalara sebebiyet vermiştir. Bunun nedeni modelin eğitilmesi aşamasında da ifade edildiği gibi yaz mevsiminde sıcaklık ve bağıl neme bağlı düzensiz hareketlerdir. Yeni modellerdeki KOH değerlerinin CSRS-PPP'ye göre yaz günlerinde  $\pm 25$  mm ile  $\pm 27$  mm aralığında değiştiği gözlemlenmektedir. Şekil 7'de CSRS-PPP ile modeller arasındaki sapmaların en çok 7-9 ve 19-23 arasındaki günlerde ortaya çıktığı söylenebilir.



Şekil 6. 2021 Nisan ayındaki ZTD değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7. 2021 Temmuz ayındaki ZTD değerlerinin karşılaştırılması

#### 4 Sonuçlar ve öneriler

Son zamanlarda makine öğrenme algoritmaları; GNSS meteorolojisi, konum belirleme, navigasyon, hassas tarım ve atmosferik araştırmalar olmak üzere pek çok alanda kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, GNSS açısından çok önemli katkılar sunmaktadır. GNSS uygulamalarında karşılaşılan birçok temel hata kaynağı vardır ve bu hatalar GNSS kullanıcıları için bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Troposferik gecikme etkisi bunlardan biridir. Özellikle uydu bazı jeodezik ölçmelerdeki gecikme etkilerinin belirlenilmesi amacıyla mevcut kestirim modelleri kullanılmaktadır. Ayrıca bu modeller halen günümüzde geliştirilmektedir ya da alternatif yeni çözümler aranmaktadır.

Bu çalışmada, ZTD kestirimi için RTF-DVR, Ridge ve Elastik-Net'in kullanılması yeni alternatif yöntemler olarak sunulmuştur. Modelden kestirimler farklı regresyon tiplerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Modellemeler için GOPE istasyonunda 2019-2020-2021 dönemlerine ait basınç, sıcaklık ve bağıl nemden oluşan meteorolojik parametreler ve VMF1 ZTD değerleri temin edilmiştir. 2019-2020 yılına ait veri kümesi modellerin eğitilmesinde, geri kalan 2021 yılındaki üç ayı kapsayan günler ise testte kullanılmıştır. Model performansları;  $R^2$ , KOH, OMH ve OMYH ölçütleri ile değerlendirilmiştir.

Modellerin eğitilmesi sonucu, 2019-2020 yıllarındaki tüm günler için en iyi sonuçları RTF-DVR modeli sağlamış ve KOH değerleri  $\pm 2$  cm'nin altında kalmıştır. Diğer iki regresyon modeli ise, biraz daha düşük başarıyla birbirine çok yakın sonuçlar elde etmiştir. Eğitilen modeller kullanılarak, 2021 yılı için farklı meteorolojik şartlara sahip ocak, nisan ve temmuz ayında ZTD kestirimleri yapılmıştır. Kestirim sonuçlarına göre, RTF-DVR'deki KOH değerleri; ocak, nisan ve temmuz ayları için sırasıyla;  $\pm 13.3$  mm,  $\pm 16.4$  mm ve  $\pm 24.8$  mm olarak bulunmuştur. Ridge ve Elastik-Net'te ise bu değerler sırasıyla,  $\pm 13.9$  mm,  $\pm 16.8$  mm ve  $\pm 27.2$  mm hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar CSRS-PPP karşılaştırmasında da görülmüştür. RTF-DVR modeli CSRS-PPP ile en uyumlu sonuçları vermiştir. Tüm analiz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, yaz günlerinin model başarılarını düşürdüğü diğer kış ve ilkbahar günlerinin başarıyı çok fazla etkilemediği sonucuna varılmıştır. Özet olarak, model başarısı açısından sıralama yapılacak olursa, en yüksek başarıyı RTF-DVR modeli yakalamış ve bunu Elastik-Net ile Ridge modelleri takip etmiştir.

Çalışma sonuçlarından, günlük gecikmeyi tahmin etmek için farklı regresyon modellerinin alternatif olabileceği ve mevcut ZTD ürünlerinde eksik/hatalı verileri iyileştirme aracı olarak tercih edilebileceği görülmektedir. ZTD kestirimlerinde daha iyi sonuçlar elde edilmek istenirse, modellerin uzun vadeli ve farklı arazi koşullarını içeren verilerle kurulması önerilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Ali Utku AKAR'ın "GNSS gözlemlerindeki troposferik gecikmenin destek vektör makineleri algoritması ile kestirimi" isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %7

#### Kaynaklar

- [1] V. B. Mendes, Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques. UNB geodesy and geomatics engineering technical report 199(10), 1999.
- [2] A. Angrisano, S. Gaglione, C. Gioia, M. Massaro and U. Robustelli, Assessment of NeQuick ionospheric model for Galileo single-frequency users. Acta Geophysica, 61(6), 1457-1476, 2013. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0116-2>.
- [3] M. Kahveci ve F. Yıldız, Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GPS/GNSS): Teori-Uygulama, 8. Basım, Nobel Yayıncılık, Ankara, 2017.
- [4] P. Tregoning and T. A. Herring, Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays. Geophysical Research Letters, 33(23), 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL027706>.
- [5] R. Dach, S. Lutz, P. Walser and P. Fridez, Bernese GNSS Software Version 5.2, User manual. Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, 2015. DOI: 10.7892/boris.72297, ISBN: 978-3-906813-05-9.
- [6] K. Wilgan, F. Hurter, A. Geiger, W. Rohm and J. Bosy, Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data. Journal of Geodesy, 91(2), 117-134, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0942-5>.
- [7] P. Benevides, J. Catalao and G. Nico, Neural network approach to forecast hourly intense rainfall using GNSS precipitable water vapor and meteorological sensors. Remote Sensing, 11(8), 966, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11080966>.
- [8] S. Li, T. Xu, N. Jiang, H. Yang, S. Wang and Z. Zhang, Regional zenith tropospheric delay modeling based on least squares support vector machine using GNSS and ERA5 data. Remote Sensing, 13(5), 1004, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13051004>.
- [9] J. Böhm, A. Niell, P. Tregoning and H. Schuh, Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. Geophysical research letters, 33(7), 2006. <https://doi.org/10.1029/2005GL025546>.
- [10] J. Boisits, D. Landskron and J. Böhm, VMF3o: the Vienna Mapping Functions for optical frequencies. Journal of Geodesy, 94(6), 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01385-5>.
- [11] H. S. Hopfield, Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical research, 74(18), 4487-4499, 1969. <https://doi.org/10.1029/JC074i018p04487>.
- [12] J. Saastamoinen, Contributions to the theory of atmospheric refraction. Bulletin Géodésique (1946-

- 1975), 105(1), 279-298, 1972. <https://doi.org/10.1007/BF02521844>.
- [13] H. D. Black, An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B4), 1825-1828, 1978. <https://doi.org/10.1029/JB083iB04p01825>.
- [14] J. Liu, X. Chen, J. Sun and Q. Liu, An analysis of GPT2/GPT2w+Saastamoinen models for estimating zenith tropospheric delay over Asian area. *Advances in Space Research*, 59(3), 824-832, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.09.019>.
- [15] R. Leandro, M. Santos and R. Langley, UNB neutral atmosphere models: development and performance. In *Proceedings of the 2006 national technical meeting of the institute of navigation*, pp. 564-573, 2006.
- [16] S. Serrano-Vincenti, T. Condom, L. Campozano, J. Guamán and M. Villacís, An empirical model for rainfall maximums conditioned to tropospheric water vapor over the Eastern Pacific Ocean. *Frontiers in Earth Science*, 8, 198, 2020. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00198>.
- [17] S. Li, T. Xu, Y. Xu, N. Jiang and L. Bastos, Forecasting GNSS Zenith Troposphere Delay by Improving GPT3 Model with Machine Learning in Antarctica. *Atmosphere*, 13(1), 78, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010078>.
- [18] T. Hadas, F. N. Teferle, K. Kazmierski, P. Hordyniec and J. Bosy, Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time. *GPS solutions*, 21(3), 1069-1081, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0595-0>.
- [19] M. Ding, A neural network model for predicting weighted mean temperature. *Journal of Geodesy*, 92(10), 1187-1198, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1114-6>.
- [20] M. Łoś, K. Smolak, G. Guerova and W. Rohm, GNSS-based machine learning storm nowcasting. *Remote Sensing*, 12(16), 2536, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12162536>.
- [21] S. Manandhar, Y. H. Lee, Y. S. Meng, F. Yuan and J. T. Ong, GPS-derived PWV for rainfall nowcasting in tropical region. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 56(8), 4835-4844, 2018. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2839899>.
- [22] M. O. Selbesoğlu, *Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) Gözlemlerinden Elde Edilen Islak Troposfer Gecikmesinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [23] J. Deng, M. Xu, X. Yu and A. Zhang, Interpolation estimation method of tropospheric delay for long baseline network RTK based on support vector machine. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 192, No. 1, p. 012069. IOP Publishing, 2018. DOI: [10.1088/1755-1315/192/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/192/1/012069).
- [24] L. Miotti, E. Shehaj, A. Geiger, S. D'Aronco, J. D. Wegner, G. Moeller and M. Rothacher, Tropospheric delays derived from ground meteorological parameters: comparison between machine learning and empirical model approaches. In *2020 European Navigation Conference (ENC)*. pp. 1-10, IEEE, 2020.
- [25] M. Palaniswami and A. Shilton, Adaptive support vector machines for regression. In *Proceedings of the 9th International Conference on Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02. Vol. 2*, pp. 1043-1049, IEEE, 2002.
- [26] V. Kecman, *Learning and soft computing: support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models*. MIT press, 2001.
- [27] A. Mathur and G. M. Foody, Multiclass and binary SVM classification: Implications for training and classification users. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 5(2), 241-245, 2008. DOI: [10.1109/LGRS.2008.915597](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.915597).
- [28] R. Debnath and H. Takahashi, Kernel selection for the support vector machine. *IEICE transactions on information and systems*, 87(12), 2903-2904, 2004.
- [29] A. E. Hoerl and R. W. Kennard, Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 12(1), 55-67, 1970.
- [30] R. R. Wilcox, Multicollinearity and ridge regression: results on type I errors, power and heteroscedasticity. *Journal of Applied Statistics*, 46(5), 946-957, 2019. <https://doi.org/10.1080/02664763.2018.1526891>.
- [31] G. James, D. Witten, T. Hastie and R. Tibshirani, *Resampling methods*. In *An introduction to statistical learning* (pp. 175-201). Springer, New York, NY, 2013. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7_5).
- [32] J. Al-Jararha, New approaches for choosing the ridge parameters. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 47(6), 1625-1633, 2016.
- [33] J. Friedman, T. Hastie and R. Tibshirani, Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent. *Journal of statistical software*, 33(1), 1, 2010.
- [34] H. Zou and T. Hastie, Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the royal statistical society: series B (statistical methodology)*, 67(2), 301-320, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.
- [35] R. J. Tibshirani, The lasso problem and uniqueness. *Electronic Journal of statistics*, 7, 1456-1490, 2013. DOI: [10.1214/13-EJS815](https://doi.org/10.1214/13-EJS815).
- [36] S. Aslan ve T. Yıldız, Makine Öğrenmesinde Rastgele Oran ve Sıralı Küme Örnekleme Yöntemlerinin Doğrusal Regresyon Modellerine Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 29-36, 2022. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247004>.







# Otonom araçlarda çoklu GNSS uydu sistemleri kullanımının konum doğruluğuna etkisinin araştırılması

## Investigation of the effect of multiple GNSS satellite systems usage on position accuracy in automated vehicles

Ahmet Can Uçarlı<sup>1</sup> , Veli İlçi<sup>2,\*</sup> , Kerem Par<sup>3</sup> , Ali Ufuk Peker<sup>4</sup> 

<sup>1,2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun, Türkiye

<sup>3,4</sup>Okan Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 34959, İstanbul, Türkiye

### Öz

Otonom araçlar günümüzde son teknoloji ürünlerin kullanıldığı, hızla gelişen çalışma alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Hemen hemen bütün araç firmalarının yanı sıra Google, Uber, Apple, Nvidia ve Huawei gibi uluslararası firmalar da ar-ge çalışmalarını kapsamında otonom araç teknolojilerine büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Otonom araçların en önemli bileşenlerinden biri de şehir içi gibi zorlu alanlar da dâhil aracın konumunun olabildiğince doğru ve güvenilir olarak belirlenmesidir. Bu çalışmada hareket halindeki 4. Seviye bir otonom aracın konumunun belirlenmesinde GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydu sistemlerinin etkisi araştırılmıştır. PPP tekniği kullanılarak elde edilen araç konumunun belirlenmesi için 4 farklı uydu sisteminin 8 farklı kombinasyonla performansları değerlendirilmiştir. Tüm uydu sistemleri verileri kullanılarak elde edilen çözümün en yüksek doğruluğa ulaşmada etkili olduğu bu çalışmada özellikle GALILEO sisteminin çözüme olumlu katkısı olduğu belirlenmiştir. Eksik çözüm zamanları yönünden değerlendirme yapıldığında da GPS+GALILEO çözümünün kesintisiz konum bilgisi elde etmede önemli başarı sağlayabildiği görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Otonom araçlar, GNSS konum belirleme, GPS, GLONASS, Galileo, Beidou

### 1 Giriş

Otonom araçlarda temel amaç aracın çevresini algılayabilmesi ve güvenle seyahatini sürdürebilmesidir. Bu araçlar ihtiyaç duydukları insan desteği ve geliştirilen sistemlere göre Seviye-0 (otomasyon-yok), Seviye-1 (sürücü yardımı), Seviye-2 (kısmi otomasyon), Seviye-3 (koşullu otomasyon), Seviye-4 (yüksek otomasyon) ve Seviye-5 (tam otomasyon) olmak üzere toplam altı sınıfa ayrılmaktadır [1]. Yakın gelecekte kullanılması planlanan bu son teknoloji sistemler için Amerika, Avrupa Birliği, İngiltere ve Japonya gibi ülkeler başta olmak üzere yasal altyapının oluşturulması çalışmaları sürdürülmektedir. Veri depolama, robotik kontrol sistemleri, güç kullanımı, veri işleme, yazılım, algılayıcı sensörler (kamera, lidar, radar, ultrasonik vb.) ve konum belirleme sistemleri otonom araç teknolojilerinin temel bileşenleridir. Otonom aracın güvenli şekilde seyahatini devam ettirebilmesi için öncelikle kendi

### Abstract

Automated vehicles stand out as one of the rapidly developing fields where cutting-edge technology products are used today. Almost all vehicle companies and international companies such as Google, Uber, Apple, Nvidia, and Huawei make significant investments in autonomous vehicle technologies as part of their R&D studies. One of the essential components of autonomous vehicles is to determine the vehicle's position as accurately and reliably as possible, including in challenging areas such as urban areas. In this study, the effect of GPS, GLONASS, GALILEO and BEIDOU satellite systems in determining the position of a Level 4 autonomous vehicle in motion was investigated. In order to determine the vehicle position obtained using the PPP technique, the performances of 4 different satellite systems with eight different combinations were evaluated. This study determined that the solution obtained by using all satellite system data was effective in achieving the highest accuracy, and especially the GALILEO system contributed positively to the solution. When evaluated in terms of missing data spans, it is seen that the GPS+GALILEO solution can achieve significant success in obtaining uninterrupted location information.

**Keywords:** Automated vehicles, GNSS positioning, GPS, GLONASS, Galileo, Beidou

konumunu küresel bir koordinat sisteminde yüksek doğrulukla belirleyebilmesi gerekmektedir. Araç genellikle hafızasında daha önceden oluşturulmuş olan yüksek doğruluklu ve 3-boyutlu mobil harita üzerinde konumunu belirler ve çevresindeki yollar, binalar vb. taşınmazlara göre kendini konumlandırmış olur. Sonrasında ise sahip olduğu algılama ve görüntüleme sensör verilerini de kullanarak hareketli cisimlerin durumuna göre karar mekanizmalarını kullanır ve güvenli şekilde seyahatini sürdürmeyi amaçlar.

Otonom araçlar diğer tüm araçlar gibi tüneller, şehir içi güzergâhlar vb. uydu sinyallerinin kısmen veya tamamen kesilmesine neden olan zorlu ortamlarda seyahat etme durumunda olabilirler. Güvenli seyahat koşulunu sağlayabilmeleri için araçların tüm zorlu ortamlarda doğru ve güvenilir konum bilgisini elde etmeleri gerekmektedir. Gerçek-zamanlı kinematik (RTK) tekniği günümüzde

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: veli.ilci@omu.edu.tr (V. İlçi)

Geliş / Received: 03.03.2022 Kabul / Accepted: 18.04.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1082124

yaygın olarak kullanılan GNSS ölçüm tekniklerinden biridir [2]. Bu teknik bilinen bir noktaya kurulan bir referans alıcı ve bir gezici alıcı olmak üzere en az iki GNSS alıcısının kullanıldığı ve cm doğrulukla konum belirlendiği tekniktir [3], [4]. Referans istasyonundan radyo dalgaları aracılığıyla gönderilen düzeltme bilgileri ile gezici kendi konumunu belirlemektedir. Bu yöntemde referans ile gezen alıcı arasındaki başlangıçta en az 5 ve sonrasında en az 4 ortak uydular izlenebilmelidir [5]. RTK yönteminin doğruluğu atmosferik hatalar ve yörünge hatası sebebiyle referans ve gezen alıcılar arasındaki mesafeye bağımlı olarak azalmakta ve bu sebeple uygulama mesafesi 10-20 km ile sınırlı olmaktadır [6]–[8]. RTK tekniğindeki mesafeye bağımlılığı ortadan kaldıran ağ-RTK tekniği de günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [9], [10]. Özellikle kurumlar ve bazı özel kuruluşlar tarafından kurulan referans istasyonları ağı yardımıyla ağ içerisinde kalan tüm bölgelerde cm-doğrulukla konum bilgisi elde etmek mümkün olmaktadır. Ağ-RTK yönteminde kontrol merkezinden gezen alıcılara veri iletimi GSM üzerinden sağlanmaktadır. Bu sebeple ağ-RTK tekniği GSM hattının çalışmadığı yerlerde kullanılamamaktadır [11], [12]. Tek bir GNSS alıcısı ile yüksek doğruluklu konum bilgisi sağlayan Ağ-RTK tekniğinde sistem kurulum maliyetinin yüksek olması da diğer bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır [2]. RTK ve Ağ-RTK tekniklerinin yukarıda bahsedilen dezavantajlarının yanı sıra küresel bir çözüm de sunamaları sebebiyle otonom araç teknolojilerinde kullanımları sınırlı seviyede olabilmektedir.

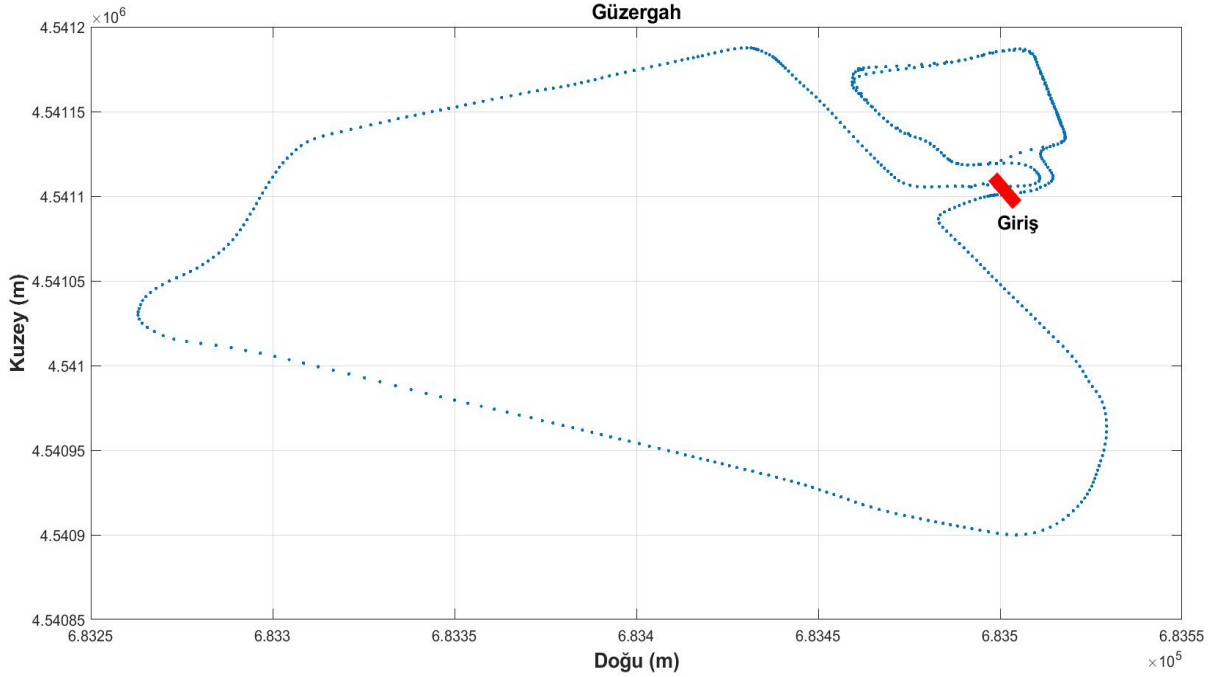
Günümüzde kullanımı hızla artan gerçek zamanlı konum belirleme tekniklerinden bir diğeri ise hassas nokta konumlama (PPP) tekniğidir. Herhangi bir referans istasyon kurulumuna ihtiyaç duyulmayan PPP tekniğinin düşük maliyetli olması ve yüksek doğruluk sağlaması sebebiyle son yıllarda kullanımı hızla artmaktadır [13], [14]. Bu tekniğin kullanımı başta International GNSS Service (IGS) olmak üzere GNSS uydularından gelen verileri web üzerinden yayınlayan servisler ve dünya üzerinde dağınık olarak yerleştirilen referans istasyonları verileri kullanılarak mümkün olabilmektedir [15]. Tüm uydular ve yer istasyon verileri yenilikçi algoritmalar ile değerlendirilmekte ve üretilen düzeltme bilgileri gezen alıcılara iletilerek real-time/gerçek-zamanlı PPP (RT-PPP) veya post-process PPP (PP-PPP) çözüm elde edilmesi sağlanmaktadır. PP-PPP çözümü akademik ve ticari yazılımlar kullanılarak elde edilebildiği gibi bazı CSRS-PPP, MAGIC-GNSS, AUSPOS, OPUS, Trimble RTX, GAPS, APPS ve SCOUT gibi online-PPP servisleri kullanılarak da elde edilebilmektedir [16], [17]. IGS-RT servisinin gerçek zamanlı olarak uyduların yörünge ve uyduların saat bilgilerini sunması PPP çözümünün gerçek zamanlı olarak elde edilebilmesine olanak sağlamış ve böylece RTKLIB/RTKNAVI, PPP-WIZARD ve BKG/BNC gibi yazılımlar RT-PPP çözümlerini kullanıcılarının hizmetine sunmuşlardır [3], [18]. Ayrıca TerraStar, Trimble RTX, StarFire, ATLAS vb. servisler aracılığıyla L-band sinyallerini alma kabiliyetine sahip GNSS alıcıları kullanılarak RT-PPP çözüm elde edilebilmektedir. RT-PPP çözümlerinin kullanımını sınırlayan en önemli kısıt ise ölçüme başladıktan sonra istenilen doğruluk değerlerine

ulaşmak için gerek duyulan yakınsama süresidir [19]. Ancak her geçen gün iyileştirilen PPP tekniğinde bu süre giderek azalmakta ve böylece tekniğin kullanımı otonom araçlar vb. uygulamalarda artmaktadır.

PPP tekniği bir GNSS alıcısıyla toplanan kod ve faz ölçümleri kullanılarak konum belirlemeye olanak sağlayan yenilikçi bir tekniktir [20]. Bu teknik ile statik veya kinematik olarak toplanan veriler kullanılarak GNSS alıcısının 3-boyutlu konumu cm-dm doğruluğunda ve küresel bir koordinat sisteminde belirlenmektedir [21]. PPP çözümü elde edebilmek için IGS vb. servislerin farklı doğruluk seviyelerinde web üzerinden yayınladığı uyduların yörünge bilgileri, uyduların saat düzeltmeleri ve kod-faz sapma değerleri de kullanılmaktadır. Bu veriler kullanılarak anten faz kayıklıkları ve faz dönmesi, okyanus yüklemesi ve Sagnac etkisi, troposferik ve iyonosferik hatalar, kutup ve katı yeryuvarı gelgiti, gibi hata kaynakları giderilerek konum doğrulukları artırılır [22].

Günümüzde Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen GPS, Rusya tarafından geliştirilen GLONASS ve Çin tarafından geliştirilen BEIDOU sistemleri temelde askeri kullanımlar için geliştirilmiş ve geliştiren ülkeye bağlı sistemlerdir. Her ne kadar bu sistemler sivil kullanımlara açık olsa da sistem sahibi ülkeler uygun gördükleri durumlarda tüm veri akışını kesme haklarını kullanabilirler. Ayrıca sivil kullanımlar söz konusu olduğunda ise bu sistemlerde Seçmeli Erişilebilirlik (SA) adı verilen doğruluğu düşürücü kısıtlamalarla karşılaşmaktadır [23]. Avrupa Birliği ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen GALILEO uydularından oluşan navigasyon sistemi ise tamamen sivil kullanıma yönelik olarak geliştirilmiştir. GNSS ile konum belirleme amacıyla kullanılan donanım ve yazılımların hemen tamamında temel bileşen olarak GPS sistem verileri kullanılmaktadır. Ancak GPS sisteminin şehir içi ve ormanlık alanlar, açık maden işletmeleri vb. zorlu alanlarda görülen uyduların sayısının yeterli olmaması veya uygun uyduların geometrisinin oluşmaması durumlarında istenilen konum doğrulukları ya hiç sağlanamamakta veya düşük doğrulukla sağlanabilmektedir. Bu sorunu gidermek amacıyla son yıllarda çoklu uydular sistem çözümleri pek çok akademik çalışmanın yanı sıra ticari çalışmalarda da kullanılmaktadır. Birden çok uydular sistem verilerinin birlikte kullanılmasıyla Global Navigation Satellite Systems-Küresel Navigasyon Uydular Sistemleri (GNSS) kavramı ortaya çıkmıştır. Son yıllarda GNSS alıcılarının yanı sıra post-process ve online yazılımlar da çoklu uydular sistem verilerini konum belirleme çözümlerine dahil etmektedirler. Günümüzde 31 GPS, 25 GLONASS, 31 BEIDOU ve 26 GALILEO uydularından oluşan konum belirleme amacıyla kullanılabilir durumdadır [24]. Konum belirleme çalışmalarında çoklu uydular sistem verileri çözüme dahil edilerek zorlu ölçme koşullarında dahi kesintisiz ve yüksek doğrulukla konum bilgisi elde edilebilmektedir [24].

Bu çalışmada 4. seviye otonom aracın konumunun belirlenmesine farklı uydular sistem kombinasyonlarının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla GPS, GPS+GLONASS, GPS+GALILEO, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olmak üzere



Şekil 1. Çalışma alanı

8 farklı uydu kombinasyon verileri post-process çözüm ile PPP tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlar uydu sayısı, konum duyarlılık kaybı (PDOP), eksik çözüm verisi, yatay ve düşey konum doğrulukları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Çalışma alanı

Çalışma İstanbul Anadolu yakasında yaklaşık 1,350 metre uzunluğundaki şehir içi güzergâhta gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Güzergâh boyunca uydu verilerinin toplanmasını kısmen engelleyici ağaçlık ve binaların yoğun olduğu bölgeler bulunmaktadır. Özellikle Şekil 1 üzerinde kırmızı ile gösterilen alanda sinyallerin tamamen kesilmesine sebep olan, yolun üzerini tamamen örten güvenlik girişi bulunmaktadır.



Şekil 2. 4. Seviye otonom araç

### 2.2 Veri toplama ve değerlendirme

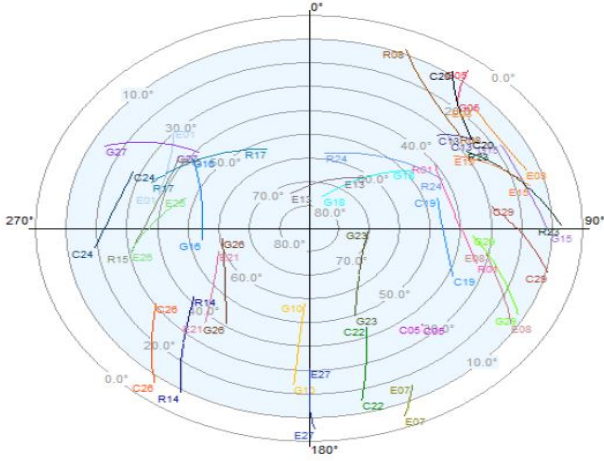
Çalışmada veri toplama amacıyla 4. Seviye bir otonom araç olan bir Toyota Corolla marka araç kullanılmıştır (Şekil

2). Uygulama 04.08.2021 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Araç üzerinde bir adet NovAtel PWRPak7 sistemi ve içerisinde OEM7 alıcı ve 2 adet VEXXIS GNSS-502 antenler bulunmaktadır. GNSS sistemi GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sinyallerini toplayabilecek kapasitededir. Uygulamada öncelikle araç statik konumda bir süre veri topladıktan sonra güzergâh üzerinde yaklaşık 20 km/saat hızla hareket etmiş, güzergâh bitiminde başladığı bölgeye gelmiş ve yine bir süre statik konumda veri toplamaya devam ettikten sonra uygulama sonlandırılmıştır. Güzergâh boyunca 1 sn. veri toplama aralığında ve 10° uydu yükseklik açısında tüm uydu verileri toplanmıştır.

Araçın uygulama boyunca konumunun belirlenmesi amacıyla Inertial Explorer post-process yazılımı kullanılmıştır [25]. Bu yazılım çok frekanslı GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sistemleri verilerini çözebilme yeteneğine sahiptir. Çözüm ise Post-Process-PPP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çözümde kullanılan bazı parametreler Tablo 1'de verilmektedir. Çoklu uydu sistemlerinin çözüme etkisinin belirlenmesi amacıyla GPS, GPS+GLONASS, GPS+GALILEO, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olmak üzere 8 farklı veri setiyle çözümler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Bazı process parametreleri

Processing Method	PPP
Processing Direction	Multi-Pass
Profile	GNSS Ground Vehicle
Datum	WGS84
Processing Interval	1 sec.
Elevation Mask	10 degree
Precise Files	SP3 and Clock



Şekil 3. Uydu görünürlük grafiği

### 3 Bulgular

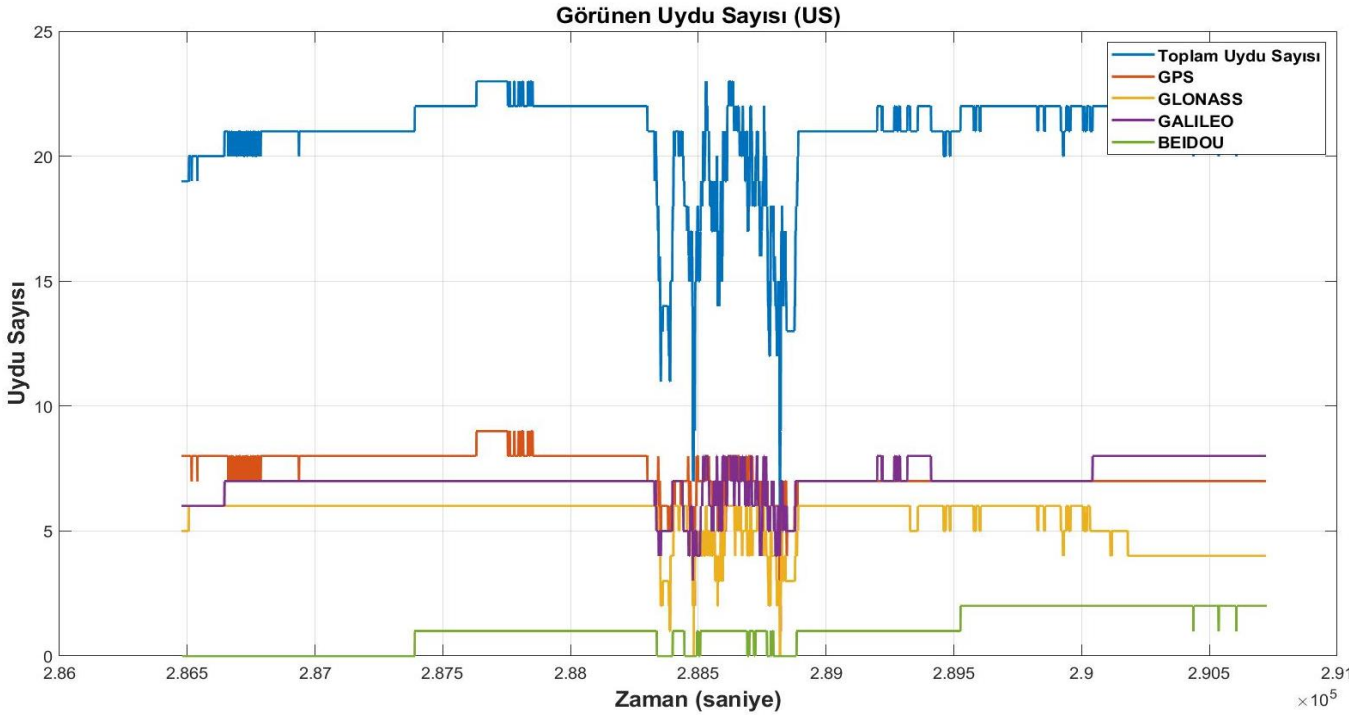
#### 3.1 Uydu sayısı ve duyarlılık kaybı

GNSS ölçümleri sırasında gözlenen uydu sayısı ve uydu geometrisi hangi teknik kullanılırsa kullanılsın elde edilecek doğrulukta etkili olan parametrelerdir (Mutlu & Kahveci, 2019). Gözlenen uydu sayısı GNSS ölçme tekniklerinin gerektirdiği minimum uydu sayısı koşulunu sağlamada önem arz etmektedir. Duyarlılık kaybı olarak adlandırılan DOP (Dilution of Precision) değeri ise uydu geometrisine bağlı olarak elde edilecek doğruluk olarak tanımlanmaktadır. Düşük DOP değeri uydu dağılımının uygun olduğunu gösterirken yüksek DOP değeri ise uydu dağılımının zayıf olduğunu göstermektedir [5]. Farklı uygulamalar için 5 ayrı DOP değeri kullanılabilir. GDOP (Geometric Dilution of Precision) gözlenen uydu geometrisinin elde

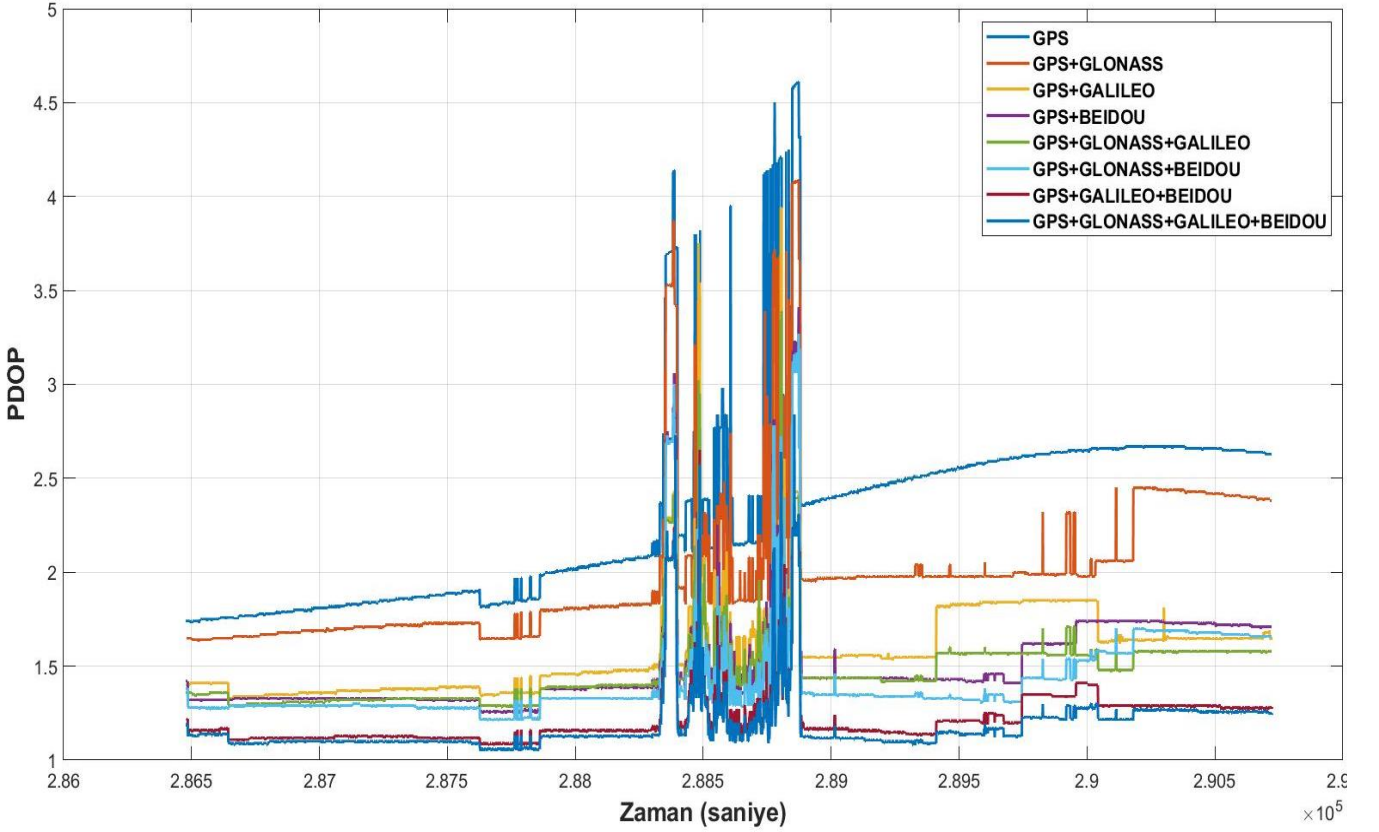
edilecek koordinat ve zaman verilerine etkisini, PDOP (Position Dilution of Precision) yatay ve düşey koordinat verilerine etkisini, HDOP (Horizontal Dilution of Precision) yatay koordinatlar üzerine etkisini, VDOP (Vertical Dilution of Precision) nokta yükseklikleri üzerine etkisini ve TDOP (Time Dilution of Precision) zaman bilgisine etkisini göstermektedir [5]. DOP değerinin 1'den küçük olması ideal, 1-2'den büyük olması mükemmel, 2-5 aralığında olması ise iyi olarak değerlendirilmektedir [26]. 10'dan büyük DOP değerleri ise kullanılmamalıdır.

Çalışmada kullanılan GNSS alıcı ve anten sistemleri ile GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydu sinyallerinin alındığı ve izlenebildiği görülmektedir. Şekil 3'de uydu görünürlük grafiği, Şekil 4'de ise çalışma süresince gözlenen uydu sayıları görülmektedir. Gözlenen toplam uydu sayısının açık alanlarda 20 ve üzerinde sayılara ulaştığı, güzergâh boyunca ise engellerin durumuna göre 6'ya kadar düştüğü görülmektedir. Gözlenen uydu sayıları kullanılan uydu sistemine göre sıralandığında ise GPS, GALILEO, GLONASS ve BEIDOU şeklinde olduğu görülmektedir. Özellikle GALILEO uydularının GPS uydularına oldukça yakın oranda gözlenebildiği ise dikkate alınması gereken bir durumdur. Ayrıca BEIDOU uydularının ise 0-2 aralığında değiştiği de dikkat çekmektedir.

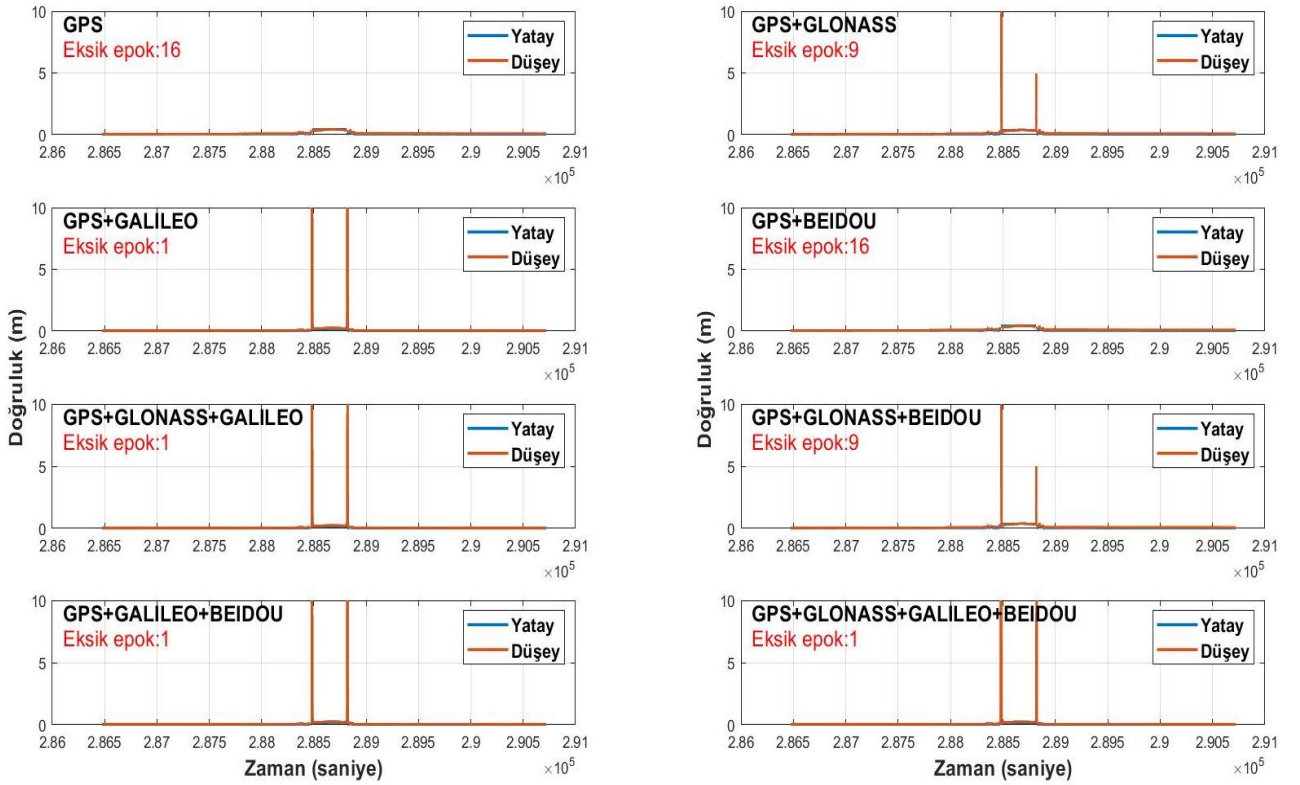
Şekil 5'de çalışma süresince elde edilen konumsal duyarlılık kaybı (PDOP) verileri görülmektedir. PDOP değerlerinin uydu sayısının değişimine paralel değişiklikler gösterdiği görülmektedir. Şekilde yalnızca GPS verilerinin kullanılmasının en yüksek PDOP değerlerini verdiği, tüm uydu sistemlerinin birlikte kullanılmasının ise en düşük PDOP değerlerinin elde edilmesini sağladığı görülmektedir.



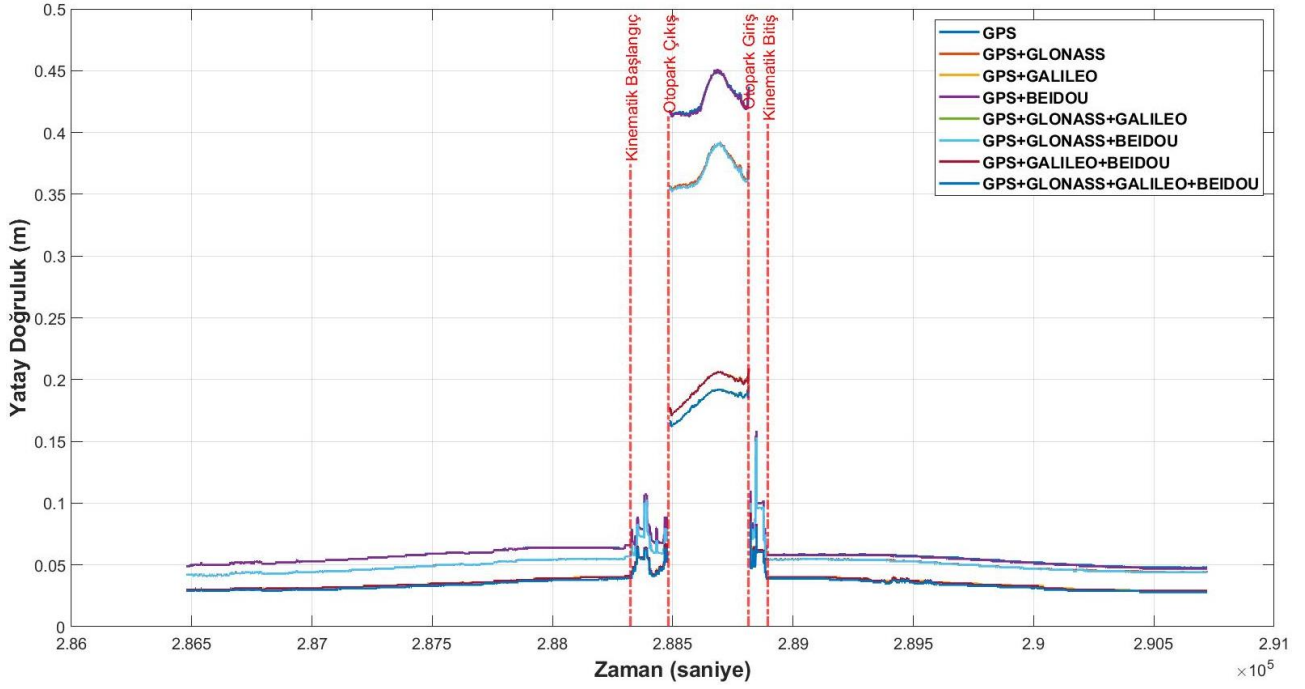
Şekil 4. Gözlenen uydu sayısı



Şekil 5. Konumsal uydu duyarlık kaybı (PDOP) grafiği



Şekil 6. Yatay ve düşey konum doğrulukları



Şekil 7. Yatay konum doğrulukları

### 3.2 Konum ve yükseklik doğruluğu

Yüksek doğruluklu ve güvenilir konum bilgisi otonom bir aracın güvenli şekilde seyahatini sürdürebilmesi için bir zorunluluktur. Şekil 6'da farklı uydu kombinasyonları kullanılarak güzergâh boyunca elde edilen yatay ve düşey konum doğrulukları görülmektedir. Ayrıca kullanılan uydu sistemleri ve çalışma süresince çözüm sağlanamayan epoklar da şekillerin sol-üst bölümünde verilmiştir. GPS ve GPS+BEIDOU çözümlerde 16'şar, GPS+GLONASS ve GPS+GLONASS+BEIDOU'da 9'ar, diğerlerinde ise sadece 1'er epokta çözüm elde edilemediği görülmektedir. Söz konusu çözüm sağlanamayan anların tamamının Şekil 1'deki kırmızı ile işaretli bölgeden kaynaklandığı tespit edilmiştir. GPS ve GPS+BEIDOU çözümlerde eksik olan sonuç anlarında diğer uydu kombinasyonlarında çözüm elde edilmiş olsa da elde edilen çözümlerin 10m civarında hata içerdiği görülmektedir. Uydu kombinasyonlarında elde edilecek konum doğruluklarının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi adına eksik epokların tüm kombinasyonlardan çıkarılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Şekil 7'de eksik epoklar çıkarıldıktan sonra elde edilen yatay konum doğrulukları görülmektedir. Burada çözümler en büyük hataya sahipten en az hataya sahip doğru GPS, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olarak sıralanmaktadır.

Şekil 8'de ise eksik epoklar çıkarıldıktan sonra elde edilen düşey konum doğrulukları görülmektedir. Burada yine yatay doğruluklar ile paralel olarak en büyük hataya sahipten en az hataya sahip doğru çözümler GPS, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS, GPS+GLONASS+BEIDOU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU olarak sıralanmaktadır.

OU, GPS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU, GPS+GLONASS+GALILEO ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU şeklinde sıralanmaktadır.

Şekil 7 ve Şekil 8'de statik konumda iken GNSS gözlemlerine başlanan bu uygulamada aracın harekete başladığı ve güzergâh tamamlandıktan sonra hareketini tamamladığı süreler kırmızı dikey kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 1'de de kırmızı ile gösterilen ve GNSS sinyallerinin tamamen kesildiği bölgeden geçiş zamanları da yine Şekil 7 ve Şekil 8'de kırmızı dikey çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de kinematik başlangıç ve kinematik bitiş olarak gösterilen süreler arasında ait istatistiki bilgiler Tablo 3'de verilirken, bu süreler dışında kalan yani araç statik konumda iken elde edilen sonuçlara ait istatistiki bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.

Statik kısma ait elde edilen veriler değerlendirildiğinde GALILEO sistemi GPS sistemine destek olarak çözüme dahil edildiğinde hem GLONASS hem de BEIDOU uydu sistemlerine kıyasla yatay ve düşey bileşenlerde çok daha yüksek doğruluklar elde edilmesini sağladığı görülmektedir. GPS ve GLONASS verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 5 cm yatay ve 8.1 cm düşey konum doğrulukları elde edilirken, GPS ve BEIDOU verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 5.7 cm yatay ve 8.6 cm düşey doğruluklar elde edilmiş, GPS ve GALILEO verilerinin dahil edildiği çözümde ise önemli bir iyileştirme sağlanarak 3.5 cm yatay ve 5.5 cm düşey doğruluk elde edilmiştir. Diğer bir deyişle sadece GPS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla GPS ve BEIDOU verileri kullanılarak bir iyileşme sağlanamamış, GPS ve GLONASS verileri kullanılarak yatayda %12, düşeyde ise %6, GPS ve GALILEO verileri kullanılarak ise yatayda %38, düşeyde ise %36 oranında iyileşme sağlanabilmiştir. Üçlü uydu kombinasyonlarında da sırasıyla GALILEO, GLONASS ve

BEIDOU uydu verilerinin yer aldığı sonuçların daha yüksek doğrulukla elde edilebildiği görülmektedir. En yüksek doğruluklar ise tüm uydu verilerinin çözüme dahil edildiği dörtlü kombinasyonla elde edilebildiği görülmektedir. Dörtlü kombinasyon ile yatayda 3.4 cm, düşeyde ise 5.3 cm doğruluklarla konum bilgisi elde edildiği görülmektedir.

Kinematik kısma ait elde edilen veriler değerlendirildiğinde statik kısım sonuçlarına benzer şekilde GALILEO sistemi GPS sistemine destek olarak çözüme dahil edildiğinde diğer uydu sistemlerine oranla hem yatay hem de düşey bileşenlerde daha yüksek doğruluklar elde edilmesini sağladığı görülmektedir. GPS ve GLONASS verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 34.1 cm yatay ve 34.2 cm düşey konum doğrulukları elde edilirken, GPS ve BEIDOU verilerinin dahil edildiği çözümde ortalama 39.4 cm yatay ve 37.7 cm düşey doğruluklar elde edilmiş, GPS ve GALILEO verilerinin dahil edildiği çözümde ise önemli bir iyileştirme sağlanarak 18.1 cm yatay ve 22.7 cm ise düşey doğruluk elde edilmiştir. Kinematik verilerde GPS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlara kıyasla GPS ve BEIDOU verileri kullanılarak yem yatayda hem de düşeyde mm seviyesinde bir iyileşme bir iyileşme sağlanırken, GPS ve GLONASS verileri kullanılarak yatayda %14, düşeyde ise %10 iyileşme sağlanmış, GPS ve GALILEO verileri kullanılarak ise yatayda %54, düşeyde ise %41 oranında oldukça yüksek seviyede iyileşme sağlanabilmiştir. Yine statik sonuçlarla uyumlu şekilde üçlü uydu kombinasyonlarında da sırasıyla GALILEO, GLONASS ve BEIDOU uydu verilerinin yer aldığı sonuçların daha yüksek doğrulukla elde edilebildiği görülmekte ve en yüksek doğruluklar ise tüm uydu verilerinin çözüme dahil edildiği dörtlü kombinasyonla elde edilebildiği görülmektedir. Dörtlü kombinasyon ile yatayda 17 cm, düşeyde ise 21.7 cm doğruluklarla konum bilgisi elde edildiği görülmektedir.

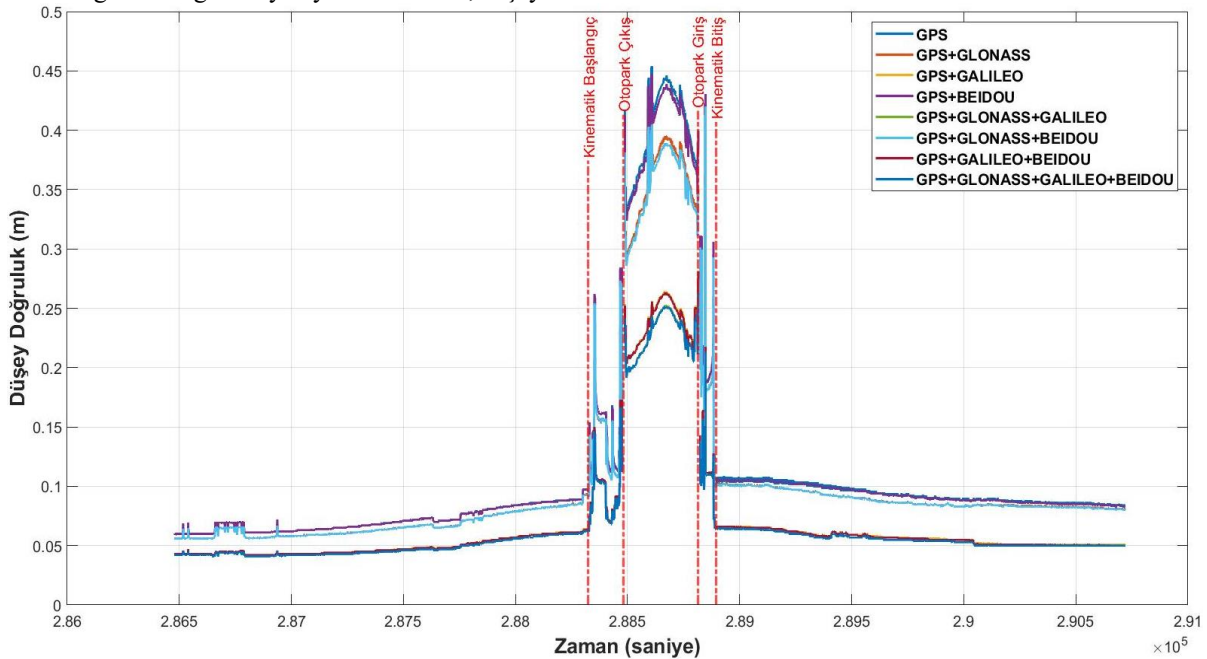
Avrupa GNSS Ajansı (GSA) [27] tarafından 2018 yılında yayınlanan raporda otonom araçlar için emniyet açısından kritik konum doğruluk değerleri yatayda 20 cm'den, düşeyde

ise 2 m'den daha düşük olarak verilmiştir. Kinematik veriler incelendiğinde GSA tarafından verilen standartlara GPS+GALILEO, GPS+GLONASS+GALILEO, GPS+GALILEO+BEIDOU ve GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU gibi çoklu uydu sistemlerinin kullanımıyla ulaşılabildiği görülmektedir. Diğer bir deyişle GSA tarafından verilen standartlara çoklu uydu sistem verilerinin kullanımıyla ulaşılabileceği açıkça görülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Otonom araçların yakın gelecekte hayatımızın önemli bir parçası olması beklenmektedir. Bu çalışmada otonom araçların en önemli bileşenlerinden biri olan konum ve yükseklik doğruluğuna farklı GNSS sistemlerinin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki çoklu GNSS sistemleri özellikle zorlu çevresel koşullarda dahi kesintisiz ve yüksek konum ve yükseklik doğrulukları elde etmede önemli bir etken oluşturmaktadır. Özellikle son on yılda yörüngedeki uydu sayısını önemli ölçüde artıran ve küresel anlamda çözüm sağlayabilme kapasitesine ulaşan GALILEO uydu sisteminin çözüme önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Aracın hareket halinde olduğu zaman aralığında Uluslararası kuruluşlar tarafından belirlenen standartlara sadece GALILEO sisteminin dahil edildiği çözümlerde erişilebildiği, GPS, GPS+GLONASS, GPS+BEIDOU ve GPS+GLONASS+BEIDOU çözümlerinde ise erişilemediği görülmektedir.

Günümüzde GNSS firmalarının hemen tamamı GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU ve QZSS uydu sistemlerini destekleyen pek çok ticari ürün satışa sunmaktadır. Ancak TUSAGA-AKTİF sistemi gibi kullanıcılarına gerçek zamanlı ağ-RTK çözümleri sunan kamu veya özel kuruluşların çoğu sadece GPS ve GLONASS uydu sistemlerini çözümlerine dâhil etmektedirler.



Şekil 8. Düşey konum doğrulukları

**Tablo 2.** Statik kısma ait istatistiki bilgiler

Uydu Konfigürasyonu	Yatay Doğruluk (cm)				Düşey Doğruluk (cm)			
	min.	maks.	ort.	RMS	min.	maks.	ort.	RMS
GPS	4.7	15.8	5.7	5.7	5.9	43.0	8.6	8.9
GPS+GLONASS	4.1	15.3	5.0	5.1	5.5	42.0	8.1	8.4
GPS+GALILEO	2.9	8.3	3.5	3.6	4.2	21.7	5.5	5.6
GPS+BEIDOU	4.7	15.8	5.7	5.7	5.9	43.0	8.6	8.9
GPS+GLONASS+GALILEO	2.8	8.1	3.4	3.4	4.1	21.3	5.3	5.5
GPS+GLONASS+BEIDOU	4.1	15.3	5.0	5.1	5.5	42.0	8.1	8.4
GPS+GALILEO+BEIDOU	2.9	8.3	3.5	3.6	4.2	21.7	5.5	5.6
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	2.8	8.1	3.4	3.4	4.1	21.3	5.3	5.5

**Tablo 3.** Kinematik kısma ait istatistiki bilgiler

Uydu Konfigürasyonu	Yatay Doğruluk (cm)				Düşey Doğruluk (cm)			
	min.	maks.	ort.	RMS	min.	maks.	ort.	RMS
GPS	7.2	45.1	39.5	40.8	12.6	45.4	38.2	38.8
GPS+GLONASS	6.4	39.2	34.1	35.3	12.0	41.0	34.2	34.7
GPS+GALILEO	4.9	20.9	18.1	18.6	8.7	28.2	22.7	23.0
GPS+BEIDOU	7.2	45.1	39.4	40.7	12.5	44.7	37.7	38.2
GPS+GLONASS+GALILEO	4.7	19.5	17.0	17.4	8.6	26.3	21.8	22.1
GPS+GLONASS+BEIDOU	6.4	39.2	34.0	35.1	11.9	40.5	33.8	34.3
GPS+GALILEO+BEIDOU	4.9	20.9	18.1	18.5	8.7	28.1	22.6	23.0
GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU	4.7	19.4	17.0	17.4	8.6	26.3	21.7	22.0

Bu çalışma göstermiştir ki başta GALILEO uydu sistemi olmak üzere BEIDOU uydu sisteminin de çözüme dâhil edilmesi elde edilecek konum doğruluklarına önemli katkı sağlayacaktır. Ağ-RTK sisteminde söz konusu iyileştirmenin yapılması ile yakın gelecekte yollarda olması planlanan otonom araçlarda Ağ-RTK'dan üretilen konum bilgisinin kullanımı sağlanabilecektir. Böylece otonom araçlarda gibi her türlü çevresel koşulda yüksek doğrulukla ve güvenilir konum bilgisi ihtiyacı olan ürünlerin ihtiyacı da karşılanmış olacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. (Proje No. 3200327).

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %15

#### Kaynaklar

- [1] Society of Automotive Engineer (SAE), 2020. <https://www.sae.org/news/press-room/2018/12/sae-international-releases-updated-visual-chart-for-its-levels-of-driving-automation-standard-for-self-driving-vehicles> (Erişim: 28,02,2022).
- [2] B. Eissfeller, Real time kinematic and precise point positioning: status and trends. Ger. J., GPS, 87, 131–148, 2012.
- [3] S. Alçay and Ö. Atiz, Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi. Geomatik, 6(1), 77–83, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- [4] A. Pırtı and Z. Kurtulgu, Sürekli gözlem yapan

referans istasyonları (CORS (Sanal Referans istasyonu-lineer alan düzeltme tekniği)) kullanılarak yapılaşmış ve ağaçlık bölgelerdeki konum belirlemenin doğruluk analizi, Geomatik, 6(1), 1–14, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.646674>.

- [5] M. Kahveci and F. Yıldız, GPS/GNSS: Uydularla konum belirleme sistemleri: teori ve uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 2021.
- [6] Y. Feng and C. Rizos, Network-based geometry-free three carrier ambiguity resolution and phase bias calibration. GPS Solut., 13(1), 43–56, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10291-008-0098-8>.
- [7] D. Kim and R. B. Langley, Long-range single-baseline RTK for complementing network-based RTK. 20th Int. Tech. Meet. Satell. Div. Inst. Navig. 2007 ION GNSS 2007, 4, 639–650, 2007.
- [8] B. Li, Y. Feng, Y. Shen, and C. Wang, Geometry-specified troposphere decorrelation for subcentimeter real-time kinematic solutions over long baselines. J. Geophys. Res., 115, B11404, 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JB007549>.
- [9] K. Gümüş and M. G. Gümüş, Cors uygulamalarından elde edilen nokta konum doğrulukları üzerine istatistiksel araştırma. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., 7(3), 1159–1164, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502369>.
- [10] A. Martín, A. B. Anquela, A. Dimas-Pagés, and F. Cos-Gayón, Validation of performance of real-time kinematic PPP. A possible tool for deformation monitoring. Measurement, 69, 95–108, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.026>.
- [11] R. M. Alkan, İ. M. Ozulu, and V. İlçi, Web-based online data processing services as an alternative to conventional gnss processing software. Afyon



- Kocatepe Univ. J. Sci. Eng., 17(2), 603–619, 2017. <https://doi.org/10.5578/fmbd.57600>.
- [12] V. İlçi, Accuracy comparison of real-time GNSS positioning solutions: Case study of Mid-North Anatolia. *Measurement*, 142, 40–47, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.067>.
- [13] R. M. Alkan, V. İlçi, I. M. Ozulu, and M. H. Saka, A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas. *Measurement*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.012>.
- [14] S. İnyurt and M. Ulukavak, Web tabanlı GNSS Yazılımlarının (CSRS-PPP, Trimble-RTX) Performansının Araştırılması. *Geomatik*, 5(52495), 120–126, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.586990>.
- [15] V. İlçi, CenterPoint RTX Teknolojisinin Doğruluk ve Tekrarlına bilirliliğinin Araştırılması. *Geomatik*, 5(48883), 10–18, 2020, <https://doi.org/10.29128/geomatik.560026>.
- [16] E. G. Özdemir, Bağlı ve Mutlak (PPP) Konum Çözüm Yaklaşımı sunan Web-Tabanlı Çevrimiçi Veri Değerlendirme Servislerinin Farklı Gözlem Periyotlarındaki Performanslarının Araştırılması. *Geomatik*, 7(1), 41–51, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.809826>.
- [17] A. Pırtı and D. Yazıcı, Yazılımların doğruluk açısından incelenmesi. *Geomatik*, 7(2), 88–105, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.882843>.
- [18] S. Alçay, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP yönteminin konum belirleme performansının doğruluk ve hassasiyet bakımından incelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 8(1), 121–133, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516842>.
- [19] V. İlçi and A. U. Peker, The kinematic performance of real-time PPP services in challenging environment, *Measurement*, 189, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110434>.
- [20] C. İnal, B. Bilgen, and S. Bülbül, Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, 11(1), 109–115, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.996018>.
- [21] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, and F. H. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017, 1997. <https://doi.org/10.1029/96jb03860>.
- [22] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solut.*, 5(2), 12–28, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- [23] B. Koca and A. Ceylan, Uydu Konum Belirleme Sistemlerindeki (GNSS) Güncel Durum ve Son Gelişmeler. *Geomatik*, 3(1), 63–73, 2018. <https://doi.org/10.29128/geomatik.348331>.
- [24] İnt.Kayn.1, Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, 2022. <http://www.csno-tarc.cn/en/>. (Erişim: 28,02,2022).
- [25] İnt.Kayn.2, Inertial Explorer, 2022. <https://novatel.com/products/waypoint-post-processing-software/inertial-explorer>. (Erişim: 28,02,2022).
- [26] A. C. Uçarlı, F. Demir, S. Erol, and R. M. Alkan, Farklı GNSS Uydu Sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Tekniğinin Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Geomatik*, 6(3), 247–258, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.779420>.
- [27] European GNSS Agency (GSA), Report on Road User Needs and Requirements, 2018.





## Ankara / Mamak ilçesinde taşınmaz değer haritalarının bulanık mantık yöntemiyle irdelenmesi

### Examination of real estate value maps by fuzzy logic method in Ankara / Mamak district

Merve Girgenç<sup>1</sup>, Tansu Alkan<sup>2,\*</sup>, Süleyman Savaş Durduran<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya Türkiye

#### Öz

Taşınmaz değerlendirme, bir taşınmazın değerini etkileyen özelliklerinin dikkate alınarak piyasa koşullarına göre değer tahminin yapılmasıdır. Taşınmazın değeri belirlenirken taşınmaza ait yasal, konumsal, yapısal ve çevresel özellikler dikkate alınarak değerlemenin gerçekçi, doğru ve güvenilir bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, taşınmaz değerlerinin belirlenmesinde yapay zekâ tekniklerinden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Ankara ili Mamak ilçesine bağlı Akşemsettin, Durali Alıç ve Cengiz Mahalleleri çalışma alanı olarak belirlenmiştir. 300 adet konut taşınmazına ait özellikler ile piyasa değerleri elde edilmiş ve taşınmazın değerini etkileyen faktörler ile kurallar oluşturularak taşınmaz değerlendirme çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda bulanık mantık yöntemi kullanılarak elde edilen değerler ile piyasa değerlerinin %89.377 oranında örtüştüğü gözlemlenmiştir. Taşınmazların piyasa değerleri 99.000-925.000 TL aralığında değişirken bulanık mantık yöntemi ile elde edilen değerler 84.220-883.610 TL aralığında değişmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Bulanık mantık, Taşınmaz değerlendirme, Coğrafi bilgi sistemi, Taşınmaz değer haritası.

#### 1 Giriş

Değerleme kavramı, insanların sahip olduğu bir taşınmazın değerini öğrenmek isteği ile ortaya çıkan ve gün geçtikçe önemi artan bir alandır [1]. Ayrıca kentsel ve kırsal toprak düzenlemeleri, kamulaştırma, kentsel dönüşüm, devletleştirme, özelleştirme, vergilendirme, irtifak hakkı tesisi, tescile esas işlemler gibi kamusal uygulamalar ile sigortacılık, bankacılık, sermaye piyasası ve kredilendirme gibi özel ve bireysel uygulamalar için de taşınmaz değerlemeye ihtiyaç duyulmaktadır [2].

Taşınmaz değerlendirme çalışmalarında ilk olarak taşınmazın değerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi gerekir. Farklı özellikleri olan taşınmazların değerini etkileyen faktörler ve bu faktörlerin taşınmazı ne derecede etkiledikleri değişebilir [3]. Taşınmazın değerini; jeolojik ve topografik özellikleri, taşınmazın bulunduğu bölge içerisindeki imar koşulları, demografik yapısı, konumu, yapısal durumu, çevresel etkileri, emlak piyasası gibi faktörlerin yanı sıra ticari eğilimler, hükümetlerin mali politikaları, yüksek faiz, kredilendirme koşulları, enflasyon

#### Abstract

Real estate valuation estimates the value of a real estate according to market conditions, taking into account the features that affect its value. While determining the value of the real estate, the valuation should be done in a realistic, accurate and reliable way, taking into account the legal, locational, structural, and environmental characteristics of the real estate. In this study, the fuzzy logic method, one of the artificial intelligence techniques, was used to determine the real estate values. Akşemsettin, Durali Alıç, and Cengiz neighborhoods of Ankara province Mamak district were determined as the study area. The features and market values of 300 residential real estates were obtained and a real estate valuation study was carried out by establishing rules with the criteria affecting the real estate value. As a result of the study, it was observed that the values obtained by using the fuzzy logic method and the market values overlapped by 89.377%. While real estate market values vary between 99.000-925.000 TL, the values obtained by the fuzzy logic method vary between 84.220-883.610 TL.

**Keywords:** Fuzzy logic, Real estate valuation, Geographic information system, Real estate value map.

gibi ülkesel politikalar da etkilemektedir [4, 5]. Ayrıca rehin hakkı, irtifak hakkı gibi yasal kısıtlayıcılar; içme suyu, elektrik, doğalgaz, kanalizasyon hattı vb. teknik altyapı hizmetleri; sağlık kuruluşları, eğitim kuruluşları, resmi kurumlar, kültürel merkezler, yeşil alanlar, toplu taşıma noktaları, ibadethaneler, otoparklar gibi sosyal donatı alanlarına olan ulaşım olanakları gibi özellikler de taşınmazın değerini etkileyen faktörlerdir. Değerlemeye konu olan taşınmazın cinsi belirlenecek olan faktörleri de değiştirmektedir. Arsa ve arazi için ada içindeki konumu, geometrik şekli, cephe sayısı, eğimi gibi fiziksel faktörler etkili olurken konut için yaşı, oda sayısı, alanı, bulunduğu katı, cephesi, ısıtma sistemi gibi fiziksel faktörler etkili olmaktadır. Taşınmaz değerini etkileyen faktörlerin çok sayıda olması, yöreden yöreye çeşitlilik göstermesi ve mekâna, zamana ve kişiye bağlı olarak değişmesi taşınmazın değerinin kesin olarak belirlenememesine sebep olmaktadır.

Taşınmaz değerlendirme çalışmalarında geleneksel, istatistiksel ve modern olarak gruplandırılan birçok yöntem kullanılmaktadır [6]. Kesin bir model veya matematiksel

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tansualkan93@gmail.com (T. Alkan)

Geliş / Received: 23.03.2022 Kabul / Accepted: 20.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1092210

yöntemden bahsetmek mümkün değildir. Kullanılan yöntemlerin birbirlerinden farklı olması aynı taşınmazda ait farklı değerlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca ülkemizde taşınmaz değerlendirme ile ilgili birçok kanun, tüzük ve yönetmelik olmasına rağmen belirli bir yasal mevzuat yoktur. Almanya, Hollanda, İngiltere, İsviçre gibi ülkelerde taşınmaz değerlendirme alanı belirli bir sisteme oturtulmuş olsa da ülkemizde yasal mevzuatta boşluklar olması bu süreci zorlaştırmaktadır [7]. Bu kapsamda ülkemizde yapılan değerlendirme çalışmaları incelendiğinde bilimsellikten ve nesnellikten uzak, belirli bir yasal temeli olmayan, aynı taşınmaz için farklı kurum ve kuruluşlar tarafından farklı değerlemelerin yapıldığı ve belirlenen değerlerin piyasa koşullarındaki değerlerden farklılık gösterdiği tespit edilmiştir [5]. Bu durum taşınmaz değerlendirme işlemlerinde düzenleme yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Son yıllarda, taşınmaz değerlendirme çalışmalarında yapay sinir ağları, bulanık mantık, makine öğrenimi algoritmaları gibi yapay zekâ tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte bilimsel ve nesnel sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile taşınmazın konumuna bağlı verileri ve taşınmazla ilişkin yasal, çevresel ve teknik bilgileri elde etmek, analiz etmek, sorgulamak, görselleştirmek ve sunmak mümkündür. Taşınmaz değerlendirme uygulamalarında veri tabanı oluşturulması ve bu veri tabanında konumsal verilerin ağırlıklı olması taşınmaz değerlendirme için CBS'nin önemini ve rolünü arttırmaktadır. Taşınmaz değerlendirmede CBS'nin kullanılması ile taşınmaz değer haritaları üretilmektedir. Değer haritaları ile taşınmazlar ile ilgili analiz ve sorgulama, birim fiyat tespiti, yatırım yapılacak alanların seçimi gibi işlemleri hızlı ve kolay bir şekilde yapmak mümkündür.

Literatürde taşınmaz değerlendirmede bulanık mantık yönteminin kullanılması ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, Yalçır [8], doktora çalışmasında bulanık mantık yönteminin taşınmaz değerlendirmede kullanılabilirliğini araştırmıştır. Konya'da yapılaşmanın az olduğu ve çok olduğu iki farklı bölgeden veri elde edilmiş ve Mamdani ve Sugeno sistemlerine göre senaryolar üretilmiştir. Sonuç olarak Mamdani sisteminin en uygun araç olduğu tespit edilmiştir. Derinpinar [9], İstanbul ili Sarıyer ilçesi için yaptığı çalışmada nominal değerlendirme faktörlerini belirlemiştir. Bulanık mantık ile yapılan nominal değerlendirme işlemlerinin parsel bazlı değerlendirmede ya da arsa değer haritalarının üretilmesinde gerçeğe yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Ulvi ve Özkan [10], Konya ili Selçuklu ilçesi Yazır Mahallesi'nde 200 adet taşınmaz için bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemini kullanarak taşınmaz değerlendirme çalışması yapmıştır. Elde edilen değerlerin piyasa değerleri ile karşılaştırılması sonucu yapay sinir ağları ortalama yaklaşıklık değeri %88.13, bulanık mantık ortalama yaklaşıklık değeri %84.39 olarak hesaplanmıştır. Tabar [11], Samsun ilinin merkez ilçelerinde sekiz adet faktör belirleyerek bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemini kullanarak taşınmaz değerlendirme uygulaması yapmıştır. Tabar ve Şişman [1], Samsun, Atakum, Yenimahalle'de belirlenen dört adet faktör ile bulanık mantık yöntemi kullanarak arsa değeri belirlemiştir. Özcan ve Eldem [12], Karaman ilinde konut fiyatlarının

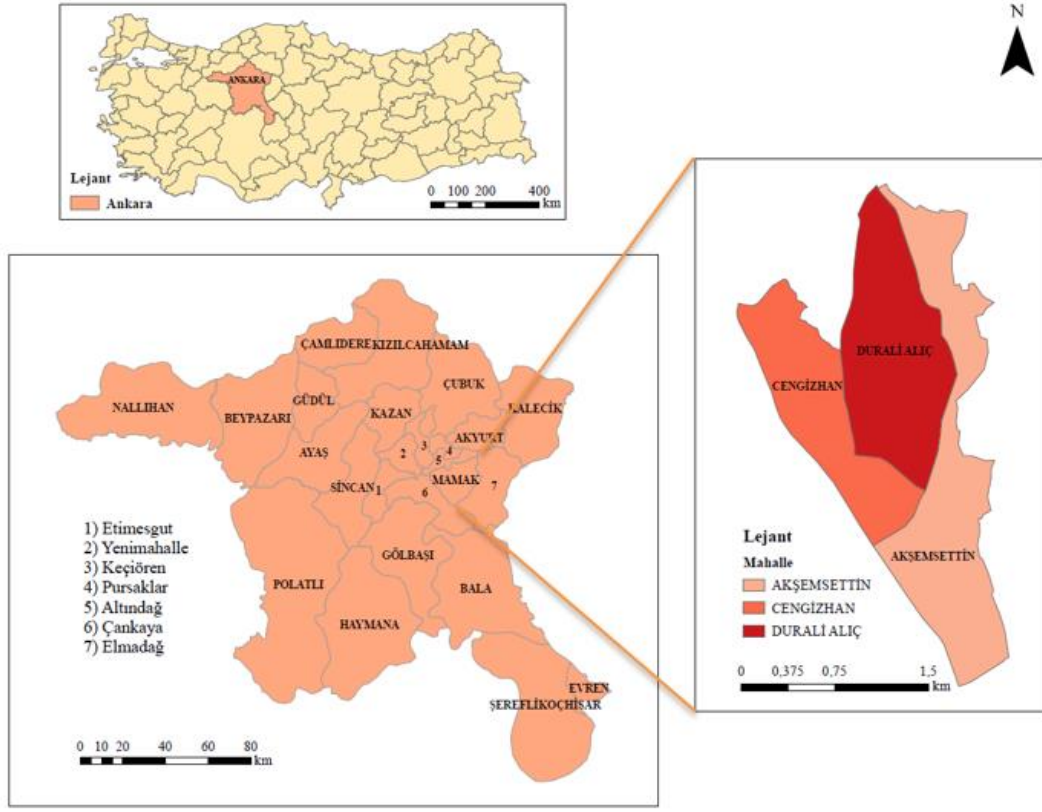
belirlenmesi için bulanık mantık tabanlı bir model geliştirmiş, oluşturulan modeli çevrimiçi emlak sitesinden alınan verilerle test etmiş ve geliştirilen modelin başarı oranını %84.23 olarak saptamıştır. Esen ve Tokgöz [13], taşınmaz değerlendirmede veri setindeki değişkenlerin azaltılmasının bulanık mantık modellemesi üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamıştır. Bu bağlamda İzmir ili muhtelif ilçelerinde 120 tane bağımsız bölümün değerlendirme raporları kullanılmış ve en az değişken kullanılarak en başarılı veri seti elde edilmiştir. Ayrıca CBS'nin taşınmaz değerlendirme alanında kullanılması ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, Deveci ve Yılmaz [14], Afyonkarahisar il merkezinde gerçekleştirdikleri çalışmada nominal değerlendirme yöntemi kullanarak taşınmaz değer haritalarını CBS ile elde etmiştir. Torun vd. [15], yapısız parsellerin değerinin belirlenmesinde değere etki eden faktörleri analiz etmiş ve örnek bir mahallede yapısız parsellerin değer haritasını CBS entegrasyonu ile elde etmiştir. Alkan ve Özfidan [16], taşınmaz değerlendirmede faaliyet gösteren değerlendirme şirketleri ve değerlendirme uzmanları için bir sistem tasarımı amaçlamıştır. Bu amaçla Mersin ili Yenişehir Belediyesi'nin bir bölümü seçilerek CBS ile değerlendirmeye yönelik veri tabanı tasarımı gerçekleştirmiştir. Yağmahan ve Gülgen [17], Mardin ili Midyat ilçesinde yapısız parsellerin değerlendirme çalışmasında CBS ile değere etki eden faktörleri analiz ederek taşınmaz değerlendirme haritası oluşturmuştur. Mete ve Yomralıoğlu [18], CBS destekli konumsal analizler sonucu elde edilen raster formatındaki taşınmaz değer haritalarının temsil ettikleri alanın rayiç bedeli ile ne kadar uyumlu olduğunu araştırmıştır. Bu kapsamda İstanbul ili Beyoğlu ve Gaziosmanpaşa ilçeleri için farklı piksel boyutlarında nominal taşınmaz değer haritaları üreterek çözünürlüğe bağlı olarak birim alanda taşınmaz değerlendirmede ortaya çıkan değişimleri incelemiştir. Özgüven ve Erenoğlu [19], Çanakkale ili Merkez ilçesinde yapısız parsellerin değerlendirilmesinde CBS ile değere etki eden faktörleri incelemiş ve taşınmaz değer haritası elde etmiştir.

Bu çalışmada, taşınmaz değerlendirme uygulamalarında bulanık mantık yönteminin kullanılabilirliği farklı bir bölgede yapılan çalışma ile incelenmiştir ve çalışma bu yönüyle literatürden ayrılır. Bu bağlamda Ankara ili Mamak ilçesi Akşemsettin, Durali Alıç ve Cengizhan Mahalleleri için taşınmaz verileri elde edilmiştir. Taşınmaz değerini etkileyen faktörler yapısal ve konumsal özellikler olmak üzere iki ana faktör ve bina yaşı, daire katı, daire alanı (m<sup>2</sup>), oda sayısı, cephe, daire imkânları, eğitim kurumları, alışveriş merkezi (AVM) ve ana caddeye olan mesafe olmak üzere 9 alt faktör olarak belirlenmiştir. Yapay zekâ tekniklerinden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılarak taşınmaz değerlendirme yapılmış ve elde edilen taşınmaz değerleri ile piyasa değerleri karşılaştırılmıştır. CBS kullanılarak piyasa değerleri ile bulanık mantık yöntemi ile elde edilen değerlere göre taşınmaz değer haritaları üretilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Materyal

Ankara ili Mamak ilçesine bağlı Akşemsettin, Durali Alıç ve Cengiz Mahalleleri çalışma alanı kapsamındadır (Şekil 1).



Şekil 1. Ankara ili ve çalışma alanı

Mamak ilçesi Ankara'nın merkez ilçelerinden biri olup şehrin doğusunda yer almaktadır. Mamak ilçesi batıda Çankaya, güneyde Bala, doğuda Elmadağ ve kuzeyde Altındağ ilçesi ile komşudur [20]. 2021 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre ilçe nüfusu 682.420'dir. İlçe hızla gelişmekte ve nüfus artışı gerçekleşmektedir. Nüfus artış hızına paralel olarak barınmaya olan ihtiyaç artmaktadır. Son yıllarda yapılan veya planlanan kentsel dönüşüm projeleri, metro projesi, ekonomiye yapılan yatırımlar, çevre düzenlemeleri, ticari faaliyetlerin artışı, yeni eğitim kurumlarının açılışı, sosyal donatı alanlarına yapılan yapıtımlar gibi benzeri faktörler ilçenin göç almasına neden olmuştur. Böylelikle konut satışlarında önemli artışlar meydana gelmiş ve satış fiyatları hızlı bir şekilde yükselişe geçmiştir.

2021 yılı Aralık ayı konut satış istatistikleri TÜİK verilerine göre Türkiye genelinde 1 milyon 491 bin 856 konut satılmıştır. Konut satışlarında İstanbul 276 bin 223 konut satışı ve %18,5 ile en yüksek paya sahip olmuştur. İstanbul'u 144 bin 104 konut satışı ve %9,7 pay ile Ankara ili izlemiştir [21]. Çalışma alanı olarak belirlenen Akşemsettin, Durali Aliç ve Cengizhan Mahalleleri de yeni gelişmekte olup Mamak ilçesinde konut satışlarında en çok talep gören mahalleler arasındadır. Alışveriş merkezi, ticaret alanları, spor alanları, eğitim merkezleri gibi birçok faaliyet merkezlerini de barındıran mahallelerdir.

Bu çalışmada, her mahallede 100 konut olacak şekilde toplam 300 konut değerlemeye alınmıştır. Taşınmaz değerleri ve taşınmaza ait yapısal ve konumsal özellikler

bilgileri çevrimiçi emlak sitelerinden ve bölgedeki taşınmaz değerlendirme ve emlak firmalarından temin edilmiştir. Taşınmazlara ait piyasa değerleri elde edilirken 2020 ile 2021 yılı piyasa değerleri karşılaştırılmış ve emsal taşınmazların değerleri ile birlikte değerlendirilerek güncel piyasa değerlerine ulaşılmıştır. Taşınmazların konumları ise çevrimiçi emlak siteleri, taşınmaz değerlendirme raporları, imar planı ve Google Earth kullanılarak tespit edilmiştir. Taşınmazın değerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi aşamasında literatürdeki benzer çalışmalar incelenmiş [9-13] ve değerlendirme uzmanları ile emlak firmalarının görüşü alınmıştır. Ayrıca bölgede yapılan saha çalışması ve taşınmazlarla ilgili veriler incelenerek değer üzerinde etkili olan faktörler tespit edilmiştir. Bu faktörler literatür ile uyumlu olup yapısal ve konumsal özellikler olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Taşınmaz değerini etkileyen faktörler

Yapısal özellikler; bina yaşı, daire katı, daire alanı (m<sup>2</sup>), oda sayısı, cephe ve daire imkânlarıdır. Daire imkânları faktörü ile otopark, güvenlik, yüzme havuzu, basketbol sahası, spor salonu, tenis kortu, hamam, çocuk parkı gibi

konutların sahip olduğu özellikler değerlendirilmiştir. Konumsal özellikler ise, eğitim kurumları, AVM ve ana caddeye olan mesafedir. Sağlık merkezleri, resmi kurumlar, kültürel alanlar, yeşil alan, ibadethane, otopark gibi sosyal donatı alanları da taşınmazın konumsal özellikler olarak değerini etkileyen faktörlerdir. Bu çalışmaya konu olan taşınmazların piyasa değerleri ve uzman görüşleri dikkate alındığında genel olarak taşınmazlar üzerinde eğitim kurumları, AVM ve ana caddeye olan mesafe faktörlerinin etkili olduğu tespit edilmiştir.

## 2.2 Metod

Bulanık mantık, bilgisayarlar tarafından insanlara özgü olan akıl yürütme, öğrenme ve düşünme gibi özelliklerin kullanılmasıdır. Bulanık mantık yöntemi uygulanırken sayısal ifadeler yerine sözel ifadeler kullanılır ve bilgisayar bu sözel ifadeleri sayısal mantığa dayanarak alır. İlk olarak 1965 yılında Zadeh tarafından bulanık mantık yöntemi ortaya atılmıştır. Zadeh, gerçek dünyadaki nesnelere matematikteki kesin kalıplara uymak zorunda olmadığını savunmuştur [22]. Klasik mantıktaki kesinlik, bulanık mantıkta bulunmadığı için bir gerçeğin yaklaşık olarak bulunması bulanık mantık olarak adlandırılır [1].

Bulanık mantık yönteminin genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde özetlenmiştir [23]:

- Bulanık mantık kesinlik yerine yaklaşık değerlere dayalıdır.
- Bulanık mantık bilgiyi küçük, büyük, çok az şeklinde sözel ifadeler ile tanımlar.
- Bulanık mantık derecelendirmeye dayanır ve her şey [0,1] aralığında belli bir derece ile gösterilir.
- Sözel ifadeler kullanılarak tanımlanan kurallar ile bulanık çıkarım yapılır.
- Matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için bulanık mantık kullanımı çok uygundur.

Bulanık mantık, bulanık küme ve alt kümelerden oluşmaktadır. Bulanık küme teorisi, kesin olmayan özel yargıları kapsayan kavramların değerlendirilmesini sağlayan önemli bir araçtır [24]. Klasik mantıkta var-yok gibi ifadeler kullanılırken bulanık mantıkta biraz var-biraz yok gibi ifadeler kullanılır. Klasik kümelerde bir eleman bir kümenin elemanı ya da değilken bulanık kümelerde bunun cevabı kesin olmayıp elemanın derecesi [0,1] aralığında değişmektedir. Bu bağlamda üyelik fonksiyonları bulanık kümeleri ifade etmek için kullanılır. Üyelik fonksiyonları sayesinde her nesnenin bir kümedeki ağırlık derecesi

belirlenmiş olup bu ağırlık derecesi [0,1] aralığında değişmektedir [25].

Bulanık mantık yönteminin giriş, bulanıklaştırma, kural tabanlı çıkarım, durulaştırma ve çıkış bölümlerinden oluşan şematik yapısı Şekil 3'te verilmiştir. Giriş bölümü bağımlı ve bağımsız değişkenlerden oluşmaktadır. Bu değişkenleri ifade eden üyelik fonksiyonları seçilerek bir sonraki bölüm olan bulanıklaştırma gerçekleştirilir [13].

Bulanıklaştırma işlemi, gerçek sayılarla tanımlanan giriş verilerinin üyelik fonksiyonları yardımıyla dilsel ifadelere dönüştürülmesi işlemidir. Üyelik fonksiyonları hakkında ne kadar ve ne şekilde olacağı gibi herhangi bir sınırlandırma söz konusu değildir. Uzman kişinin bilgi ve tecrübesine bağlı olarak üyelik fonksiyonlarının sayısı ve çeşidi değişkenlik göstermektedir [24]. Genellikle çalışmalarda Şekil 4'te verildiği gibi Üçgen, Gauss, Çan eğrisi, Yamuk ve Sigmoidal üyelik fonksiyonları kullanılır. [26].

Bulanık mantıkta kural tabanı oluşturulurken uzman kişinin görüşü alınır. Giriş verileri ile çıkış verileri arasında 've/veya', 'eğer-ise' şeklinde ifade edilen koşullar ile mantıksal bağ kurulur. Sistem modelinin bütünü ifade eden bir kural tabanı, tüm kuralların birlikte kullanılmasıyla oluşturulur [13]. Bulanık çıkarım mekanizması için farklı türde yapılar bulunmaktadır. Genel olarak Mamdani ve Sugeno bulanık çıkarım mekanizmaları kullanılmaktadır.

Durulaştırma bölümü modellemenin son kısmıdır. Bu bölümde bulanık halde bulunan veriler tekrar anlaşılır hale getirilir. Bulanıklaştırılan verilerden sayısal veriler elde edilir ve böylece bulanık mantığın model için oluşturduğu sonuç yani çıkış verisi elde edilmiş olur.

Bu çalışmada, taşınmaz değerlerinin belirlenmesinde bulanık mantık yöntemi kullanılmıştır. Matlab R2018 yazılımı Fuzzy Logic Toolbox kullanılmıştır. Çalışmada Mamdani bulanık çıkarım mekanizması ve çalışmalarda genel olarak kullanılan üyelik fonksiyonlarından üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır (Şekil 5). Üçgen üyelik fonksiyonuna ait matematiksel denklem Denklem (1)'de verilmiştir [27].

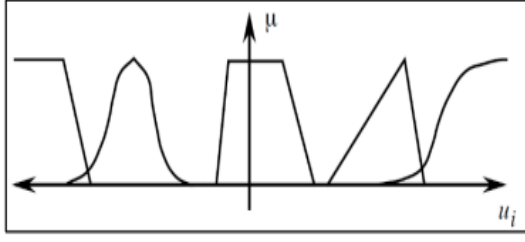
**Denklem (1):** Üçgen üyelik fonksiyonu

Fonksiyon  $\Lambda: x \rightarrow [0,1]$   $x$ :  $X$  evreninde herhangi bir eleman;

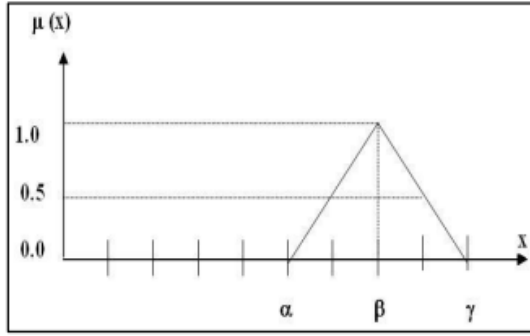
$$\Lambda(x; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{(x - \alpha)}{(\beta - \alpha)}, & \alpha \leq x \leq \beta \\ \frac{(\gamma - x)}{(\gamma - \beta)}, & \beta \leq x \leq \gamma \\ 0, & x > \gamma \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 3. Bulanık mantık yönteminin şematik yapısı



Şekil 4. Bulanık mantık yönteminde kullanılan üyelik fonksiyonları [19]



Şekil 5. Üçgen üyelik fonksiyonu

### 3 Bulgular ve tartışma

Ankara, Mamak, Akşemsettin, Durali Alıç ve Cengizhan Mahallelerinde taşınmaz değerlerini belirlemek için yapılan çalışmada giriş verisi olarak taşınmazın değerini etkileyen 9 faktör belirlenmiş ve bu veriler için oluşturulan üyelik fonksiyonları Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloda oluşturulan üyelik fonksiyonları, taşınmaz değerine etki eden faktörlerin her biri ayrı ayrı incelenerek ve taşınmaz değerlendirme uzman görüşleri alınarak belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonları için seçilen aralıklar ise çalışma bölgesinden elde edilen taşınmazın değerini etkileyen faktörlerin minimum ve maksimum değerleri sınır kabul edilerek belirlenmiştir.

Bulanık mantık yöntemi kullanılarak taşınmaz değerlerinin belirlenmesi hedeflenen bu çalışmada kural tabanı için 9 girdi verisi ve 1 çıktı verisi belirlenmiştir. Taşınmazın değerini etkileyen faktörler için üyelik fonksiyonları ve kural tabanı oluşturulmuştur. Taşınmazlar için belirlenen üyeliklerin taşınmaz değerine etkisinin tespit edilmesi için 've' bağlacı kullanılarak 79 adet kural oluşturulmuş ve taşınmaz değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2. Taşınmazların satış değerleri ile bulanık mantık değerlerinin yaklaşıklık tablosu

No	Mahalle	Taşınmaz Değeri (TL)	Bulanık Mantık Değeri (TL)	Yaklaşıklık (%)
1	Akşemsettin Mah.	180000	153136	85.08
2	Akşemsettin Mah.	192000	163345	85.08
3	Akşemsettin Mah.	187000	159092	85.09
4	Cengizhan Mah.	605000	660740	90.79
5	Cengizhan Mah.	603500	659103	90.78
6	Cengizhan Mah.	551000	601765	90.78
7	Durali Alıç Mah.	310000	326370	94.72
8	Durali Alıç Mah.	348000	366378	94.70
9	Durali Alıç Mah.	350000	368480	94.72

Tablo 1. Faktörler ve üyelik fonksiyonları

Faktörler	Üyelik Fonksiyonları	Aralık
Bina Yaşı	Çok Yeni-Yeni-Eski	[0 15]
Daire Katı	Yüksek-Normal-Alçak	[-3 15]
Daire Alanı	Büyük-Normal-Küçük	[65 340]
Oda Sayısı	Büyük-Normal-Küçük	[1 5]
Cephe	Kötü-İyi	[0 6]
Daire İmkânları	Çok İyi-İyi-Normal-Kötü	[0 7]
Eğitim Kurumları	Yakın-Normal-Uzak	[0 1500]
AVM	Yakın-Normal-Uzak	[0 1500]
Ana Cadde	Yakın-Normal-Uzak	[0 500]

Bulanık mantık yöntemi ile yapılan uygulama sonucunda taşınmazların oluşturulan modelde elde edilen değerleri ile piyasa değerleri arasında olan yaklaşıklık oranları mahalle bazında hesaplanmıştır ve her mahalleden üç örnek taşınmaz Tablo 2'de verilmiştir.

Bulanık mantık yöntemiyle elde edilen değerlerin doğruluğunu kontrol etmek için ortalama yaklaşıklık (%) (Denklem (2)), R<sup>2</sup> (Denklem (3)), kök karesel ortalama hata (RMSE) (Denklem (4)), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) (Denklem (5)) hesaplanmıştır.

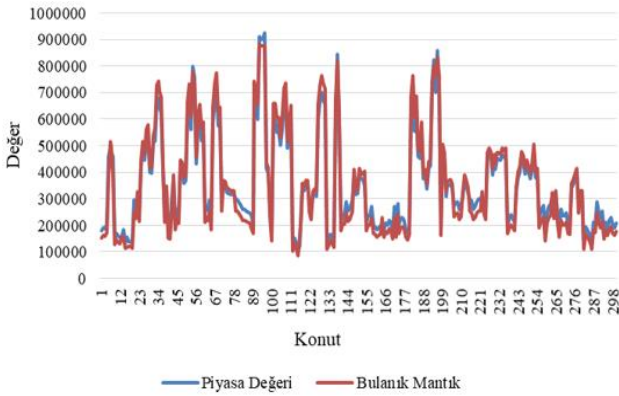
$$\text{Ort. yaklaşıklık (\%)} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ 1 - \frac{|x_p - x_i|}{x_i} \right]}{n} * 100 \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_p - x_{iort})^2} \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_p - x_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|x_p - x_i|}{x_p} \right)}{n} * 100 \quad (5)$$

Denklemlerde verilen  $x_p$ : taşınmazların piyasa değerlerini,  $x_i$ : taşınmazların bulanık mantık ile hesaplanan değerlerini ifade etmektedir. **Denklem (2)** ile hesaplanan ortalama yaklaşıklık değeri %89.377 olarak hesaplanmıştır. Bu da bulanık mantık ile elde edilen değerler ile piyasa değerlerinin örtüşüğünü göstermektedir ve **Şekil 6'** da değerlerin karşılaştırılması verilmiştir.



**Şekil 6.** Piyasa değerleri ile bulanık mantık değerlerinin karşılaştırılması

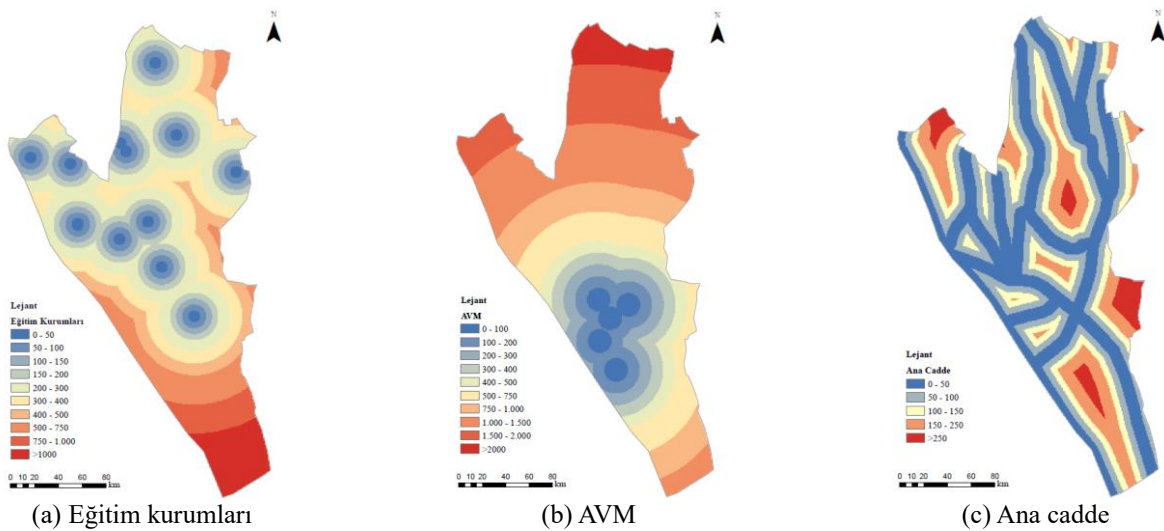
**Denklem (3)**'te verilen formül ile  $R^2$  değeri hesaplanmıştır ve 0.959 bulunmuştur. Bu değer 0 ile 1 aralığında olması istenir ve bu değer 1'e yaklaşması elde edilen sonuçların iyi olduğunu ifade eder. **Denklem (4)** ile RMSE değeri 0.117 olarak bulunmuştur. RMSE değeri hataların standart sapmasını verir ve RMSE=0 olması sistemde hata olmadığını ifade eder. RMSE değerinin sıfıra yakın olması

sistemin iyi çalıştığını gösterir. **Denklem (5)** ile MAPE değeri %4.31 olarak hesaplanmıştır. Bu değer  $< \%10$  olması sistemin yüksek doğrulukta,  $\%10 < MAPE < \%20$  olması ise sistemin iyi çalıştığını göstermektedir. Elde edilen MAPE değeri modelin gerçeğe yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

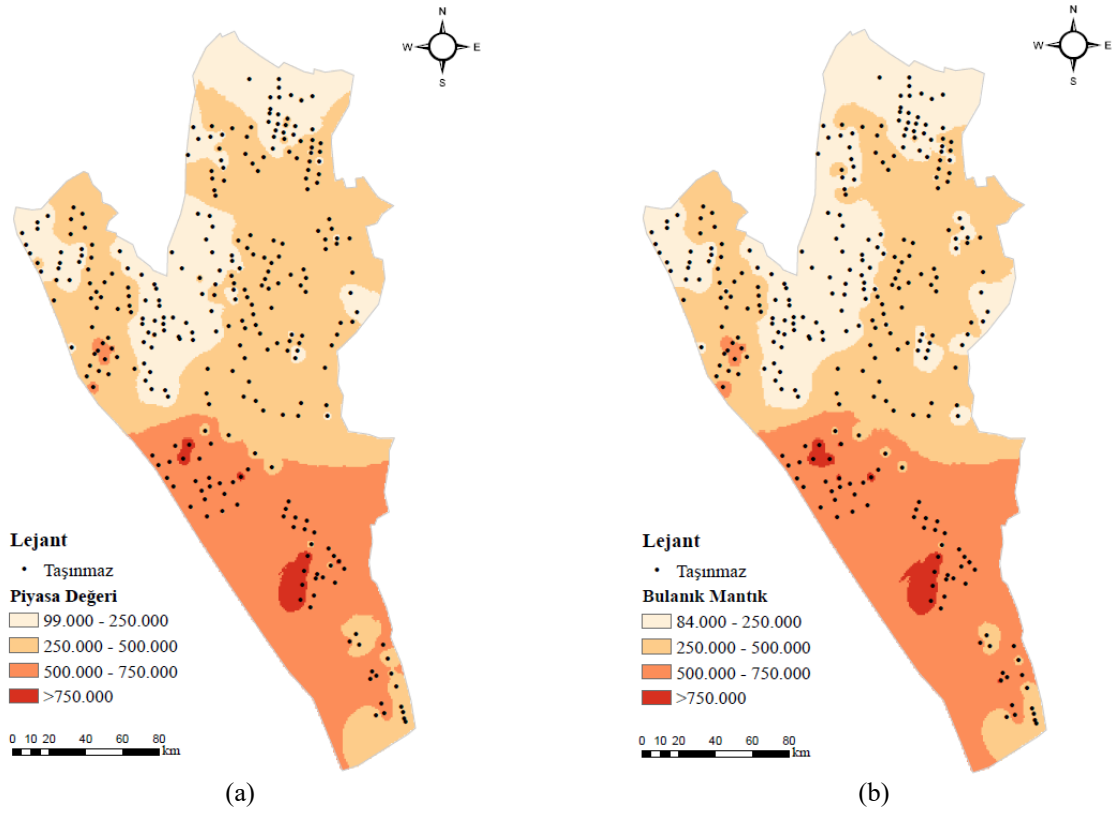
Literatürde taşınmaz değerlemede bulanık mantık yönteminin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde Yalçır [8], Mamdani tekniği ile yapılaşmış ve yapılaşmamış alanda sırasıyla  $R^2$  değerini 0.84 ve 0.91 olarak hesaplamıştır. Ulvi ve Özkan [10], yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemi kullanarak gerçekleştirdiği taşınmaz değerlendirme çalışmasında bulanık mantık yöntemiyle elde edilen değerler ile piyasa değerleri arasında ortalama yaklaşıklık değerini %84.39 ve  $R^2$  değerini 0.6857 olarak bulmuştur. Tabar [11], bulanık mantık ve yapay sinir ağları yöntemlerini kullandığı taşınmaz değerlendirme çalışmasında, bulanık mantık yöntemiyle Samsun ili Atakum, İlkadım ve Canik ilçelerinde sırasıyla 92.353, 91.568 ve 95.048 doğruluk elde etmiştir. Özcan ve Eldem [12], Karaman ilinde konut fiyatlarının belirlenmesi için bulanık mantık tabanlı bir model geliştirdiği çalışmada geliştirilen modelin başarı oranını %84.23 olarak tespit etmiştir. Bu çalışmada elde edilen istatistiksel sonuçlar literatür ile uyumluluk göstermektedir.

Taşınmazlara ait yapısal ve konumsal veriler elde edildikten sonra taşınmazların konumları CBS kullanılarak sayısal hale getirilmiştir. Taşınmazın değerini etkileyen konumsal özellikler faktörlerine ait mesafe analizleri ile ilgili haritalar **Şekil 7'**de verilmiştir.

Bulanık mantık yöntemi ile belirlenen değerler ile piyasa değerleri CBS ile haritalandırılmıştır (**Şekil 8**). Taşınmaz değer haritalarının üretilmesinde Inverse Distance Weight (IDW) -Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon Yöntemi-kullanılmıştır. Bu yöntemin temelinde bilinen noktalara ait değerlerden yola çıkarak bilinmeyen noktaların değerinin tahmin edilmesi vardır. Bu yöntem kullanılarak verilerin bölgesel değerlendirilmesi ve karşılaştırmaların yapılması mümkündür.



**Şekil 7.** Konumsal özellikler faktörlerine ait mesafe analizleri



Şekil 8. Piyasa değeri taşınmaz değer haritası (a) Bulanık mantık değeri taşınmaz değer haritası (b)

Taşınmaz değer haritaları incelendiğinde Akşemsettin Mahallesi ve Cengizhan Mahallesi'nin güneydoğu kesimlerinde taşınmazların en yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. En düşük değere sahip taşınmazlar ise Durali Alıç ve Cengizhan Mahallelerinin kuzey kesimlerinde yer almaktadır. 750.000 TL ve üzeri değeri, AVM'ye çok yakın, daha çok rezidans ya da daire imkanlarının fazla olduğu yüksek katlı ve geniş konutların yer aldığı alanlardır. 500.000-750.000 TL değer aralığı, AVM'ye yakın, daire imkânlarının fazla olduğu ve daha yeni konutların yer aldığı alanlardır. Diğer değerler ise AVM'ye uzak, eğitim kurumlarına ve ana caddeye daha yakın, daire imkânlarının sınırlı olduğu ve yeni konutlar mevcut olmakla birlikte daha eski konutların yer aldığı alanlardır. Taşınmaz değerini etkileyen en önemli faktörlerin yapısal özelliklerden daire imkânları, konumsal özelliklerden AVM'ye yakınlık olduğu görülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Taşınmaz değerlendirme, taşınmazın sahip olduğu yasal, yapısal, konumsal ve çevresel gibi faktörlerin birlikte değerlendirilerek değerinin tahmin edilmesidir. Taşınmazın değerini etkileyen birçok faktör vardır ve taşınmaz değerlendirme çalışmasının nesnellığı açısından bu faktörlerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Taşınmaz değerlemede geleneksel, istatistiksel ve modern yöntemler kullanılmaktadır. Yapay zekâ tekniklerinin gelişmesiyle birlikte birçok alanda kullanılan modern yöntemler taşınmaz değerlendirme alanında modellenmeler yapılmasına, zaman ve iş

gücünden tasarruf edilerek daha doğru ve objektif sonuçlara ulaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmada, taşınmazın değerini etkileyen faktörler yapısal ve konumsal özellikler olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmıştır. Yapay zekâ teknikleri ve modern yöntemlerden biri olan bulanık mantık yöntemi kullanılarak taşınmaz değerlendirme için bir model oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak piyasa değerleri ile karşılaştırılmıştır. Piyasa değerleri ile bulanık mantık sonucu elde edilen değerlerin %89.377 oranında örtüştüğü tespit edilmiştir.

Taşınmaz değerlendirme günümüzde oldukça önemli olan ve çalışmaların devam ettiği bir alandır. Taşınmaz sektöründe yaşanan fahiş fiyat artışlarının önüne geçebilmek, güvenilir bir piyasa ortamı oluşturmak ve değerini objektif ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi taşınmaz değerlemenin önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, taşınmaz değerlendirme çalışmalarında bulanık mantık yöntemi ve CBS'nin kullanılması ile değerlendirme sürecinin nesnel ve bilimsel yürütülebilmesi yönüyle literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca gelecek çalışmalar içinde mahalle ya da bölgesel bazlı taşınmaz değerlendirme çalışmalarının nesnel bir şekilde yürütülmesi açısından önemlidir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, 'Bulanık Mantık Yöntemi İle Taşınmaz Değerleme Haritaları Üretimi: Ankara - Mamak Örneği' isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.



## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %8**

## Kaynaklar

- [1] M. E. Tabar ve Y. Şişman, Bulanık mantık ile arsa değerlendirme modelinin oluşturulması. Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 2 (1), 18-24, 2020.
- [2] N. Erdem, Türkiye taşınmaz değerlendirme sisteminin yeniden yapılandırılmasına yönelik bilimsel çalışma ve öneriler üzerine bir değerlendirme. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7 (1), 159-170, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386408>.
- [3] A. Bozdağ ve E. Ertunç, CBS ve AHP yöntemi yardımıyla Niğde kenti örneğinde taşınmaz değerlendirme. Geomatik, 5 (3), 228-240, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.648900>.
- [4] H. Karaca, Taşınmaz mal değerlendirme yöntemleri ve karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2008.
- [5] A. Y. Özalp, H. Akıncı ve S. Temuçin Kılıçer, Artvin örneğinde arsa vasıflı taşınmaz malların değerini etkileyen faktörlerin analizi. Geomatik, 5 (2), 100-111, 2020. <https://doi.org/10.29128/geomatik.579401>.
- [6] T. Alkan ve S. S. Durduran, Turizm kentlerinde taşınmaz değerlemenin CBS ve AHP yöntemi yardımıyla incelenmesi: Alanya kenti örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (1), 178-187, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.760816>.
- [7] T. Yomralıoğlu, R. Nişancı, M. Çete ve E. Candaş, Dünya’da ve Türkiye’de taşınmaz değerlendirme. Türkiye’de Taşınmaz Değerlemesi: II. Arazi Yönetimi Çalıştayı, sayfa 1-18, İTÜ, Türkiye, 21-22 Mayıs 2012.
- [8] Ş. Yalprı, Bulanık mantık metodolojisi ile taşınmaz değerlendirme modelinin geliştirilmesi ve uygulanması: Konya örneği. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [9] M. A. Derinpınar, Bulanık mantık ile coğrafi bilgi teknolojilerini kullanarak taşınmaz değerlendirme: Sarıyer-İstanbul örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [10] C. Ulvi ve G. Özkan, Taşınmaz değerlendirme yapay zeka tekniklerinin kullanılabilirliği ve yöntemlerin karşılaştırılması. Geomatik, 4 (2), 134-140, 2019. <https://doi.org/10.29128/geomatik.501042>.
- [11] M. E. Tabar, Yapay sinir ağları ve bulanık mantıkla gayrimenkul değerlendirme modelinin oluşturulması: Samsun örneği. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [12] F. T. Özcan ve A. Eldem, Konut fiyatı belirlemede bulanık mantık tabanlı model yaklaşımı. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9 (2), 194-205, 2020. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.785051>.
- [13] Y. Esen ve H. Tokgöz, Bulanık mantık metodolojisi ile taşınmaz değerlemeye farklı bir bakış. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9 (4), 1155-1165, 2021. <https://doi.org/10.21923/jesd.876523>.
- [14] E. Deveci ve İ. Yılmaz, Coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla taşınmaz mal değerlendirme: Afyonkarahisar il merkezi örneği. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1 (1), 33-47, 2009.
- [15] M. K. Torun, M. Yanalak ve D. Z. Şeker, Örnek bir mahallede yapısız parsellerin değer haritalarının coğrafi bilgi sistemleri ile üretilmesi. TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, İzmir, Türkiye, 02-06 Kasım 2009.
- [16] M. Alkan ve F. Özfidan, Taşınmaz değerlendirme yönelik coğrafi bilgi sistemi tasarımı ve uygulaması. Karalması Fen ve Mühendislik Dergisi, 6 (2), 334-344, 2016.
- [17] G. Yağmahan ve F. Gülgen, Taşınmaz değerlendirme coğrafi bilgi sistemlerinin kullanılması: Mardin Midyat örneği. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, 18-21 Eylül 2018.
- [18] M. O. Mete ve T. Yomralıoğlu, CBS ile nominal taşınmaz değer haritası üretiminde çözünürlük araştırması. Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi, 1 (1), 16-23, 2019.
- [19] M. Özgüven ve R. C. Erenoğlu, Taşınmaz değer haritalarının coğrafi bilgi sistemleri ile üretilmesi: Çanakkale örneği. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 7 (1), 29-46, 2020. <https://doi.org/10.9733/JGG.2020R0003.T>
- [20] <https://tr.wikipedia.org/wiki/Mamak>, Erişim 15 Mart 2022.
- [21] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Konut-Satis-Istatistikleri-Aralik-2021-45672>, Erişim 16 Mart 2022.
- [22] L. A. Zadeh, Commercialism and human values. Azerbaijan International, Azerbaijan, 25 April 1998.
- [23] İ. Karataş, Bulanık mantık ile klasik ve sembolik mantık ilişkisi (karşılaştırılması). European Journal of Educational and Social Sciences, 3 (2), 144-163, 2018.
- [24] M. Arslan ve G. Zırhlıoğlu, Öğretmen performanslarının bulanık mantık yöntemiyle değerlendirilmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 18 (1), 569-594, 2021. <https://doi.org/10.33711/yyuefd.919431>.
- [25] F. Karataş, İ. Koyuncu, M. Tuna ve M. Alçın, Bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının fpga üzerinde gerçekleştirilmesi. Bilgisayar Bilimleri ve Teknolojileri Dergisi, 1 (1), 01-09, 2020.
- [26] Ç. Elmas, Bulanık mantık denetleyiciler. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003.
- [27] K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy control. Addison-Wesley, 1st edition, Chapter 1, pp. 1-110, 1998.





# Arazi yönetimi paradigması çerçevesinde Türkiye’de binalar için enerji kimlik belgesi uygulamasının değerlendirilmesi

## Evaluation of energy performance certificate actions for buildings in Turkey within the framework of land management paradigm

Mehmet İşiler<sup>1,\*</sup>, Mustafa Yanalak<sup>2</sup>, Mahmut Oğuz Selbesoğlu<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Öz

Günümüzde artan nüfus ve çeşitlenen ekonomik faaliyetler nedeniyle şehirlerdeki enerji tüketimi önemli ölçüde artmaktadır. Yapı sektörünün, Avrupa Birliği’nde nihai enerji tüketiminin ve toplam CO<sub>2</sub> emisyonunun artmasında ciddi bir sorumluluğu olduğu bilinmektedir. Son yirmi yılda, Avrupa Birliği’nde konut binaları için enerji verimliliği politikaları kapsamında uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, AB Enerji Verimliliği Direktifinin etkisiyle Türkiye’de de birçok yasal düzenleme yürürlüğe konulmuştur. 05.12.2008 tarihli Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği’nde tarif edilen “Enerji Kimlik Belgesi (EKB)” uygulaması ile binaların enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması beklenmektedir. EKB uygulaması tek bir bina ölçeği kapsamında düşünülmemeli ve arazi yönetimi kapsamında bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Yerleşim yerlerinde etkin bir enerji verimliliği politikası oluşturmak için EKB uygulamaları sonucu elde edilen verilerin mülkiyet, arazi kullanımı, topoğrafik ve atmosferik verilerle entegrasyonu sağlanmalı ve mekânsal analizlerin yapılabildiği bir yapı kurulmalıdır. Bu çalışmada arazi yönetimi paradigması çerçevesinde ülkemizdeki EKB uygulaması değerlendirilmiş, uygulamadaki önemli eksiklikler ortaya konularak, bazı çözüm önerileri sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Enerji verimliliği, Arazi yönetimi, Enerji kimlik belgesi

### 1 Giriş

Günümüzde, küreselleşme akımları, teknolojik gelişmeler ve yaygınlaşan iletişim olanakları sayesinde ekonomik, sosyal ve kültürel faaliyetler artmakta ve oldukça çeşitlenmektedir. Bu yeni durum, daha önceleri dikkate alınmayan enerji tüketimi miktarının gün geçtikçe artmasına neden olmuştur. Küresel çapta artan enerji tüketimi doğal kaynakların tahrip edilmesine ve iklim değişikliğine neden olmakla beraber ülke ekonomilerine de büyük yükler getirmektedir. Bu bağlamda günümüzde enerji verimliliği konusu küresel bir gündem halini almıştır. Enerji verimliliği faaliyetleri, özellikle fosil yakıtlara bağımlı ülkeler için

### Abstract

Today, energy consumption in the cities is dramatically increasing due to the growing population and various economic activities. The construction sector has a significant responsibility to increase global final energy consumption and total CO<sub>2</sub> emission in the European Union. In the last two decades, policies on energy efficiency for residential buildings have been implemented in European Union. In this context, several legal regulations have been introduced in Turkey by the impact of the EU Directive on Energy Efficiency. Energy consumption and greenhouse gas emissions of structures are expected to be reduced with the Energy Performance Certificate (EPC) procedure described in the Regulation on Building Energy Performance. EPC actions should not be considered only in terms of the scale of a single building, and these efforts should be addressed with a holistic approach within the scope of land management. The data obtained from EPC applications should be integrated with land tenure, land use, topographic and atmospheric data to create an effective energy efficiency policy in settlements. Information infrastructure should be established to enable the application of spatial analysis. In this study, EPC actions in our country were evaluated within the land management paradigm, significant deficiencies were introduced, and some suggestions were made.

**Keywords:** Energy efficiency, Land management, Energy performance certificate

yüksek enerji maliyetlerinin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kilit bir rol oynamaktadır.

Avrupa Birliği ülkelerindeki mevcut binaların enerji tüketiminin yaklaşık %40’ından ve toplam CO<sub>2</sub> emisyonunun %36’sından sorumlu olduğu bilinmektedir [1]. Son yirmi yılda, Avrupa Birliği’nde özellikle konut binalarına ilişkin enerji verimliliği politikaları geliştirilmekte ve çeşitli yasal düzenlemeler yürürlüğe konmaktadır. Enerji Verimliliği Direktifi ve Binaların Enerji Performansı Direktifi (EPDB), Avrupa’daki binaların enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan temel hukuki kaynakları oluşturmaktadır. Binaların Enerji Performansı Direktifi’nde binaların enerji performanslarının ölçülmesi ve kaydına

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / isiler@itu.edu.tr (M. İşiler)

Geliş / Received: 06.01.2022 Kabul / Accepted: 12.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1054333

ilişkin düzenlemelere yer verilmektedir. Bu kapsamda, AB ülkelerinde binalar için “Enerji Performansı Sertifikası” (Energy Performance Certificate, EPC) uygulaması zorunlu tutulmuştur. Bu sertifika esas olarak binaların enerji tasarruf potansiyelini, enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu belirlemektedir. Ayrıca, bu uygulama sonucunda binaların yenilenebilir enerji potansiyellerine ilişkin bilgiler de elde edilebilmektedir. Bu nedenle EPC, enerji kaybını sınırlama bilincini artırmak, endüstrileri enerji verimliliği konusunda yenilikçi teknolojiler geliştirmeye teşvik etmek ve enerji verimliliği politikalarının etkinliğini izlemek için etkili bir belgedir [2].

Enerji Verimliliği AB Direktifi'nin etkisiyle Türkiye'de de birçok yasal düzenleme yapılmıştır. Ülkemizdeki nüfus artışı, hizmet ve sanayi sektöründeki gelişmeler sonucunda enerji tüketim miktarımız oldukça artmıştır [3]. 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ve 05.12.2008 tarihli Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ülkemiz için binalarda enerji verimliliği uygulamalarının yasal çerçevesini oluşturmaktadır. Enerji verimliliği konusunda Enerji Kimlik Belgesi (EKB) uygulaması ile binaların enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması beklenmektedir. Türkiye'de EKB faaliyetleri 1 Ocak 2011 tarihinde başlamıştır [4]. İlgili yönetmelikte [5] belirtildiği üzere EKB inşaat tamamlandıktan sonra “Yapı Kullanma İzin Belgesi” almak için zorunlu bir gerekliliktir. Ayrıca binaların satın alınması, satılması veya kiralanması aşamalarında EKB gereklidir. EKB süreci akredite uzmanlar tarafından gerçekleştirilir. Ulusal hesaplama modeline dayalı olarak geliştirilen ve web üzerinden yetkililer tarafından erişimi yapılabilen Bina Enerji Performansı Uygulaması (BEP-TR yazılımı), binaların enerji verimliliği performansını değerlendirmek ve EKB belgesi üretmek için kullanılmaktadır.

EKB belgeleri, yapı sektöründe enerji verimliliği stratejileri geliştirmek için birincil veri kaynaklarıdır. EKB'ler bina verileri ve enerji performans sınıfları ile birlikte sera gazı emisyonu ve yıllık enerji tüketim miktarları hakkında genel bilgiler içermektedir [4]. EKB'ler tarafından sağlanan veriler yardımıyla yeni binalar için temel enerji verimliliği gereklilikleri ve mevcut binalar için iyileştirme fırsatları değerlendirilebilir. Ayrıca, EKB'lerin içerdiği bilgilerin makro ölçekte analizi ile enerji verimliliği amacıyla modern inşaat yöntemlerinin uygulanması ve yeni yapı malzemelerinin geliştirilmesi hususlarında inşaat sektörünü teşvik edici adımlar atılabilir [2].

Birçok Avrupa ülkesi kendi ulusal enerji performans sertifikalarına ilişkin veri tabanları oluşturmaya başlamıştır. Gelişmiş ülkelerde kullanıcılara çeşitli analizlerin yapılmasına olanak veren coğrafi bilgi sistemleri (CBS) uygulamalarının sunulduğu görülmektedir [6]. Ayrıca bu sistemler yenilenebilir enerji kullanımına yönelik faaliyetleri desteklemekte ve özellikle binalarda kullanılacak güneş sistemlerinin analizine ve kurulumuna katkı sağlamaktadır [6].

Bu çalışmanın odağında EKB verileri yer almaktadır. Bu bağlamda ülkemizdeki EKB faaliyetlerine yönelik değerlendirmelerin yapıldığı akademik çalışmaların irdelenmesi oldukça önemlidir.

Önal [7] çalışmasında, Antalya İli Korkuteli ilçesinde farklı mahallelerde inşa edilmiş farklı konum ve tipolojilerdeki binaların enerji verimliliği performanslarını BEP-TR programı kullanarak karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda enerji kimlik belgesinin oluşturulmasında iklim ve bina mevkiinin önemli olduğu ortaya konulmuştur. Korkuteli İlçesinde bina enerji verimliliğinin isabetli bir şekilde hesaplanabilmesi için Antalya ili geneline hâkim iklim koşulları yerine binaların bulunduğu bölgeye ait lokal iklim koşullarının programa girilebilmesinin gerekliliği üzerinde durulmuştur. Korkuteli ilçesi için Antalya ilinin geneline hâkim iklim koşullarının aksine karasal iklime yakın özellikte verilerin daha doğru sonuçlar vereceği ifade edilmiştir.

Aydın ve Saylam Canım [8] çalışmalarında, BEP-TR programının performansını ve enerji kimlik belgesi uygulamasını irdelemişlerdir. Trabzon ilinde görev alan EKB uzmanı kişilerle görüşmüş, EKB uygulamasındaki mevcut sorunlar ortaya konulmuş ve ilgili faaliyetlere ilişkin önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışmada EKB'nin yapı kullanma izni başvurusu sırasında yapımı tamamlanmış bina için hesaplanmasının sorunlara neden olduğu aktarılmıştır. Bu durumda tamamlanmış bir binada yapı kullanma belgesi alınması için öngörülen asgari enerji verimliliği sınıfının elde edilmesinde sorunlar yaşanabildiği belirtilmiştir.

Akın ve Kaplan [9] ise BEP-TR programında enerji performanslarına ilişkin çıktıların elde edilmesinde temel alınan verilerin geliştirilmesine yönelik olarak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İlgili çalışmada, enerji performansını etkileyen yerleşme ölçeğindeki tasarım parametrelerinin hesaplamalarda dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır. Mimari tasarım aşamasında oluşturulacak alternatif senaryoların karşılaştırılması ve test edilmesiyle en ideal enerji performansının elde edilebileceği belirtilerek ön sertifika işleminin getirilmesinin uygun olacağı da aktarılmıştır.

Aydın [10] binalarda enerji verimliliği uygulamaları konusunda kamu kurumları, yerel yönetimler ve Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin ortaklaşa gerçekleştirdikleri 6 projeyi incelemiştir. Sonuç olarak ulusal düzeyde kurumsal ve yasal yapının güçlendirilmesi, enerji danışmanlık hizmetleri, denetim ve kontrol mekanizmasının önemi vurgulanmıştır.

Şahin [6] yüksek lisans tez çalışmasında enerji yönetiminde binalar için hazırlanan EKB'lerde yer alan verilerin mülkiyet bazlı kayıt altına alınmasını ve yenilenebilir enerji potansiyellerini tespit edilmesini amaçlayan “Enerji Kadastro” olan ihtiyacı ifade etmiştir. Yerel yönetimlerce enerji performans bilgilerini içeren kent bilgi sistemlerinin oluşturulabileceği, enerji kullanım miktarlarının ve enerji potansiyellerinin parsel bazlı belirlenmesi ile stratejik plan çalışmalarında bu bilgilerin girdi olarak kullanılabilmesi aktarılmıştır. Ayrıca enerji kadastro faaliyetlerinin yerel yönetimler ve mülkiyet sahipleri açısından önemi ifade edilmiştir.

Aydoğdu [11] ise yenilenebilir enerji sektörüne ve enerji verimliliğine yönelik uygulamalara sağlanan kamusal destekleri araştırmıştır. Çalışmada yüksek maliyetlere sahip yenilenebilir enerji sektörünün alacağı desteklerin büyük

önem taşıdığı vurgulanmıştır. Etkin sonuçlar almak ve kamusal desteklerin sürekliliğini sağlamak için verilen desteklerin sonuçlarının takip edilmesi ve bu alandaki ilerlemenin analiz edilmesinin gerekliliği de ifade edilmiştir.

Aktarılan çalışmalar, binalar için enerji kimlik belgesi uygulaması tek bir bina ölçeğinde gerçekleştirilen ve sadece bina yapım süreçlerinin bir parçası olarak algılanmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. EKB üretilirken binaların bulunduğu çevre, arazi kullanım ve yerel iklim bilgilerinin kullanılması oldukça önemlidir. Ayrıca, üretilen EKB bilgileri, kadastral, çevresel ve atmosferik veriler gibi diğer veri setleri ile entegre edilerek üç boyutlu modeller üzerinden enerji tüketiminin çevresel etkisini analiz etmek, yerel ve bölgesel ölçekte sağlıklı enerji politikaları oluşturmak ve uygulamaların sonuçlarını izlemek mümkün olacaktır. Doğru, güvenilir ve güncel veriler ile gerçekçi ve hesaplanabilir hedefler ortaya koyulabilir, sağlıklı bir planlama süreci gerçekleştirilebilir. Bu nedenle, çeşitli veri setleri ile bütünlük EKB bilgilerinin kullanıldığı “Bina Enerji Bilgi Sisteminin” kurulması etkin enerji verimliliği politikalarının oluşturulmasında kritik bir öneme sahiptir. CBS uygulamaları sayesinde yerel yönetimler, bina stokları hakkında konum bazlı enerji performans verilerine sahip olmakta ve mevcut binaların rehabilitasyon olanaklarını ve finansmanını tanımlayabilmektedir [1].

Özellikle binalarda enerji verimliliği konusunun arazi yönetiminin bir parçası olarak ele alınmasının sürdürülebilir ve etkin enerji yönetiminin sağlanmasında gerekli bir yaklaşım olduğu görülmektedir. Üst ölçek arazi kullanım kararlarından yapı üretimine kadar geçen tüm süreçlerde enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji potansiyeli konuları dikkate alınmalıdır. Enerji verimliliği faaliyetlerinin binaların inşa edilmesiyle sonlanmayacağı açıktır. Mevcut bina stokunun yenilenebilir enerji potansiyelinin ve enerji tüketim miktarlarının sürekli izlenmesi gerekir.

Arazi yönetimi, arazi ve arazi kaynaklarının çevresel ve ekonomik yönden sürdürülebilir kalkınma prensipleri çerçevesinde yönetimi ile ilgili faaliyetleri içerir [12]. Arazi yönetimi mevcut arazi politikaları çerçevesinde gerçekleştirilen yasal düzenlemeler ve kurulan idari yapılar sayesinde işlerlik kazanır. Sağlıklı arazi politikalarının oluşturulması için de nitelikli, doğru ve güncel arazi verisine ihtiyaç vardır [13]. Arazi yönetimi süreçleri için gerekli olan veriler arazi idare sistemleri tarafından üretilir, saklanır ve paylaşılır. Arazi idare sistemlerinin merkezinde kadastro, haritalama ve taşınmaz değerlendirme faaliyetleri yer almaktadır.

Enerji verimliliği çalışmalarının yoğunlaştığı temel sektörler arasında gayrimenkul sektörünün yer aldığı görülmektedir. Enerji verimliliği konusunun arazi yönetimi faaliyetleri çerçevesinde bütüncül bir yaklaşımla irdelenmesi bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı enerji verimliliği konusunu arazi yönetim paradigmasının çerçevesi içine almak ve mülkiyet bazlı sistemlerle enerji verimliliği uygulamalarının birlikte değerlendirilmesinin sağlayacağı yararları ortaya koymaktır.

Çalışma kapsamında öncelikle ülkemizde binalar için enerji verimliliği konusunun hukuki altyapısı ortaya

konulmuştur. Bilindiği üzere, arazi yönetimi ve enerji konularında geliştirilen politikalar yasal düzenlemeler sonucunda uygulamaya aktarılmaktadır. Bu nedenle, binalarda enerji verimliliği konusunda geliştirilen yasal mevzuatın kapsamı ve temel içeriğinin ortaya konulması önem taşımaktadır. İlgili yasal mevzuat çerçevesinde ele alınan en temel uygulama “Binalarda EKB” uygulamalarıdır. Çalışmamızda EKB uygulama süreçleri aktarılmış, EKB değerlendirme sürecinde kullanılan değerlendirme yazılımı BÉP-TR hakkında bilgiler sunulmuş ve EKB ile elde edilen temel bilgiler ortaya konulmuştur. Çalışmanın devamında “Binalarda Enerji Verimliliği” konusunun tek bir bina ölçeğinde ele alınmaması gerektiği hususu vurgulanarak bu konunun “Arazi Yönetimi Paradigması” çerçevesinde değerlendirilmesi gerekliliği üzerinde durulmuş, enerji ve arazi yönetim paradigmasının temel bileşenleri arasındaki ilişki açıklanmıştır. Bu bağlamda, EKB uygulama süreçlerine kadastral, çevresel ve meteorolojik veri setlerinin entegre edilmesi gerekliliği vurgulanmış, “Bina Enerji Bilgi Sistemi” kurulmasının önemi üzerinde durulmuştur. Avrupa’daki “Enerji Kadastrosu” adı altında gerçekleştirilen enerji bilgi sistemleri uygulamaları hakkında bilgi verilerek, benzer uygulamaların ülkemizde uygulanması ile elde edilebilecek faydalar aktarılmıştır. Çalışmanın sonunda ülkemizdeki EKB uygulamalarında tespit edilen eksiklikler paylaşılmış ve arazi yönetimi temelli çözüm önerileri sunulmuştur. Ayrıca “Bina Enerji Bilgi Sisteminin” kurulması konusunda yürütülmekte olan projeler kapsamında ülkemizdeki idari ve teknik olanaklar irdelenmiştir.

## 2 Türkiye’de enerji kimlik belgesinin temel özellikleri

Çalışma kapsamında bu bölümde, Türkiye’deki EKB uygulamaları incelenirken öncelikle yasal mevzuat araştırılmıştır. Yasal mevzuatta yer alan temel hususlar incelenmiştir. Sonrasında uygulama süreçleri aktarılmış, uygulamada yıllar içinde yapılan iyileştirmeler ifade edilmiştir. Ayrıca, EKB uygulamasının mevcut yapılaşma süreci içindeki yeri ve önemi üzerinde durulmuştur.

### 2.1 Türkiye’de binalarda enerji verimliliği konusunun yasal altyapısı

Enerji verimliliği hedeflerine ulaşmanın ilk adımı sağlam bir yasal altyapı oluşturmaktır. Bu çalışma kapsamında Türkiye’deki temel yasal çerçeve şu şekilde özetlenebilir;

- Enerji Verimliliği Kanunu (02.05.2007/5627 Sayılı Kanun).
- Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (05.12.2008/ 27075 Sayılı Resmî Gazete).

Ayrıca, Türkiye’de enerji verimliliği konusunda yayımlanmış ana strateji belgeleri şu şekilde listelenebilir;

- 2012 Enerji Verimliliği Stratejisi (2013-2023).
- Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (2017-2023).

Ülkemizde özellikle 2007’den itibaren enerji verimliliği konusunda somut yasal adımlar atılmıştır. Resmî Gazete’nin 02.05.2007 tarih ve 26510 sayısında yayımlanarak yürürlüğe giren 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu bu konudaki temel mevzuat bileşenini oluşturmaktadır [14]. 5627 Enerji

Verimliliği Kanunu birinci maddesinde bu kapsamdaki uygulamalarla “enerjiyi etkin kullanmak, israfı önlemek, enerji maliyetlerinin ekonomi üzerindeki yükünü hafifletmek, enerji kaynaklarının ve enerjinin kullanımında verimliliğin artırılması ve çevrenin korunması” amaçlandığı ifade edilmiştir.

Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği ise Resmî Gazete'nin 05.12.2008 tarih ve 27075 sayısında yayımlanarak 05.12.2009 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin temel amacı binalarda verimli enerji kullanımı sağlamak ve enerji israfının önüne geçmektir. İlgili yönetmeliğin 4.maddesinde enerji kimlik belgesinin; “*asgari olarak binanın enerji ihtiyacı ve enerji tüketim sınıflandırması, yalıtım özellikleri ve ısıtma ve/veya soğutma sistemlerinin verimi ile ilgili bilgileri içeren belgeyi*” ifade etmekte olduğu belirtilmiştir. Yönetmelikte enerji kimlik belgesinin düzenlenmesi, EKB'lerde bulunması gerekli bilgilerin ve EKB vermeye yetkili kuruluşlar hakkındaki konulara yer verilmiştir.

Türkiye, Enerji Verimliliği Strateji Belgesinde [15], 2011 yılı verilerine göre 2023 yılında Gayri Safi Yurt İçi Hasıla (GSYİH) başına tüketilen enerji miktarının en az %20 azaltılması, Ulusal Enerji Eylem Planında ise 2023 yılında Türkiye birincil enerji tüketiminin %14 oranında azaltılması hedeflenmiştir. Söz konusu belgelerde ortaya konulan hedeflerin gerçekleşmesinde binalarda enerji kimlik belgesi uygulamasının büyük katkısının olacağı düşünülmektedir.

Bu uygulamada, 1 Ocak 2011 tarihinden önce yapılan binalar mevcut bina, sonrasında yapılanlar ise yeni bina olarak tanımlanmıştır. Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği'ne [5] göre EKB uygulaması hakkındaki temel hususlar şu şekilde özetlenebilir.

- EKB sisteminde binaların enerji verimliliği sınıfı A'dan G'ye kadar sıralanmıştır. (Madde 26/f-ğ)
- A Sınıfı enerji verimliliği en yüksek binaları, G sınıfı ise en az verimli binaları ifade etmektedir.
- Yeni binalar için enerji performansı en az C sınıfında olmalıdır. (Madde 27/5)
- EKB BEP-TR yazılımı kullanılmak suretiyle verilir. (Madde 25/13)
- EKB düzenlenmeyen binalar yapı kullanma izni alamazlar. (Madde 25/4)
- EKB'nin binanın tamamı için hazırlanması zorunludur. İsteğe bağlı olarak kat mülkiyetinde bulunan her bir bağımsız bölüm için de ayrı ayrı düzenlenebilir. (Madde 25/8)
- EKB'lerin geçerlilik süresi 10 yıldır. (Madde 25/2)

## 2.2 Bina enerji performansı yazılımı (BEP-TR yazılımı)

Ulusal hesaplama modeline dayalı olarak geliştirilen “Bina Enerji Performansı Yazılımı” (BEP-TR), EKB uzmanları tarafından binaların enerji verimliliği performansını değerlendirmek ve EKB belgesi üretmek için kullanılmaktadır. BEP-TR yazılımı, binanın ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su ve aydınlatma sistemlerinin nihai ve yıllık birincil enerji tüketimlerini ve CO<sub>2</sub> salınım miktarını hesaplamaktadır.

Yazılımın ilk versiyonu BEP-TR1 olarak adlandırılmış ve bu versiyon 01.11.2017 tarihine kadar kullanılmıştır [14].

BEP-TR2 ile veri girişinde bazı yeniliklerin yapıldığı görülmektedir. Demirsoy'un [14] tez çalışmasında aktardığı yeniliklerden bazıları şunlardır;

- BEP-TR2 yazılımına bina bilgilerinin girişi manuel yapılmayacak, CAD ortamında yapılabilecek ve sabit bina geometrilerine göre veri girişi yapılması zorunluluğu ortadan kalkacaktır.
- İlgili yazılım Merkezi Nüfus İdaresi Sistemi (MERNİS), tapu bilgi sistemi, Ulusal Adres Veri Tabanı (UAVT), atlas harita sunucusu ve maliye sistemi ile bütünlüklü bir yapıda çalışabilecektir.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan 139 şehir merkezi dışındaki istasyon verileri de sisteme dahil edilecektir.

İlgili yazılımın ilk versiyonu olan BEP-TR1'de sadece binalar hakkındaki öznitelik bilgileri saklanmakta, sisteme koordinat bilgisi girilememekte ve sisteme veri kaydı sırasında adres bilgisi için bir kontrol mekanizması da bulunmamaktadır [16].

2015 yılında Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü tarafından yürütülen "Bakanlık Coğrafi Veri ve Üst Verilerin Güncellenmesi Projesi" kapsamında BEP-TR 1'deki adres kayıtları üzerinde yapılan çalışma sonucunda 83.743 adresin koordinatları elde edilebilmiş ve bu bilgiler ATLAS web-portal üzerinden sunulmuştur [16].

BEP-TR2 yazılımının Ulusal Adres Veri Tabanı (UAVT) ile ilişkilendirilmiştir. Bu durum sisteme adres verilerinin girilmesinde tutarlılık sağlayacaktır. UAVT, adres bilgilerini standart hale getirmek ve adrese dayalı kamu hizmetlerinin yürütülmesinde kolaylık sağlamak adına geliştirilmiştir. 3.07.2006 tarih ve 26245 sayılı Resmî Gazete 'de yayımlanarak yürürlüğe giren Adres ve Numaralamaya İlişkin Yönetmelik gereği binalarla ilgili çeşitli işlemlerde (yapı ruhsatı ve yapı kullanma izni işlemleri vb.) UAVT kullanılmaktadır.

Enerji kimlik belgesi üretilen binanın koordinatlarının tespiti için BEP-TR 2'de paylaşılan harita üzerinden binanın konumu işaretlenmelidir [17]. UAVT'de saklanan adres bilgileri koordinat verileriyle bağlantılı değildir. “Mekânsal Adres Kayıt Sistemi” projesi ile adres bilgilerinin koordinat bilgisiyle tanımlanabilmesi hedeflenmektedir.

Demirsoy [14] tez çalışmasında paylaştığı istatistiklere göre 14.02.2021 tarihine göre düzenlenen toplam 1.222.186 adet EKB'nin 655.091'i BEP-TR1 kullanılarak geriye kalan 567.095'i ise BEP-TR2 kullanılarak elde edilmiştir. BEP-TR2 kullanılarak düzenlenen EKB'lerin oranı yaklaşık %46,4'e tekabül etmektedir.

## 2.3 Enerji kimlik belgesinde bulunan temel veriler

BEP-TR Eğitim Kılavuzu [17] dokümanından da görülebileceği üzere “Enerji Kimlik Belgesi” üç sayfadan oluşmaktadır. İlk sayfada binayı tanımlamaya yönelik olarak ada/parsel/pafta numarası, UAVT Bina No ve adres bilgileri bulunmaktadır. Bunun yanında binanın enerji performansı ve emisyon sınıfı hakkında ayrıntılı bilgiler de bu kısımda yer almaktadır. İkinci sayfada binanın mimari bileşenleri hakkında bilgiler sunulmakta, üçüncü sayfasında ise binanın mekanik sistemlerine ait bilgiler paylaşılmaktadır.

Tablo 1'de görüldüğü gibi EKB tarafından sağlanan veriler bina verileri, binanın enerji performans verileri ve belge kimlik bilgileri olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. EKB vasıtasıyla yapı mimarisi ve mekanik sistem bilgilerine de erişebilmek mümkündür.

**Tablo 1.** Enerji kimlik belgelerindeki temel veriler

Bina Verisi	Enerji Performans Verileri	Belge Verileri
Bina Tipi	Enerji Performans Oranı	Veriliş Tarihi
İnşaat Ruhsat Tarihi	Sera Gazı Emisyon Oranı	Geçerlilik Tarihi
Toplam Alan	Yenilenebilir Enerji Kullanım Oranı	Belge Numarası
Ada-Parsel-Pafta No	Toplam Yıllık Enerji Tüketimleri	Performans Sınıfı
UAVT Bina No	Toplam Yenilenebilir Enerji	Emisyon Sınıfı
Adres	Kojenerasyon Fotovoltaik	Düzenleyen Kişi Düzenleyen Firma Sertifika No

Günümüzde yapı bilgi modellemesi ile bir bina tüm bileşenleri detaylı bir şekilde tasvir edilebilmektedir. Üretilen 3 boyutlu bina modeli daha sonraki aşamalarda kent bilgi sistemlerine entegre edilebilir. Coğrafi bilgisi sistemi uygulamaları ile EKB belgelerinden elde edilen verilerin sektörler arası kullanımının yaygınlaşması sağlanabilir. Mevcut veriler üzerinden gelişmiş analizler yapılabilir. Bu sayede, mülkiyet hakkı sahipleri, kiracılar, yerel yönetimler, kamu kurumları ve özel sektör mensupları faaliyetlerine ilişkin yararlı bilgiler elde edebilirler ve bu bilgileri karar alma süreçlerinde kullanabilirler.

#### 2.4 Enerji kimlik belgesi uygulamasının yapılaşma sürecindeki yeri

Ülkemizde, 3.5.1985 tarihli ve 3194 sayılı İmar Kanunu'nun [18] 21. Maddesi gereğince bu kanunun kapsamına giren tüm yapılar için belediye veya valiliklerden yapı ruhsatı almak mecburidir. Aynı kanunun 22. Maddesinde de ruhsat alma şartları açıklanmıştır. Verilen yapı ruhsatlarının geçerliliği de aynı kanunun 29 maddesinde bazı sürelerle bağlanmıştır. Yapıya başlama süresi ruhsat tarihinden itibaren iki yıldır. Yapı, başlama süresinden itibaren beş yıl içinde bitirilmediği takdirde ruhsat hükümsüz hale gelir. Bu durumda yeniden ruhsat talebinde bulunulmalıdır. İnşaat aşamasında ise yapının ruhsatına uygun bir şekilde inşa edilip edilmediği 29.6.2001 tarihli ve 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkındaki Kanun [19] hükümlerine göre bağımsız yapı denetim kuruluşlarınca denetlenmelidir. Yapı tamamen bitirildiğinde kullanılabilmesi için 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 30.maddesi gereğince yapı kullanma izni alınması gerekir. Yapı kullanma izin belgesinin alınması su ve elektrik gibi belediye hizmetlerden faydalanılması için önem taşımaktadır. Yeni binalarda yapı kullanım belgesinin alınabilmesi için enerji kimlik belgesine de sahip olunması gerekmektedir. EKB uygulaması bu anlamda yapılaşma

süreçlerinde önemli bir yerde durmaktadır. Şekil 1'de aktarılan süreç özetlenmiştir.



**Şekil 1.** Türkiye'de yapılaşma süreci

Demirsoy [14] tez çalışmasında 14 Şubat 2021 tarihi itibarıyla EKB'ye sahip bina sayısının 902.652'si yeni bina olmak üzere toplamda 1.222.186 adet olduğunu paylaşmıştır. Ayrıca ilgili çalışmada [14] yıllara göre EKB alan ve EKB'ye sahip bina yüzdesi incelendiğinde 2020 yılında 9.562.007 binanın 1.214.940 tanesini EKB'ye sahip olduğu görülmekte olup, EKB'ye sahip bina yüzdesi 2020 yılına kadar sadece %12,7 seviyelerindedir. Bu oran özellikle 1 Ocak 2011 tarihinden önce yapılmış mevcut binaların EKB sahipliğinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir.

Ülkemizdeki süreçte yapı kullanma belgesi alan binaların bağımsız bölümleri kat mülkiyeti kütüklerine kaydedilmektedir. Böylelikle her bir bağımsız bölüm üzerinde bireysel mülkiyet hakkı kurulabilmektedir. Yapı kullanma izni alınması sonrasında tapuda da cins değişikliği yapılarak süreç sonlandırılmış ve kat mülkiyeti kütüğünde her bir bağımsız bölümün kaydı gerçekleştirilmiş olmaktadır. Mülkiyet hakkının hem de mülkiyet hakkından doğan ekonomik hakların kullanılmasında, etkin ve izlenebilir taşınmaz piyasalarının oluşmasında, gayrimenkul yatırımlarının başarıya ulaşmasında yapılaşma sürecinin sağlıklı bir şekilde yürütülmesinin önemi büyüktür.

#### 3 Arazi yönetimi ve enerji verimliliği ilişkisi

Her toplumun gelişmişlik düzeyleri, sosyal ve kültürel yaşamları, hukuk gelenekleri, ekonomik öncelikleri gibi etkenler sebebiyle ülkeden ülkeye arazi yönetimi ile ilgili faaliyetler farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen Avrupa ülkelerinde ortak politika, strateji ve teknolojik çözümlerin arttığı açıkça görülmektedir [20]. Küreselleşme akımları ile birlikte bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmelerin etkisiyle ülkeler birbirlerinin tecrübelerinden rahatlıkla yararlanmaktadırlar [20].

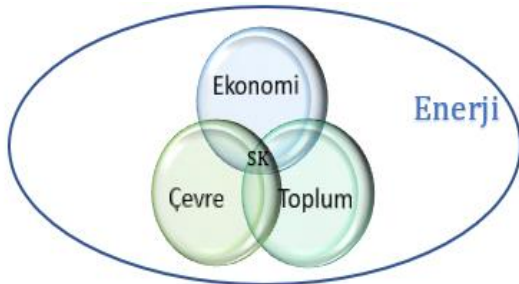
Günümüzde, arazi sınırlı ve tükenen bir kaynak olarak görülmekte ve sürdürülebilir kalkınma prensipleri içinde yönetilmesi zorunlu hale gelmektedir. 1987 yılında "Dünya Çevre ve Kalkınma Komisyonu" tarafından yayımlanan Brundtland Raporu'nda [21] sürdürülebilir kalkınma; "bugünün ihtiyaçlarının karşılanmasında gelecek nesillerin olanaklarını tehlikeye atmama" olarak ifade edilmiştir. 1992 yılında Brezilya'nın Rio kentinde gerçekleştirilen "Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı – Gündem 21" kongresinde kaynakların kullanılmasında ve yönetilmesinde sürdürülebilirlik prensibinin geçerli olduğu vurgulanmıştır

[22]. FIG [23], arazi yönetimi kavramını “arazi kaynaklarının kullanım ve gelişiminin yönetildiği süreç” olarak tanımlamıştır. Şekil 2’de görüldüğü üzere arazi yönetimi sürecinin sağlıklı bir şekilde ilerleyebilmesi için sağlıklı arazi politikalarına, sağlıklı arazi politikaları için ise güvenilir, doğru ve güncel arazi bilgisine ihtiyaç vardır [24].



Şekil 2. Arazi bilgisi, politikası ve yönetimi arasındaki karşılıklı ilişki

Sürdürülebilir kalkınma (SK) sadece ekonomik açıdan değerlendirilebilen bir kavram gibi algılsa da ekonomik faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde sosyal ve çevresel faktörlerin de dikkate alındığı bir yaklaşımı ifade etmektedir [25]. Arazi ve arazi kaynaklarının, eldeki sağlıklı, güncel ve doğru bilgiler ışığında sosyal-kültürel ihtiyaçların, çevresel etkileşimlerin ve elde edilecek ekonomik katkıların birlikte değerlendirilerek yönetilmesi gerekir. Bu karşılıklı ilişki içinde gizlenen en kritik öge ise enerji konusudur. Sürdürülebilir kalkınma prensipleri çerçevesinde gerçekleştirilecek faaliyetler için sürdürülebilir ve olumsuz etkileri azaltılmış enerji ihtiyacı göz önünde bulundurulmalıdır. Enerji tüm faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde ve yürütülmesinde zorunlu gereksinimdir. Özellikle son yıllarda iletişim ve bilgi teknolojilerindeki hızlı değişimlerle akıllı telefon ve internet kullanımının yaygınlaşması, bununla birlikte akıllı sistemlerin günlük yaşantımızda yer etmesi, sosyal ve kültürel aktiviteler için de gereksinim duyduğumuz enerji miktarını arttırmıştır. Bu kesişim kümesinde Şekil 3’te gösterildiği gibi enerji bileşeni vurgulanmalıdır.



Şekil 3. Sürdürülebilir kalkınma (SK) kesişim kümesi

Günümüzde hızlı kentleşme süreci sonucunda enerji talebi artışı, kontrolsüz doğal kaynak tüketimi, doğal afetlere karşı dayanıksız yapılaşma ve iklim değişikliği gibi sorunlar ortaya çıkmış ve arazi yönetimi kapsamında çözüm aranan öncelikli konular haline gelmiştir. 2015 yılında Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi’nde “Binyıl Kalkınma Hedeflerinin” devamı niteliğinde olan “Sürdürülebilir Kalkınma İçin 2030 Gündemi” kabul edilmiş ve 2030 Gündeminde 17 tane hedef belirlenmiştir [26]. Bu

hedefler arasında yer alan sağlıklı suya erişim, enerjiye kesintisiz erişim ve temiz enerji, sürdürülebilir şehirlerin oluşturulması, iklim değişikliği ile bağlantılı önlemlerin alınması konu başlıkları doğrudan arazi yönetimi kapsamındaki faaliyetlerle ilişkilendirilebilir.

Ülkeler için önemli ekonomik fonksiyonları olan kentlerin sürdürülebilir yaklaşımla çevre ve enerji sorunları dikkate alınarak yönetilmesi gerekmektedir. Günümüzde enerji kaynaklarının kullanımı çevreyi etkilemekte; hava ve su gibi doğal kaynakların kirlenmesi ile arazi gibi kısıtlı kaynakların bilinçsizce tahribatı ve biyoçeşitliliğin azalması sorunlarıyla karşı karşıya kalınmaktadır [27]. Bu bağlamda dünyada ekolojik kent, yeşil kent, düşük karbon kentler ve akıllı kentler gibi planlama yaklaşımları ortaya konulmaya başlanmıştır [28]. Bu yaklaşımlar incelendiğinde odağında enerji verimliliği hususunun yer aldığını görmek gerekir. Enerji etkin bina tasarımında; yer, konum, iklim, malzeme, yapı kabuğuna ilişkin özelliklerin en elverişli olanlarının seçimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının sağlanması amaçlanmaktadır [29]. Bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda enerji etkin binaların, geleneksel yöntemler kullanılarak inşa edilmiş binalara göre; %24-50 oranında enerji kullanımında verim sağlayabileceği, %33-39 oranında da sera gazı salınımında azalma elde edilebileceği belirtilmiştir [29].

Sürdürülebilir kalkınma prensiplerine uygun yaşam alanlarının oluşturulmasında çevre dostu, atık üretmeyen, enerji verimli, iklim değişikliğine dayanıklı yapıların inşa edilmesi teşvik edilmektedir. Bu bağlamda yeşil bina kavramı ortaya çıkmış ve dünyada birçok ülkede yeşil bina sertifikasyon sistemleri geliştirilmiştir. Yeşil bina sertifikasyon sistemleri yatırımcıları ve inşaat sektörünün paydaşlarını tasarım, inşaat ve işletme süreçlerinde çevreye duyarlı uygulamalara yer verilmesini sağlayan bir rehberlik hizmeti olarak düşünülebilir [30]. Başlangıçta kendi ülkelerinin konum, iklim ve yaşam koşullarını kıstas olarak geliştirilen ve İngiltere’de ortaya çıkan Enerji ve Çevre Dostu Tasarımda Liderlik (Leadership in Energy and Environmental Design, LEED) ve Amerika Birleşik Devletleri’nde ortaya çıkan Bina Araştırma Kurumu Çevresel Değerlendirme Metodu (Building Research Establishment Environmental Assessment Method., BREAM) değerlendirme sistemleri uluslararası alanda da diğer ülkeler tarafından kabul görmüş ve uygulanan sistemlere dönüşmüşlerdir [31]. Ayrıca, Dünya’nın çeşitli ülkelerinde kullanılan farklı yeşil bina sertifika sistemleri de mevcuttur. Kanada’da SBTOOL, Almanya’da DGNB, Avustralya’da GREEN STAR ve Japonya’da CASBEE sertifikasyon sistemleri kullanılmaktadır [31].

Ülkemizde Çevre Dostu Yeni Binalar Derneği tarafından yeni konut projelerinin değerlendirilmesi amacıyla B.E.S.T konut sertifika sistemi oluşturulmuştur. Ayrıca, Binalar ile Yerleşmeler için Sertifika Uygulama Tebliği yayımlanarak, Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Yeşil Binalar ve Yeşil Yerleşimlerin belgelenmesi için YeS-TR yazılımı geliştirilmiştir [32]. Yetkilendirilen uzmanlar tarafından bu yazılım kullanılarak Değerlendirme Kuruluşlarınca bu sertifikalar verilmektedir [32].

Belirtilen yeşil bina sertifikasyon sistemleri incelendiğinde yapıların puanlamasında birçok kriterin kullanıldığı görülmektedir. Kullanılan kriterler ve kriterlerin ağırlıkları sertifikasyon sistemleri arasında farklılıklar göstermektedir. Uluslararası bir özellik kazanmış olan LEED ve BREEAM sertifikalarındaki kriterler ve yüzdeleri **Tablo 2** 'de paylaşılmıştır [30]. İlgili kriterlere bakıldığında arazi kullanım kararlarına puanlamalarda yer verildiği görülmekte olup, bina ve çevre etkileşimine de dikkat edilmektedir.

**Tablo 2.** LEED ve BREEAM puanlama kategorileri [30]

LEED	BREEAM
İnnovasyon ve Bölgesel Öncelik (%10)	İnnovasyon (%10)
İç Ortam Çevre Kalitesi (%16)	Kirlilik (%12)
Malzeme ve Kaynaklar (%13)	Arazi Kullanım ve Ekoloji (%5)
Enerji ve Atmosfer (%33)	Atıklar (%13)
Su Verimliliği (%11)	Malzeme (%14)
Ulaşım ve Lokasyon (%16)	Su (%9)
Sürdürülebilir Alanlar (%10)	Ulaşım (%11)
	Enerji (%34)
	Sağlık ve Refah (%21)
	Yönetim (%20)
<b>Toplam 110 puan</b>	<b>Toplam 150 puan</b>

Enerji maliyetlerinin düşürülmesinde ve bina enerji performansını arttırıcı faaliyetlerin yönetiminde ve izlenmesinde yerel yönetimlere büyük görevler düşmektedir [27]. Alt ölçek planlama faaliyetlerinde yerleşim kurgusunun tasarımında ısıtma ve aydınlatma için harcanan enerjinin düşürülmesinde mevcut iklim özellikleri dikkat edilerek öncelikle pasif yöntemle enerji verimliliği sağlanmalıdır [28]. İmar parsellerinin düzenlenmesinde ve yapı nizamlarının belirlenmesinde binaların güneş ışığından faydalanmalarını azaltmayan ve yararlı rüzgâr etkilerini engellemeyen tasarımlar dikkate alınmalı ve dış iklim elemanlarına göre bina yönlendirmelerine dikkat edilmelidir [33]. Binaların çatı ve cephe elemanlarının tasarımında ve kullanılan malzemelerin seçiminde enerji performansının arttırılması da amaçlanmalıdır. Daha sonra yenilenebilir enerji potansiyellerinin analizi yapılarak aktif yöntem olarak ifade edebileceğimiz fotovoltaik sistemlerin kullanımına yönelik planlamalar gerçekleştirilmelidir. Sadece yalıtım uygulamaları ile enerji performansının arttırılabileceği düşünülmemelidir.

Kent planlamasında konutlarda yaşayanların iş ve günlük aktivitelerinin sürekliliğini ve kalitesini koruyacak enerji ihtiyaçları belirlenmelidir. Bina özelliklerine göre yenilenebilir enerji üretim metotları belirlenmeli ve binalarda üretilen enerjinin kullanılacağı sistemlerin tasarlanması düşünülmelidir. Tüm bu süreçte mülkiyet verisi ile ilişkilendirilmiş bir bina enerji bilgi sisteminin varlığı önem kazanmaktadır. Bağımsız bölüm sahiplerinin ya da kiracıların tüketim alışkanlıklarını değiştirecek teşvik ve önlemlerin alınmasının yanında, enerji üretimi ile ekonomik kazanç elde edilmesi de mümkün olabilecektir. Belediyelerin imar yönetmeliklerinde enerji verimli bina tasarımına yönelik kriterlerin yanında kaynak tasarrufunu sağlayacak

sistemlerin kullanılmasına yönelik düzenlemelere de yer verilmelidir. Yerel olanakların değerlendirildiği, yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik edici bir planlama süreci oluşturulmalıdır.

Ayrıca, yerleşim kurgusu yapılırken kent içi ulaşım da enerji tüketimini azaltacak önlemlerin alınmasına da dikkat edilmelidir. Bu bağlamda, elektrikli ulaşım araçlarının kullanımının arttırılmasına yönelik çalışmalara ağırlık verilmelidir. Ayrıca, elektrikli taşıtlar için gerekli dolun istasyonlarının yerlerinin tespiti de planlama süreçlerinde dikkate alınmalıdır.

Bu süreçlerin yönetimi ve izlenmesi için coğrafi bilgi sistemlerinden yararlanılmalıdır. Planlama aşamasında binaların enerji verimliliğinin sağlanmasında farklı ölçeklerde mekânsal analizlerin gerçekleştirilebileceği bir yapı oluşturulmalıdır. Ayrıca, enerji verileri, iklim, topografya ve mülkiyet verileri ile ilişkilendirilmeli ve her türlü kentsel planlama faaliyetinde kullanılacak doğru, güncel ve güvenilir veriler bir bilgi sistemi içinde saklanmalı ve paylaşılmalıdır.

### 3.1 Arazi idare sistemleri ve organizasyonu

Arazi idare sistemleri, arazi yönetimi süreçlerinde ihtiyaç duyulan mülkiyet, arazi kullanımı ve arazi değeri verilerini kaydeden ve paylaşan sistemler olarak tanımlanmaktadır [34]. İlgili tanımdan da anlaşılacağı üzere, **Şekil 4**'te paylaşıldığı gibi mülkiyet, değer ve kullanım verileri arazi idare sistemlerinin üç temel bileşeni oluşturmaktadır [13]. Arazi idare sistemlerinin temelinde; tapu-kadastro, taşınmaz değerlendirme, haritalama ve planlama faaliyetleri bulunmaktadır. Bu faaliyetler sonucunda elde edilen veriler, bir bilgi sistemi içinde bir araya getirilmektedir.



**Şekil 4.** Arazi idaresinin üç temel özneliği

Arazi idare sistemleri sadece farklı kaynaklardan gelen verilerin bir arada tutulduğu veri tabanları olarak görmemek gerekir. Arazi idare sistemleri insanların veriye erişimini sağlayan politikaları, teknolojileri, iş süreçlerini, yetkileri, standartları ve paylaşım ilkelerini tanımlayan bir yapıdır [35].

Dünya genelinde, taşınmazlara ilişkin mülkiyet, değer ve kullanım bilgilerinin üretilmesi, saklanması ve paylaşımı kadastral faaliyetlerin kapsamı içerisinde yer almaktadır. Dünya'da farklı kadastral sistemler olmakla birlikte, ülkemizde kadastronun amacı taşınmazların geometrik ve hukuki durumlarının tespiti sonucunda medeni kanunumuzun öngördüğü tapu sicil sisteminin kurulmasıdır.



Coğrafi Bilgi Sistemlerinin sahip olduğu araçlar sayesinde arazi idare sistemlerinin tasarımı ve kullanımı daha etkin hale gelmiştir. Özellikle WEB-CBS uygulamaları ile arazi yönetimine ilişkin gerekli bilgilerin bütüncül ve koordineli bir şekilde kullanılması ve paydaşlar arasında iletişimi kolaylaştırmıştır. Bu yapının başarılı bir şekilde sürdürülebilmesi için uygun veri altyapılarının oluşturulması ve veri değişim modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

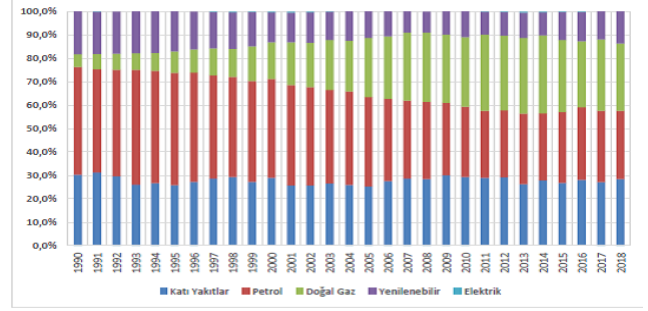
Etkin arazi kullanım planlaması ve verimli arazi pazarlarının oluşması için taşınmazlar üzerindeki mülkiyet haklarının tanımlanarak güvence altına alındığı bir tapu kadastro sistemine, taşınmazların değerlerine, mevcut arazi kullanım ve yapılaşma verilerine ihtiyaç vardır [20]. Bir coğrafi bilgi sistemi altyapısı içinde bu verilerin konumsal verilerle ilişkilendirilmesi ve ilişkilendirilen verilerin etkin analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi ve paylaşılabilirliği gerekir. Bu verilen üretilmesi, saklanması ve paylaşımında veri eksikliğinin ve veri tekrarının önüne geçilebilmesi için standardizasyon çalışmalarının yapılması arazi idare sistemlerinden beklenen faydaların sağlanması için zaruri şarttır.

Arazi idare sistemleri, arazi kullanımı, doğal kaynakların yönetimi ve enerji verimliliği faaliyetleri konusunda arazi sağlıklı arazi politikalarının oluşturulmasını sağlarken, arazi yönetimi performansının hesaplanması ve takip edilebilir olmasına da yardımcı olur. Bu bağlamda, binalarda enerji verimliliğine ilişkin bilgilerin toplandığı ve değerlendirildiği EKB uygulamasının bu sisteme entegrasyonu ülke ekonomisine oldukça büyük kazançlar sağlayacaktır. Enerji verimliliğinin günümüzde arazi pazarlarına ve arazi kullanım planlamaları konularına doğrudan etki edeceği aşikardır. Enerji planlama faaliyetlerinde ihtiyaç duyulan en kritik veriler arazi idare sistemleri vasıtasıyla elde edilebilir.

### 3.2 Türkiye'nin enerji ve sera gazı emisyonu istatistikleri

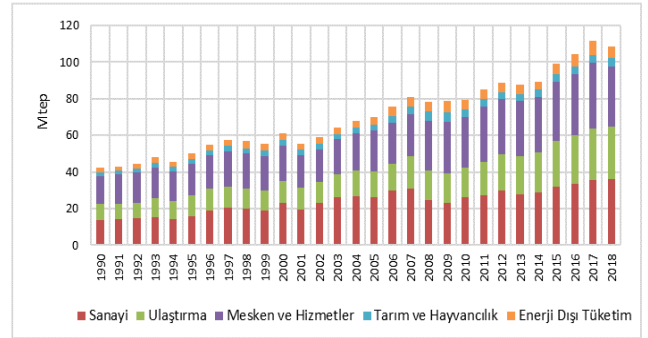
Gelişmiş ülkelerin ekonomik faaliyetlerini sürdürebilir kılması; gelişmekte olan ülkelerin de kalkınma hamlelerini gerçekleştirmesi için dünyada enerji ihtiyacı sürekli olarak artmaktadır [14]. OECD'nin 2012 yılına ait "OECD 2050'ye Çevresel Bakış" (Environmental Outlook to 2050) adlı yayınında, dünya ekonomisinin 2050 yılına kadar yaklaşık 4 kat büyüyeceği ve enerji ve doğal kaynak ihtiyacının günümüze oranla %80 artacağı öngörülmektedir [36].

Türkiye'nin birincil enerji tüketiminde ağırlıklı olarak kömür, petrol ve doğalgaz kaynaklarının kullanıldığı bilinmektedir. Türkiye'nin 1990 yılında 52,465 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) olan birincil enerji tüketimi 2018 yılında 143,666 Mtep'e ulaşmıştır [37]. 2018 yılı itibarıyla Türkiye'nin birincil enerji tüketiminin %28,4'sini katı yakıtlar oluştururken, petrol ve petrol ürünlerinin payı %29,2 ve doğalgazın payı ise %28,7'dir [37]. Şekil 5'te görüleceği üzere ülkemizde yıllar içinde katı yakıtların ve petrolün oranı düşerken doğalgazın kullanım oranı artmıştır. 2017 yılı itibarıyla AB-28 ülkelerinde yakıtlara göre birincil enerji tüketiminde ilk sırayı %34,8 oranla petrol ve petrol ürünleri alırken, bunu sırasıyla %23,8 ile doğalgaz, %18,3 ile katı yakıtlar, %13,9 ile yenilenebilir enerji ve %12,6 ile nükleer enerji kullanımı takip etmiştir [37].



Şekil 5. Türkiye'nin yakıtlara göre birincil enerji tüketimi 1990-2018 [37]

Şekil 6'da Türkiye'nin yıllar itibarıyla sektörlere göre nihai enerji tüketimi paylaşılmıştır. Türkiye'deki ekonomik büyümenin nihai enerji tüketiminde artışlara neden olduğu ifade edilebilir. 2018 yılında nihai enerji tüketiminde %33,4'lük oranla sanayi sektörü en fazla paya sahip iken mesken ve hizmet sektörünün %30,5'lik, ulaştırma sektörünün ise %26,2'lik payları olduğu görülmektedir [38]. AB-28 ülkelerinde ise 2017 yılında en fazla payı %32 ile ulaştırma sektörü almış, konut sektörünün payı %27,6 iken sanayi sektörünün payı ise %25,7 olmuştur [38].



Şekil 6. Türkiye'nin sektörlere göre nihai enerji tüketimi 1990-2018 [38]

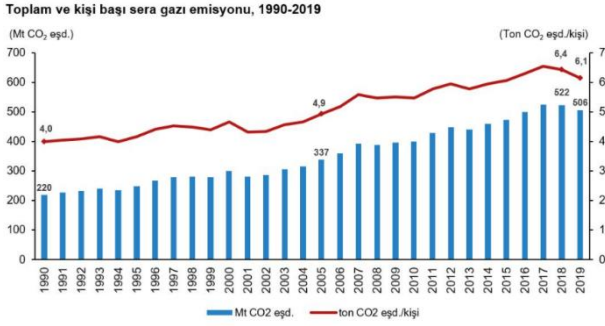
Sanayileşme süreci, hızlı nüfus artışı, yaygınlaşan ve çeşitlenen ticari faaliyetlerin etkileriyle dünyadaki sera gazı miktarı oldukça artmıştır. Karbon içerikli fosil yakıtların yaygın olarak kullanılmasının yanında arazi kullanımındaki eğilimlerin ve değişimlerin de sera gazı salınımının artmasında etkili olduğu bilinmektedir. Sera gazı miktarının artışı küresel ısınmayı tetiklemekte ve küresel iklim değişikliğine neden olmaktadır.

Küresel ısınmayı etkileyen sera gazları arasında karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), diazotmonoksit (N<sub>2</sub>O) ve F-gazları örnek verilebilir. Ülkemizde sera gazlarından CO<sub>2</sub> salınımı oldukça fazladır. Bunun temel nedeninin karbon içerikli yakıt kullanımı olduğu söylenebilir. Tablo 3'de de ülkemizin son on yıllık sürede yıllara göre sera gazı salınımı toplamı ve CO<sub>2</sub> salınım miktarları paylaşılmıştır [39].

**Tablo 3.** Türkiye’de yıllara göre sera gazı salınımı (2010-2019) TUİK

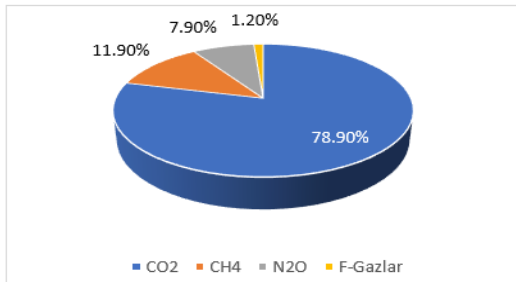
Yıl	Total	CO <sub>2</sub>
2010	399.1	314.4
2011	428.1	339.5
2012	447.6	353.7
2013	439.7	345.2
2014	459.0	361.7
2015	473.3	381.3
2016	498.9	401.2
2017	525.0	425.3
2018	522.5	419.4
2019	506.1	399.3

Şekil 7’de ise 1990 – 2019 yıllarını kapsayan aralıkta toplam ve kişi başı sera gazı emisyonları grafiği sunulmuştur [40]. 1990 yılında 4 ton CO<sub>2</sub> eşdeğer kişi başı toplam sera gazı salınımı görülürken, 2019 yılında bu miktar 6,1 ton CO<sub>2</sub> eşdeğer olarak tespit edilmiştir.



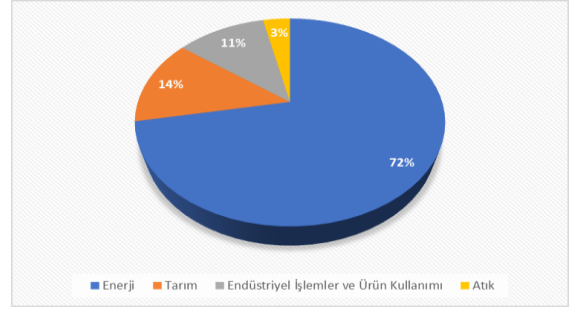
**Şekil 7.** Toplam ve kişi başı sera gazı emisyonları, 1990-2019 [40]

Şekil 8’de ülkemizde 2019 yılında gazlara göre emisyon oranları paylaşılmıştır [40]. CO<sub>2</sub> gazının %78,9 oranla en fazla salınımına sahip olduğu görülmekle birlikte bunu %11,9 oranla CH<sub>4</sub> ve %7,9 oranla N<sub>2</sub>O gazları takip etmektedir. Ülkemizde CH<sub>4</sub> ve N<sub>2</sub>O salınımlarının ana kaynağının tarımsal faaliyetler olduğu söylenebilir [40].



**Şekil 8.** Sera gazı emisyon oranları, 2019 [40]

Şekil 9’da paylaşılan TUİK verilerine göre 2019 yılında toplam sera gazı salınımında ilk sırayı %72’lik bir oranla enerji kaynaklı emisyonlar almaktadır, ikinci sırada %13,4’lük oran ile tarım yer almaktadır. İlgili sıralamayı, %11,2’lik oranla endüstriyel işlemler- ürün kullanımı ve %3,4’lük oranla atık sektörü takip etmektedir [40].



**Şekil 9.** Türkiye’de sektörlere göre sera gazı emisyon oranları 2019 [40]

Ulusal enerji verimliliği eylem planı [3] çerçevesinde Türkiye’nin 2023 yılına kadar 10,9 milyar ABD doları yatırımla 23.9 Mtep tasarruf sağlaması öngörülmektedir. Bu yatırımlar sonucunda 2033 yılına kadar 30,2 milyar ABD doları tasarruf sağlanması beklenmektedir.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İklim Değişikliği İle Mücadele Sonuç Bildirgesi’ne göre ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim miktarı arttırılacak olup, 2030 yılına kadar güneş enerjisinden elektrik üretimi 10 GW, rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi ise 16 GW kapasitesine çıkarılacaktır [41]. Aynı raporda ayrıca 2023 yılında binalarda kullanılan fosil yakıtların %25 oranında azaltılacağı, 2030 yılına kadar tüm binalarımızın “Enerji Kimlik Belgesi” sahibi olacakları da aktarılmıştır [41]. Binalarda enerji performansı faaliyetleri ile binalarda enerji tüketiminde %50’ye varan oranlarda tasarruf sağlanabileceği öngörülmektedir [42].

Ülkemizdeki binalarda enerji tüketim oranı ve tüketilen enerji kaynaklarına bakıldığında, binalarda enerji performansı faaliyetlerinin çevrenin ve doğal kaynakların korunmasının yanında ülke ekonomisine büyük katkısının olacağı açıkça görülmektedir [42].

### 3.3 Türkiye’nin kentleşme sorunları ve enerji verimliliği konusu

Ülkemizde Dokuzuncu Kalkınma Planı 2010’da kentlerde sürdürülebilir gelişmenin sağlanması ana hedef haline gelmiştir. Bu bağlamda Bütünleşik Kentsel Gelişme Stratejisi ve Eylem Planı (2010-2023), 04.11.2010 tarihinde 27749 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Kentsel Geliştirme Stratejisi (KENTGES) [43] raporunda geçmişten günümüze devam eden sorunlara değinilmiş ve acil gündeme alınması gerekli konular belirtilmiştir. İlgili belgede, günümüzde varlığını ve olumsuz etkilerini devam ettiren kentlerdeki kontrolsüz büyüme, kaçak yapılaşma, afetlere dayanıksız yerleşim, kentsel altyapı ve çevre sorunlarının yanında iklim değişikliği, kentsel dönüşüm ve enerji verimliliği gibi acilen ele alınması gereken konular üzerinde durulmuştur. Ortaya konulan sorunlar ülkemize büyük ekonomik yükler getirmektedir.

Üst ölçekten alt ölçeğe planlama faaliyetleri mülkiyet hakları ve bu haklarla ilişkili ekonomik hayatı etkileyen en temel süreçlerdir. Sağlıklı, güvenilir ve doğru bilgiden yoksun planlama faaliyetleri ile planlama genel ilkelerine aykırı kontrolsüz bir yapılaşma süreci sürdürülebilir

kalkınma hedeflerine ulaşmada engel teşkil edecektir. Enerji verimliliği konusu çerçevesinde de durum incelendiğinde, plansız ve çarpık kentleşme gerekli altyapı hizmetlerinin sunulmasını zorlaştırmanın yanında enerji maliyetlerini oldukça artmaktadır. Ayrıca, bu durum, sağlıklı enerji politikalarının oluşturulmasını ve bu politikaların etkinliğinin takibini engellemektedir. Yerel ve bölgesel ölçekte planlama süreçlerinde iklime duyarlı, enerji verimliliği yüksek yaşam alanları oluşturmak ana hedefler arasında olmalıyken, kaçak yapılaşma ve beraberinde getirdiği mülkiyet sorunlarının çözümü ile uğraşmak zaman ve mali kayıplara neden olmaktadır.

Geçmişte, hızlı sanayileşme sürecinde köyden kente göçler artmış, kentlerdeki yaşam yoğunluğunun ihtiyaçlarını karşılayabilecek hizmetlerin sunulmasında sıkıntılar ortaya çıkmıştır. Buna bağlı olarak, kaçak ve afete dayanıksız yapılaşma yoğunluğunun arttığı görülmüştür. İmar planlarında getirilen kurallara aykırı yapılaşma, uluslararası standartlarda kabul görmüş kentsel yaşamın gelişimine engel teşkil etmiştir. Ayrıca, ülkemiz, topoğrafik, tektonik ve iklim özellikleri bakımından afetlere duyarlı bir bölgede yer almaktadır. İklim ve afetlere duyarlı kentlerin planlaması yaşamsal risklerin önüne geçilmesinde oldukça önemlidir. Kentlerimizde karşılaşılan bu sorunların çözümü için kentsel dönüşüm faaliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda gerçekleştirilen yasal düzenlemelerin arasında 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun öne çıkmaktadır. İlgili kanunun birinci maddesinde de ifade edildiği üzere, “*afet riski altındaki alanlar ile bu alanlar dışındaki riskli yapıların bulunduğu arsa ve arazilerde, fen ve sanat norm ve standartlarına uygun, sağlıklı ve güvenli yaşama çevrelerini teşkil etmek üzere iyileştirme, tasfiye ve yenilemeler...*” amaçlanmaktadır. Kanunun öngördüğü kentsel dönüşüm uygulamalarının kapsamına, rezerv yapı alanları, riskli alanlar ve riskli yapılar girmektedir [44]. Riskli yapıların belirlenen riskli alanlar içinde olması zorunlu değildir. Afet alanları içinde olmayan fakat ömrünü tamamlamış ve teknik incelemeler sonucunda yıkılma riski taşıdıkları tespit edilen binalar da bu kanun uygulaması içinde yer almaktadır [44].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın ifade ettiği bilgilere göre Türkiye'deki yapı stoğunun yaklaşık %40'ının yenilenmesi ya da güçlendirilmesi gerekmektedir [29]. Kentsel dönüşüm faaliyetleri enerji etkin binaların inşa edilmesinde önemli bir fırsat olarak karşımıza çıkmaktadır. Kentsel dönüşüm faaliyetlerinin sadece parsel bazında bina yenileme faaliyetleri olarak görmeyip, mümkün mertebe mahalle ölçeğinde uygulanmasıyla iklim değişikliğine karşı dayanıklı ve enerjinin etkin kullanıldığı ve yenilenebilir kaynaklar vasıtasıyla üretilebildiği yaşam alanları oluşturulması sağlanmalıdır [29].

T.C. Kalkınma Bakanlığı 11. Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporunda [45], ülkemizin enerjide dışa bağımlı olduğu göz önünde bulundurularak kentsel planlamada pasif iklimlendirme stratejilerinin etkin bir şekilde kullanılması, parselasyon planları hazırlanırken yapıların güneşten azami oranda yararlanabileceği şekilde tasarımların yapılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının yapı konut sektöründe kullanılmasının yaygınlaştırılması ve yeşil bina sertifikalı

konutların yapımının teşvik edilmesi hususlarının vurgulandığı görülmektedir.

### 3.4 Enerji kadastro yaklaşımı ve Dünya'daki uygulamaları

Günümüzde kadastro sadece mülkiyet hakkını güvence altına alan bir sistem olarak görülmemektedir. Bilgi teknolojilerindeki gelişmeler doğrultusunda kadastro, araziye ilişkin birçok veri setini içine alabilen ve veri setlerini birbirleri ile ilişkilendirebilen çok amaçlı bir yapıya dönüşmektedir. Binalarda enerji verimliliği konusunun kadastro sistemi ile bütünleştirilmesiyle, iklim değişikliğine karşı direnci arttıracak ve enerji verimliliği faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini sağlayacak mülkiyet bazlı bir bilgi sistemi kurulabilecek, kent ölçeğinde mevcut bina envanterinin enerji üretim ve tüketim miktarları ölçülebilecek, enerji ihtiyaçları tespit edilebilecek ve yenilenebilir enerji potansiyeli ortaya koyulabilecektir.

Taşınmaz mülkiyeti ile arazi ve arazi kaynaklarından yararlanmanın kuralları tanımlanabilmekte, denetim ve takip mekanizmaları kurulabilmektedir. Hernando De Soto [46], “*Sermayenin Sırrı*” adlı eserinde, mülkiyet kaydı ile bilginin tek bir sistemde tutulabildiğini, evrensel olarak bilgiye erişimin kolaylaştığını, farklı yatırım potansiyellerinin ortaya çıkabildiğini, insanların sistem içinde görünür kıldığını ve işlemlerin kontrol altına alınabildiğini aktarmıştır.

Arazi piyasalarının oluşmasında, izlenmesinde ve gelişiminde mülkiyet hakkının tanımlı olması ve devlet güvencesi altında korunması oldukça önemlidir. Enerji verimliliği yakın dönemde arazi piyasalarını şekillendirecek ve yenilikler katacak bir konudur. Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji üretimi konularında etkin finansal teşvik ve destek programlarının oluşturulması, yapılan faaliyetlerin denetimi ve takibinin yapılabilmesi, elde edilen sonuçlara göre sağlıklı kararların alınabilmesi taşınmaz mülkiyeti sistemine entegre bir yapı ile daha kolay olacaktır.

Literatürde “Enerji Kadastro” olarak adlandırılan çalışmaların merkezinde binaların enerji potansiyelini belirleyerek güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması yer almaktadır [6]. Güneş enerjisi ile karmaşık bir teknoloji gerekmeden yerel imkanlarla binalarda ısı verimliliğinin sağlanabilmesi, sıcak su ve elektrik enerjisi elde edilmesi mümkündür [33]. Binalar pasif ve aktif yöntemlerle güneş enerjisinden yararlanabilmektedir. Pasif yöntemde binaların konum, yön ve formunun tasarlanmasıyla güneş ışığından verimli bir şekilde faydalanılması sağlanırken aktif yöntemde belirli aygıtlar kullanılarak depolanan güneş enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi söz konusudur [47]. Aktif yöntemlerin içinde yer alan yaygın uygulamalar arasında Fotovoltaik (PV) sistemlerin kullanımı yer almaktadır.

Fotovoltaik (PV) modüller, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen aygıtlardır. Binaların çatısında ve cephelerinde kullanılabilen PV panellerin performansları değerlendirilerek, her bina için uygun bir çözüm geliştirilebilmektedir [47]. PV sistemleri ile çevreye sera gazı salınmamakta, temiz bir enerji elde edilmektedir.

Bazı gelişmiş ülkelerde üç boyutlu kent modelleri kullanılarak mevcut binaların enerji tüketimini azaltıcı önlemler alınabilmekte ve enerji verimliliği konusunda yapılacak yatırımların kullanıcılara ve maliklere sağlayacağı ekonomik katkılar hakkında veriler paylaşılabilir.

Şahin [6], Bieda ve Cienciala [48] çalışmalarında Dünya'daki yenilenebilir enerji – enerji kadastro faaliyetleri hakkında bilgiler paylaşmışlardır. Tablo 4'te ilgili çalışmalardan seçilen bazı örnek uygulamalara yer verilmiştir. Bu uygulamalarda ağırlıklı olarak fotovoltaik (PV) sistemlerin kullanım olanaklarının tespit edildiği görülmektedir. Enerji kadastro uygulamalarının temel özelliklerine bakıldığında LİDAR tekniği ile oluşturulmuş 3 boyutlu kent modellerinin kullanılabilirliğini, güneş enerjisi kullanımına yönelik mekânsal analizlerin yapılabilirliğini, potansiyel enerji verimliliği, CO<sub>2</sub> tasarruflarının miktarları yanında ekonomik verilerin aktarılabilirliği görülmektedir. Böylelikle enerji verimliliği piyasasındaki tüm paydaşlar sağlıklı ve nitelikli bilgiye ulaşabilmekte, yatırımcıların ve ihtiyaç sahiplerinin birbirleri ile iletişime geçebilecekleri bir ortam sağlanabilmektedir.

Ülkemizdeki EKB üretimi sırasında, binaların yenilenebilir enerji kullanım potansiyelleri de araştırılmakta ve ilgili belgede özellikle fotovoltaik kullanım olanakları hakkında bilgilere yer verilmektedir. EKB uygulamalarına ilişkin yasal düzenleme öncesi inşa edilen ya da yeni inşa edilecek binalarda güneş enerjisi kullanım olanakları CBS ortamında çevresel, topoğrafik ve meteorolojik veriler kullanılarak rahatlıkla elde edilebilir. Böylelikle, binaların buldukları konum ve çevresindeki koşulların da mekânsal olarak analiz edildiği EKB üretim süreçleri tasarlanabilecek ve üretilen EKB'ler bir arada tutulabilecektir. Bu yapı ayrıca, yeni enerji performans hesap metodlarının geliştirilmesi için de kullanılabilir. Avrupa'da örneklerini paylaştığımız enerji kadastro benzeri uygulamalarla dinamik bir yapı elde edilmiş olacak, sistem üzerinden güncel durum rahatlıkla takip edilebilecek ve istenilen zaman aralıklarına ilişkin enerji verimliliği performanslarına erişilebilecektir. Ayrıca sektörler bu bilgilerin paylaşımına olanak sağlayacak, enerji verimliliği sektöründe faaliyet gösteren kamu ve özel sektör kuruluşlarının maliklere erişimi kolaylaşacaktır.

**Tablo 4.** Avrupa'da bazı enerji kadastro uygulamaları

Proje İsmi	Temel özellikleri
<b>Fotovoltaik Coğrafi Bilgi Sistemi (PVGIS)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- AB Bilim Merkezi tarafından web üzerinden sunulan bir portaldır.</li><li>- Ülkeye veya bölgeye göre, güneş kaynaklarının ve PV potansiyellerinin gösterildiği bir uygulamadır.</li><li>- Özellikle Avrupa ve Afrika kıtalarını kapsamına alan bir uygulama olmakla birlikte Asya ve Amerika'nın büyük bir kısmı da proje kapsamına dahil edilmiştir.</li><li>- Fotovoltaik veya güneş-thermal sistemlerinin kurulumu için çatı alanlarının uygunluğunu belirler.</li></ul>
<b>Güneş Kadastro- Hannover (Almanya)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- 3D lazer tarama verileri kullanılarak geliştirilmiştir.</li><li>- Kadastro ile entegre olan verimlilik hesaplama uygulaması, olası üretim ve tasarrufları tahmin etmek için enerji tüketimi ve kullanım davranışı hakkında mevcut bilgileri ve bireysel girdileri kullanmaktadır.</li><li>- PV için modül alanını, sistem çıktısını, potansiyel enerji/ısı verimini, olası CO<sub>2</sub> tasarruflarını, yıllık tasarrufları, gösterge maliyetlerini hesaplar.</li></ul>
<b>Londra Güneş Olanakları Haritası (İngiltere)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Londra merkezi ve çevresindeki binalarda ve açık arazilerde hem fotovoltaik güneş panelleri hem de güneş-thermal sistemlerinin kurulum potansiyellerini tahmin etmektedir.</li><li>- LİDAR verilerinden oluşturulan 3D modeller kullanılmaktadır.</li><li>- Hem çatı hem de zemin seviyesinde panellerden üretilebilecek elektrik miktarının tahminini sağlar. m<sup>2</sup> başına ortalama potansiyeli, tahmini uygulanabilir alanı, karbon tasarrufunu, yüzeye göre potansiyeli belirler.</li></ul>
<b>Amsterdam Şehri Etkileşimli Haritalar (Hollanda)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Belirli bir durumda güneş panellerine yatırım yapmanın faydalarını ve yatırımın geri ödeme süresini gösteren bir hesaplama modülü sağlar.</li><li>- Belirli bir çatının, hangi bölümünün güneş panellerinin montajına ve güneş enerjisi üretimine uygun olduğunun ve ne kadar enerji üretilebileceğinin (renklerle) belirtir.</li></ul>
<b>Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritaları/Warşova Şehri (Polonya)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Binaların çatılarına düşen güneş enerjisi miktarına ilişkin verileri yıllık ve aylık olarak sunar.</li><li>- Çizilmiş bir alanın güneş potansiyelini gösterme imkânı sağlar.</li></ul>
<b>Güneş Kadastro - Bremen: (Almanya)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bina seçimi yapıldığında binaya ait adres, ev tipi, konut sakinlerinin sayısı, güç tüketimi, brüt elektrik fiyatı hesaplanabilmektedir.</li><li>- Seçilen binanın güneş thermal sistemlerine ihtiyacı olup olmadığını tespit eder.</li></ul>
<b>Güneş Kadastro - Hamburg: (Almanya)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Hamburg Energie tarafından çatılardaki güneş sistemi planlanmakta, finanse edilmekte ve kurulumu yapılmaktadır.</li><li>- Bina ihtiyaç fazlası miktarı belirlenen fiyattan ortak kamu şebekesine satabilmektedir.</li></ul>

## 4 Bulgular ve tartışma

### 4.1 Yapılaşma sürecinde enerji kimlik belgesi faaliyetlerinin yeniden organizasyonu ihtiyacı

EKB'nin yapı kullanma izni aşamasında gerekli görülen bir belge olması ilgili uygulamadan istenen düzeyde sonuçlar alınmasının önünde bir engeldir. EKB'nin yapılaşma süreçlerinde alınması gerekli olan bir belgenin ötesinde fonksiyonlara sahip olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Yapı ruhsatı alınabilmesi için binaya ilişkin mimari proje, mekanik tesisat projesi ve elektrik projesi gibi projelerin ilgili idareye sunulması gerekir. Bu aşamada enerji verimliliği uygulamasına ilişkin ön bir sertifika alınarak idareye sunulmalıdır. Bu aşamada binaya ilişkin projeler enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kullanımı potansiyeli açısından değerlendirilebilir. Akın ve Kaplan'ın [9] çalışmalarında da belirttikleri üzere çeşitli senaryolar ortaya konularak yapılacak analizler sonucunda enerji verimliliği konusunda en uygun çözüme ulaşılabılır. Böylece, inşaat sürecinin öncesinde mevcut projede iyileştirmeler gerçekleştirme olanağı sağlanmış olacaktır. Ayrıca binaların yapıldıktan sonra C sınıfı altında bir enerji performansına sahip olması riski ortadan kalkmış olacaktır.

Yapı ruhsatı başvurusunda EKB ön sertifika işleminin gerçekleştirilmesinin söz konusu olduğu durumda enerji verimliliği danışmanlık şirketlerinin de önemi artacaktır. Hazırlanan mimari ve teknik proje enerji verimliliği şirketleri tarafından değerlendirilerek projede enerji performansının artırılması adına iyileştirme çalışmaları yapılabilir. Yapı ruhsatı başvuru sahiplerinin talebi doğrultusunda söz konusu danışmanlık şirketinin denetiminde inşaat faaliyetleri sürdürülebilir. Böylelikle sadece yapının kullanımı esnasında değil inşaat faaliyetleri gerçekleştirilirken de enerji verimliliğine önem verilen bir sistem oluşturulmuş olur. Yapı Kullanma İzin belgesi başvurusunda ise nasıl binanın ruhsatına uygun olarak yapıp yapılmadığı kontrol ediliyorsa, binanın sahip olduğu EKB ön sertifikasında belirtilen enerji performans özelliklerini taşıyıp taşımadığı kontrol edilerek süreç tamamlanabilir. Şekil 10'da yukarıda ifade edilen sistem özetlenmiştir. Bu süreçte konut yapıları için enerji danışmanlık şirketlerinin ön etüdü ve onayı zorunlu tutulmayacaktır.

23.6.1965 tarihli ve 634 sayılı Kat Mülkiyeti Kanunu'nda [49] kat maliklerinin hakları ve borçları açıklanmıştır. İlerleyen süreçte, enerji verimliliği konusunda bilinci ve alışkanlıkları arttırmak adına 634 sayılı Kat Mülkiyeti Kanunu'nda kat maliklerine ve kiracılarına bazı sorumluluklar yüklenilmesi düşünülebilir.

Ülkemizdeki kentsel dönüşüm faaliyetlerinin yoğunlaşması neticesinde yapı stokumuz yenilenmektedir. Yeni binalar önümüzdeki uzun yıllar boyunca varlıklarını sürdüreceklidir [29]. Bundan dolayı EKB uygulamalarına gereken önemin verilmesi gerekmektedir. Kentsel dönüşüm sürecinin ayrılmaz bir parçası olarak enerji verimliliği konusu ele alınmalı ve vatandaşların bu konuda farkındalığının artması sağlanmalıdır. İlgili uygulamalardan beklenen ekonomik katkıların sağlanması için mimari proje

aşamasında oluşturulan senaryolardan en uygun olanı seçilerek ve bina çevre etkileşimi dikkate alınarak inşaat aşamasına geçilmelidir.

23.12.2017 tarihli 30279 Sayılı Resmî Gazete' de yayımlanarak yürürlüğe giren "Binalar İle Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği" [50] kapsamındaki faaliyetlerin yaygınlaştırılmasına ve yeşil bina sertifikasyon sistemlerinin kullanımına yönelik teşvik edici politikaların oluşturulmasına ağırlık verilmelidir. Sertifikasyon sistemlerinde ülkemize uygun kriterlerin seçimi ve bu kriterlerin ağırlıklandırılması konularında sağlıklı değerlendirmelerin yapılabilmesi ve süreç içinde gerekli takip ve yenilemelerin uygulanabilmesi için EKB tabanlı bina enerji bilgi sistemlerinden alınan bilgilerin kullanımı oldukça faydalı olacaktır.

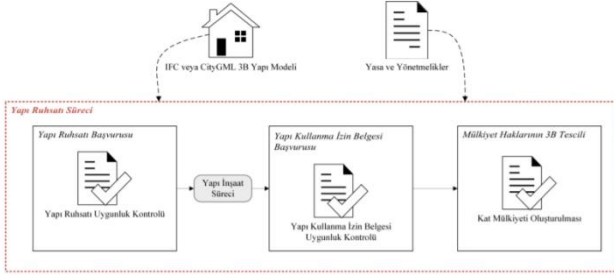
### 4.2 EKB uygulamasında yapı bilgi modellemesi kullanımının olası katkılarının irdelenmesi

Son yıllarda özellikle mimarlık ve inşaat sektörlerinde gerçekleştirilen faaliyetlerde yapı bilgi modellemesi (YBM) kullanılarak 3 boyutlu dijital modellerin üretimi yaygınlaşmıştır. Birleşik Devletler Ulusal YBM Standardı (National BIM Standard – United States) tarafından yapı bilgi modellemesi; bir yapının fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin dijital ortamda tasviri şeklinde tanımlanmıştır [51]. Yapısal bilgi modellenmesinde temel amaç sadece görselleştirme değil yapıyı oluşturan tüm elemanlara ilişkin çeşitli incelemelerin bir bütün içinde yapılabilirdiği bir model de oluşturmaktır. YBM'nin bir yapının tasarım, inşaat ve işletme evrelerine ilişkin gerekli bilgilerin oluşturulmasını ve bu evrelerin yönetilmesini ifade ettiği de söylenebilir [52]. Çelik Şimşek [51], Gürgün ve diğ. [52] yaptıkları çalışmada, YBM kullanımı ile proje sürelerinin azaldığını, proje karlılığının arttığını, tasarım hatalarının kolaylıkla tespit edilebildiğini, proje çizimlerinde ve dokümantasyonda bir standardın sağlanabildiğini, paydaşlar arasında iş birliği ve iletişimin kolaylaştığını aktarmaktadırlar.

Enerji etkin binaların tasarımında YBM kullanımı, bina ile ilgili çeşitli verilerin bir bilgi sistemi içinde entegrasyonunu sağladığı için daha etkin projelerin oluşturulmasına olanak sağlayacaktır. Bölüm 4.1'de aktardığımız EKB ön sertifika sürecinde, mimari tasarım aşamasında YBM kullanılarak farklı parametrelere göre senaryolar kolaylıkla oluşturulabilir ve bu senaryoların test edilmesi ve karşılaştırılması rahatlıkla sağlanabilir. Böylelikle, verimli enerji ve kaynak tüketiminin olmadığı yapıların inşasının önüne geçilebilecek, proje aşamasında gözden kaçan ama inşaat devam yapılması zorunlu olan yüksek maliyetli değişikliklerin önüne geçilebilecektir [52].

Bölüm 4.1'de EKB uygulamasının yapılaşma süreçlerinin bir parçası olduğu aktarılmıştır. Bu bağlamda, YBM uygulamasının sadece EKB faaliyetlerinde kullanılacak bir araç olarak görmemek gerekir. Güler ve Yomralıoğlu [53], çalışmalarında, yapı ruhsat süreçlerinin ve kat mülkiyetine geçiş işlemlerinin dijitalleştirilmesinde Yapı Bilgi Modellemesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) veri modellerinin kullanıldığı bir iş çerçevesi önerisinde

bulunmuşlardır. Bu önerideki iş çerçevesi Şekil 11’de özetlenmiştir.



Şekil 11. Türkiye’deki yapı ruhsatı süreçlerine yönelik geliştirilen iş çerçevesi [53].

Şekil 11’de aktarılan iş çerçevesi kapsamında yapı ruhsatı başvurusu esnasında YBM araçları ile oluşturulan 3 boyutlu yapı modelleri kullanılması önerilmiştir. BU model üzerinden yapı ruhsatı uygunluk kontrolü gerçekleştirilebilecek ve buna bağlı olarak gerekli izinler verilebilecektir. Aktarılan bu süreçte YBM projeleri üzerinden EKB ön sertifika uygulaması da gerçekleştirilebilir. Böylelikle, inşaat ruhsatı talebi sırasında enerji ve kaynak verimliliğinin sağlanması için model üzerinde gerekli düzenlemelerin ve iyileştirmelerin yapılabilmesi de sağlanabilecektir.

İnşaat süreci ise bu modeller üzerinden takip edilebilmekte, araziden alınan verilerin model üzerinden kontrolü sağlanabilmektedir. Yapının projesinde meydana gelen değişiklikler modele aktarılabilen ve bu değişikliklerin yönetmeliklere uygunluğu da kontrol edilebilmektedir [53]. Bu bağlamda, enerji verimliliği için gerçekleştirilen faaliyetler ve yapı elemanlarının mevcut durumu da inşaat esnasında model üzerinden izlenebilecektir. İnşaat bittikten sonra ilgili yapının ruhsatına uygun yapı olup yapılmadığı sorumlu birimlerce kontrol edilmektedir. Bu evrede EKB nihai sertifikasyon işlemleri de gerçekleştirilebilecektir. Ruhsatına uygun olarak inşa edilmiş yapılara yapı kullanma izni verilmektedir. Bu evrelerin sonunda mevcut yapıyı temsil eden güncel dijital bir model YBM aracılığı ile elde edilmiş olacaktır.

3 boyutlu kent modellerinin üretilmesi ve yaşatılması bina enerji bilgi sistemlerinin oluşturulması ve yönetilmesi için oldukça önemlidir. YBM ile elde edilecek modellerin buldukları çevre ile ilgili konumsal ilişkilerinin aktarılması EKB temelli coğrafi bilgi sistemi uygulamaları için gerekli bir husustur. Günümüzde YBM – CBS entegrasyonuna yönelik çalışmalara hız verilmiş ve bunun sonucunda YBM-CBS entegrasyonunun kullanıldığı projeler artmıştır. Konumsal veri altyapıları ile bütünlük YBM uygulamaları ile yerel ve bölgesel ölçeklerde bina-çevre-kent etkileşimi ile ilgili çeşitli analizlerin yapılabilmesi mümkün olacaktır. Son yıllarda YBM ve CBS veri modelleri arasında dönüşüm için çalışmalar artmıştır. Bu dönüşüm çalışmaları genellikle IFC ve CityGML arasında yapılmaktadır [53]. Bu iki veri modeli arasında tam ve işlevsel bir dönüşüm sağlanmasıyla daha etkin ve kapsamlı bir bina enerji bilgi sisteminin oluşturulması mümkün olacaktır. Böylece yapılara ilişkin mimari, mekanik,

geometrik ve fonksiyonel veriler oldukça detaylı bir şekilde bilgi sistemine aktarılmış olacak, hem de buldukları çevreye ilişkin topoğrafik, meteorolojik ve arazi kullanım bilgileri ile birlikte, güneşlenme, gölgeleme, aydınlanma, ısıtma ve yenilenebilir enerji kullanım potansiyelleri gibi konuların analizi çeşitli algoritmalar kullanılarak yapılabilecektir.

#### 4.3 Ulusal ölçekte enerji bilgi sisteminin kurulmasında ülkemizdeki mevcut olanakların irdelenmesi

CBS temelli binalara yönelik enerji bilgi sisteminin kurulmasında öncelikli olarak organizasyonel olanaklar ile birlikte mevcut teknik altyapı irdelenmelidir. Öncelikle enerji verimliliği konusunda ülkelerin idari kurumlarının motivasyonunun yüksek olması gerekir. Ülkemizde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı’nın ve Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın enerji verimliliği konularında rol alan başlıca kurumlar oldukları söylenebilir [14]. Çalışmamızda da aktardığımız üzere özellikle 2007 yılından itibaren yasal altyapının desteklenmesi adına birçok faaliyetin gerçekleştirildiği, ulusal belgelerde enerji verimliliği ve iklim değişikliği ile mücadele konularında hedefler ortaya konulduğu görülmektedir. Son olarak, Türkiye Büyük Millet Meclisi’nin onayıyla 7 Ekim 2021 tarihli ve 31621 sayılı Resmî Gazete “Paris Anlaşmasının Onaylanmasının Uygun Bulduğuna Dair Kanun” yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Paris Anlaşmasının temel hedefleri arasında iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı direncin artırılması, düşük sera gazı temelli kalkınma ve bu çerçevede gerçekleştirilen faaliyetlerin finansının sürdürülebilir hale getirilmesi olduğu söylenebilir [54]. Ülkemizin mevcut enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji çalışmalarının yanında Paris Anlaşması’nın kabulüyle bu yöndeki faaliyetlerinin devam edeceğini ve bu alanda ortak girişimlere açık olduğunu beyan ettiği düşünülebilir.

##### 4.3.1 Organizasyonel olanaklar

Ülkemizde, taşınmazların geometrik ve hukuki durumlarının tespiti ile birlikte Türk Medeni Kanunu’nun öngördüğü tapu sicil sisteminin kurulması görevi Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ’nün sorumluluğunda gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde kadastro faaliyetleri 3402 sayılı Kadastro Kanunu çerçevesinde yürütülmektedir. Bilindiği üzere ülkemizde parsel bazlı 2 boyutlu geometrinin kaydı üzerine bir sistem kullanılmaktadır.

Özellikle kentlerde farklı fonksiyonlara sahip arazi kullanımlarının yoğunlaşması nedeniyle günümüzde üç boyutlu kadastro ihtiyacı giderek artmaktadır. Ayrıca kamu yararı amacıyla mülkiyet hakkının kullanımına ilişkin olarak çok sayıda kısıtlayıcı düzenlemeler getirilmektedir. Günümüzde mülkiyet hakkı kamu yararı nedeniyle sınırlandırılabilir ve hak sahiplerine çeşitli sorumluluklar yükleyen bir hak olarak tanımlanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde, mülkiyet hakkının kullanımını etkileyen üç boyutlu kısıtlamaların kaydedildiği ve görselleştirildiği kadastral sistemlere geçişe yönelik çalışmalar artmıştır.

Birçok durumda düşey boyutta tanımlanmış hakların mevcut kadastral sistemlerde kaydının yetersiz kaldığı ve ilgili haklara ilişkin bilgilere doğrudan erişilemediği

bilinmektedir [55]. Ülkemizde üç boyutlu kadastro ve EKB süreçleri kapsamında ele alınabilecek başlıca uygulama olarak kat mülkiyetinin kurulması örnek gösterilebilir.

3B kadastro çalışmaları kapsamında TKGM tarafından “3 Boyutlu Şehir Modelleri ve Kadastro Projesi” başlatılmıştır. İlgili projede Ankara Gölbaşı ilçesi pilot bölge seçilerek bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir [53]. TKGM resmi internet sitesi aracılığıyla 3 Boyutlu Kent Modelleri ve Kadastro Projesi Demo Çalışması paylaşılmaktadır. Kütahya 3B Şehir Modeli Test sunumu internet kullanıcılarının erişimine açılmıştır [56].

Mülkiyet hakları ile ilişkilendirilmiş üç boyutlu bina envanterinin varlığı, “Bina Enerji Bilgi Sistemlerinin” etkinliğini son derece arttıracaktır. Mülkiyetle ilişkilendirilebilecek birçok gelişmiş analiz gerçekleştirilebilecek, mevcut bina envanterinin durumu sürekli takip edilebilecektir.

Ülkemizde bina envanterini tespit etmek ve güncelliğini sağlamak adına Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü tarafından çeşitli projeler gerçekleştirilmektedir. Coğrafi veri üretimi kapsamında; Gerçek Ortofoto ve Coğrafi Veri Üretimi İş Projesi, 3B Bina ve Şehir Topografyası Veri Setlerinin Üretimi çalışmalarına yer verilmiştir [57, 58]. Bu çalışmalarla Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ve Kent Bilgi Sistemleri (KSB) Standartlarının Belirlenmesi Projesi kapsamında tanımlanan verilerin 3 boyutlu olarak CityGML uyumlu elde edilmesi için gerekli araçlar tespit edilmiştir [16].

Bu bağlamda, bugüne kadar elde edilmiş EKB verilerini içeren bina enerji bilgi sisteminin oluşturulmasında ülkemizdeki kurumların 3 boyutlu kent modeli oluşturmaya yönelik çalışmalarından faydalanma olanağımızın olduğu görülmektedir.

#### 4.3.2 Bilgi ve teknik altyapı olanakları

Bilgi sistemlerinin oluşturulması için belirli standartlara uyularak üretilmiş doğru, güncel ve güvenilir veriye ihtiyaç vardır. Coğrafi verinin kullanımının artırılması ve arazi faaliyetlerine yönelik sağlıklı politikaların geliştirilmesi için konumsal veri altyapılarının varlığı büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, farklı kurum ve kuruluşlarca üretilen coğrafi verilerin paydaşlar arasında kullanımının sağlanması ile hizmet maliyetleri azaltılabilecek, etkin ve verimli iş süreçleri tanımlanabilecek ve veri odaklı hizmet servislerinin kullanıcılara sunulması kolaylaşacaktır.

Ülkemizde Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemi Projesi (TUCBS) ile ulusal ölçekte coğrafi verinin üretimi ve paylaşımına yönelik standartlar belirlenmiştir. 644 sayılı Kanun Hükmünde Kararnameyle ulusal coğrafi bilgi sisteminin kurulması ve geliştirilmesi görevleri, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü’ne aittir.

TUCBS çalışmalarıyla uluslararası standartlara uyumlu ulusal düzeyde coğrafi bilgi sistemi altyapısı kurulması, coğrafi verilerin belirlenen temalar kapsamında üretimi ve paylaşımına ilişkin standartların oluşturulması ve kurumlar tarafından üretilen coğrafi verilerin bir web portalı üzerinden erişiminin sağlanması hedeflenmektedir [59]. Bilgi altyapısı konusunda aktarılan gelişmeler neticesinde belirlenen standartlarda üretilmiş farklı sektörlerle ait

verilerin kullanılabilirliği etkin ve kapsamlı coğrafi bilgi sistemi uygulamalarının hayata geçirilmesi kolaylaşacaktır.

3 boyutlu coğrafi bilgi sistemlerinin oluşturulması için çeşitli veri toplama yöntemi bulunmaktadır. Son yıllarda CBS için veri toplama teknolojileri oldukça gelişmiştir. Uygulamanın konusu, kapsamı ve amacına göre veri toplama teknikleri seçilmelidir. CBS ortamında oluşturulacak enerji kadastrosu uygulamaları için çeşitli çalışmalarda fotogrametrik yöntemlerle elde edilen hava fotoğrafları, uydu görüntüleri ve LİDAR verilerinden yararlanıldığı ifade edilmiştir. Ayrıca, İnsansız Hava Araçlarına (İHA) entegre edilen yüksek çözünürlüklü kameralardan alınan görüntüler sayesinde bina verisi elde edilebilmektedir. Bu sayılan sistemlere entegre GNSS sistemleri kullanılarak ihtiyaç duyulan koordinat bilgisini de sağlanabilmektedir. Ölçme teknolojilerinde geline nokta CBS sistemleri için yüksek çözünürlüklü mekânsal veri elde edebilmek hızlı ve iş süreçleri analiz edildiğinde de az maliyetli hale gelmiştir.

## 5 Sonuçlar

Enerjide büyük oranda dışa bağımlı ülkeler için enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı oldukça önemli hale gelmiştir. Ayrıca, fosil yakıtların kullanımı ile artan sera gazı salınımı nedeniyle küresel ölçekte iklim değişikliği sorunu ile karşı karşıya kalınmıştır. Gerek enerji talebindeki artışa bağlı olarak artan enerji maliyetleri gerekse iklim değişikliği sebebiyle ortaya çıkan çevresel sorunların çözümü için bütüncül bir yaklaşımla enerji stratejileri geliştirilmelidir. Yapı sektörünün enerji tüketiminde ve sera gazı salınımında ciddi rol oynadığı bilinmektedir.

Özellikle Avrupa Birliği’nde konut binaları için enerji verimliliği politikaları kapsamında yasal düzenlemeler gerçekleştirilmekte ve çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Ülkemizde de son yirmi yıllık süreçte enerji verimliliğine ilişkin faaliyetler artmıştır. Binalarda “Enerji Kimlik Belgesi (EKB)” uygulaması ile yapı sektöründe enerji tüketimi ve sera gazı emisyonlarının azaltılması beklenmektedir. EKB uygulaması bir bina için enerji performans verilerinin tespit edilmesi gibi görünse de bu uygulama arazi yönetimi kapsamında sürdürülebilir kalkınma prensipleri temelinde bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Enerji verimliliği uygulamaları ile gayrimenkul sektörü faaliyetleri arasındaki sıkı ilişkinin anlaşılması gerekir. Etkin bir enerji politikaları ve stratejileri oluşturabilmek için EKB uygulamaları sonucu elde edilen verilerin mülkiyet, arazi kullanımı, topoğrafik ve atmosferik verilerle entegrasyonu sağlanmalı ve mekânsal analizlerin yapılabildiği CBS tabanlı bir yapı kurulmalıdır.

Arazi yönetimi faaliyetlerinin ve enerji bilgi sistemi gibi uygulamaların temelinde yer alan bilgilerin çoğunlukla coğrafi verilerle ilişkili olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda ihtiyaç duyulan coğrafi verinin istenen doğrulukta ve standartta üretilmesi oldukça önemlidir. Son yıllarda CBS uygulamaları için veri toplama teknolojilerinin geliştiği ve bu teknolojilerin kullanımının oldukça arttığı görülmektedir. Özellikle LİDAR sistemleri ile birlikte İHA’lara entegre edilen yüksek çözünürlüklü kameralarla üç boyutlu bina verilerinin üretilmesi kolaylaşmıştır. Günümüzde, kurumlarımız tarafından ülke ölçeğinde üç

boyutlu mekânsal verinin elde edilmesine yönelik yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir. 3B kadastro çalışmaları kapsamında TKGM tarafından “3 Boyutlu Şehir Modelleri ve Kadastro Projesi” başlatılmıştır. Ayrıca, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü tarafından ülke ölçeğinde 3 boyutlu bina ve şehir topografyasının elde edilmesine yönelik Gerçek Ortofoto ve Coğrafi Veri Üretimi İşleri Projesi, 3B Bina ve Şehir Topografyası Veri Setlerinin Üretimi gibi çeşitli projeler gerçekleştirilmektedir.

Veri üretim standartlarının yanında veri paylaşımına yönelik standartların da ortaya konulması için konumsal veri altyapılarının varlığı oldukça önemlidir. Konumsal veri altyapıları sayesinde etkin, maliyeti düşük, hızlı ve güvenilir hizmetlerin ortaya konulması kolaylaşacaktır. Bu bağlamda, ülkemizde Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemi Projesi (TUCBS) ile ulusal ölçekte coğrafi verinin üretimi ve paylaşımına yönelik standartlar belirlenmiştir. TUCBS çalışmalarıyla uluslararası standartlara uyumlu ulusal düzeyde coğrafi bilgi sistemi altyapısı kurulması sağlanabilecektir. “Bina Enerji Bilgi Sistemi” gibi birçok paydaştan veri temini gerektiren yapıların kurulması ve sistemlerin sürekliliğinin, doruluğunun ve güvenilirliğinin sağlanması için TUCBS faaliyetleri oldukça önemli bir rol üstlenmektedir.

Ülkemizde TKGM ve CBS Genel Müdürlüğü gibi kurumların yürüttüğü projeler göz önüne alındığında, çalışma kapsamında oluşturulması önerilen “Bina Enerji Bilgi Sistemi” çalışmaları için teknik, idari ve bilgi altyapısının yeterli olduğu, bu çalışmaları destekleyici yasal altyapının da kurulduğu görülmektedir.

Bu çalışmada ülkemizdeki EKB faaliyetleri kapsamında enerji verimliliği konusu irdelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- EKB uygulaması “Yapı Kullanma İzni” alınması aşamasında değil “İnşaat Ruhsatına” başvuru aşamasında gerçekleştirilmelidir.
- İnşaat ruhsatına başvuru sırasında EKB uygulaması kapsamında yapıya ilişkin ön sertifikasyon işlemi gerçekleştirilmelidir. Hazırlanan mimari ve teknik proje yetkililer tarafından ön incelemeye alınarak yapının enerji performansı belirlenmeli, bu tetkikler sonucunda ihtiyaç duyulursa projede gerekli değişikliklerin yapılarak tekrar inşaat ruhsatı başvurusunda bulunulması istenmelidir.
- EKB ön sertifika işleminin gerçekleştirilmesinin söz konusu olduğu durumda enerji verimliliği danışmanlık şirketlerinin de önemi artacaktır. Yapılaşma öncesinde yerel koşullar dikkate alınarak oluşturulan projeler test edilip, değerlendirilmeli, en uygun çözüme ulaşılarak süreç başlatılmalıdır. Böylelikle yapılaşma sürecinde meydana gelebilecek aksaklıkların, hatalı değerlendirmelerin ve beklenmedik maliyetlerin önüne geçilmiş olacaktır.
- EKB belgelerinin ait olduğu yapıya ilişki konum bilgilerinin doğru ve beklenen hassasiyette elde edilmesine önem gösterilmelidir.
- Öncelikle EKB uygulamasının yapılaşma sürecindeki yeri değiştirilmelidir. Sonrasında

mevcut organizasyonel ve teknik olanaklar kullanılarak bina enerji bilgi sistemi oluşturma çalışmalarına başlanmalıdır.

- EKB uygulaması tek bir bina ölçeği kapsamında ele alınan bir çalışma olarak düşünülmemelidir. EKB üretiminde ilgili binanın çevre ile etkileşimi ve yerel iklim özellikleri dikkate alınmalıdır.
- Üretilen EKB verileri, mülkiyet, iklim ve çevresel verilerle entegrasyonunun sağlandığı bir bilgi sistemine aktarılmalıdır.
- Yapı ruhsat süreçlerinin ve kat mülkiyetine geçiş işlemlerinin dijitalleştirilmesi kapsamında EKB uygulaması değerlendirilmeli ve Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) gibi araçların bu süreçlerde kullanımına ilişkin çalışmalar yapılmalıdır.
- Oluşturulan 3 boyutlu kent modelleri üzerinden mekânsal analizlerin yapılabildiğini, yenilenebilir enerji kaynağı potansiyellerinin tespit edilebildiği, binaların enerji performansı yanında, CO2 tasarruflarının miktarları yanında ekonomik verilerin kullanıcılarla paylaşılabilirdiği web portalları oluşturulmalıdır.
- Avrupa’da örneklerini gördüğümüz enerji kadastrosu – güneş kadastrosu olarak da ifade edilen uygulamaların yerel ölçekte oluşturulması düşünülmelidir. Böylelikle yatırımcılar ve mülk sahipleri taşınmazlar hakkında enerji verimliliği potansiyellerini görebilecek ve bu durum enerji verimliliği piyasasının oluşmasına katkı sağlayacaktır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

#### Kaynaklar

- [1] L. Madrazo, A. Sicilia, M. Massetti, F.L. Plazas and E. Ortet, Enhancing energy performance certificates with energy-related data to support decision making for building retrofitting. *Thermal Science*, 22 (Suppl. 3), 957-969, 2018. <https://doi.org/10.2298/TSCI171005028M>.
- [2] U. Desideri, D. Bacchetti, L. Arcioni and D. Leonardi, Methodology for the implementation of an energy cadastre: a case study. *Third International Conference on Applied Energy*, Perugia, Italy, 16-18 May 2011.
- [3] Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı (UEVEP) 2017-2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Türkiye, Mart 2018.
- [4] K. Yiğit and B. Acarkan, Assessment of energy performance certificate systems: a case study for residential buildings in Turkey. *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 24(6), 4839-4848, 2016. <https://doi.org/10.3906/elk-1407-87>.
- [5] Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği, 05.12.2008 tarih ve 27075 sayılı Resmî Gazete,



- [6] G. Şahin, Enerji kadastro. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [7] S. Önal, Yapıların enerji kimlik belgeleri üzerine değerlendirmeler. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 1 (3), 100-105, 2014.
- [8] Ö. Aydın ve D. Saylam Canım, Binalarda enerji performansı hesaplama yöntemi (BEP-TR1)'in kullanılabilirliğinin ve EKB uygulamasının değerlendirilmesi. Mimarlık ve Yaşam, 2(2), 265-277, 2017. <https://doi.org/10.26835/my.334594>.
- [9] C. T. Akın ve S. Kaplan, Enerji kimlik belgelerinin enerji etkin mimari tasarım kriterleri açısından değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10 (1), 373-384, 2019. <https://doi.org/10.24012/dumf.523911>.
- [10] Ö. Aydın, Binalarda enerji verimliliği kapsamında yapılan projelerin değerlendirilmesi: Türkiye örneği. Mimarlık ve Yaşam, 4 (1), 55-68, 2019. <https://doi.org/10.26835/my.511825>.
- [11] Ç. Aydoğdu, Yenilenebilir enerji sektöründe ve enerji verimliliğinde kamusal destekler ve Türkiye'de yansımaları. Bitlis Eren Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Akademik İzdüşüm Dergisi, 6 (1), 52-74, 2021.
- [12] Guidelines on Real Property Units and Identifiers, United Nations Economic Commission for Europe. United Nations, New York and Geneva, 2004
- [13] P. F. Dale and J. D. McLaughlin, Land Administration. Oxford University Press, New York, 1999.
- [14] G. Demirsoy, Binalarda enerji verimliliğinin etkinlik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [15] Türkiye Enerji Verimliliği Strateji Belgesi 2012-2023, 28215 Sayılı Resmî Gazete.
- [16] S. S. Toybıyık, Coğrafi Tabanlı Türkiye Bina Envanterinin Oluşturulması. Uzmanlık Tezi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017.
- [17] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, BEP-TR Eğitim Kılavuzu, [https://beptr.csb.gov.tr/bep-web/BEP-TR\\_E%C4%9Fitim\\_K%C4%B1lavuzu.pdf](https://beptr.csb.gov.tr/bep-web/BEP-TR_E%C4%9Fitim_K%C4%B1lavuzu.pdf), Son erişim 03 Ocak 2022.
- [18] 3194 Sayılı İmar Kanunu, 09.05.1985 tarih ve 18749 sayılı Resmî Gazete
- [19] 4708 Sayılı Yapı Denetimi Kanunu, 13.07.2001 tarih ve 24461 sayılı Resmî Gazete
- [20] S. Enemark, Understanding the land management paradigm, FIG Com 7 Symposium on Innovative Technologies for Land Administration, Madison, Wisconsin, USA, 2005.
- [21] Ortak Geleceğimiz Brundtland Raporu, Brundtland Komisyonu, Birleşmiş Milletler, 1987.
- [22] T. Yomralıoğlu, Dünya'da arazi yönetimi. Arazi Yönetimi Çalıştayı, Okan Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [23] FIG Statement on the Cadastre, Publication No. 11, Fédération Internationale des Géomètres, 1995.
- [24] The Bathurst Declaration, United Nations Interregional Meeting of Experts on the Cadastre, Fédération Internationale des Géomètres (FIG) and United Nations (UN), Publication No:21, Copenhagen, Denmark, 1999.
- [25] M. Aydın, Enerji verimliliğinin sürdürülebilir kalkınmadaki rolü: Türkiye değerlendirmesi. Yönetim Bilimleri Dergisi, 14 (28), 409-441, 2016.
- [26] Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Değerlendirme Raporu, Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019.
- [27] A. Kavas ve D. Başoğlu Acet, Yerel yönetim politikalarında yenilenebilir enerji. İDEALKENT, 10 (27), 410-446, 2019. <https://doi.org/10.31198/idealkent.506955>
- [28] S. Sınmaz, Enerji verimliliği temasının Türkiye şehir planlama sistemine entegrasyonu: Lâpseki kenti için bir yaklaşım. Planlama, 15(2), 195-204, 2015. doi: 10.5505/planlama.2015.08370
- [29] E. Yetim, Ada bazlı kentsel dönüşümde enerji verimliliği uygulamaları ve maliyet ilişkisinin incelenmesi: Antalya örneği. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [30] B. Köse Mutlu, Z. O. Arslanoğlu, B. Günaçtı, B. Say, F. Şahin, C. Yılmaz ve N. Yardımcı Tiryakioğlu, Uluslararası yeşil bina sertifika sistemlerinin incelenmesi ve tasarlanan ulusal sertifika sisteminin kullanımı: bir kampüs binası ile vaka çalışması. İklim Değişikliği ve Çevre, 4 (2), 32-41, 2019.
- [31] D. Bertiz, İ. Ekşi, M. Tokmak, D. Özbey, M. Ak ve A. Güneş, Yeşil altyapı açısından uluslararası ve ulusal yeşil bina sertifika sistemlerinin karşılaştırılması. PEYZAJ, 1 (2), 31-39, 2019.
- [32] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Mesleki Hizmetler Genel Müdürlüğü, Haberler: Binalar ile yerleşmeler için yeşil sertifika uygulaması tebliğinin yayımlanması. <https://meslekihizmetler.csb.gov.tr/binalar-ile-yerlesmeler-icin-yesil-sertifika-uygulama-tebliği-yayimlanmistir-haber-261881>, Son erişim 03 Ocak 2022.
- [33] R. Kılıç Demircan ve A.B. Gültekin, Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 10 (1), 36-51, 2017.
- [34] Land administration guidelines, United Nations Publication, UNECE, New York and Geneva, 1996
- [35] N. E. Ülger, Arazi Yönetimi, Yem Yayın, İstanbul, 2016.
- [36] A. Duman Altan ve A. Sağbaş, Türkiye'nin enerji verimliliği ve iklim değişikliği performansı: mevcut durum ve gelecek projeksiyonu. Verimlilik Dergisi, 1, 7-26, 2020.
- [37] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Göstergeler: Yakıta göre birincil enerji tüketimi. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/yakita-gore-birincil-enerji-tuketimi-i-85801>, Son erişim 03 Ocak 2022.
- [38] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Çevresel Göstergeler: Sektörlere göre nihai enerji tüketimi. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/sectorle-re-gore-nihai-enerji-tuketimi-i-85804> Son erişim 03 Ocak 2022.

- [39] TUİK, Tablo 2 sera gazı emisyonları (CO2 eşdeğeri) ExcelTablosu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Greenhouse-Gas-Emissions-Statistics-1990-2019-37196> , Son erişim 03 Ocak 2022.
- [40] TUİK,1990-2019 yılı sera gazı emisyonu – sektörler göre sera gazı dağılımı ve gazlara göre sera gazı emisyonları istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Greenhouse-Gas-EmissionsStatistics-1990-2019-37196> , Son erişim 03 Ocak 2022.
- [41] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, İklim Değişikliği ile Mücadele Sonuç Bildirgesi. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/turkce/faaliyetler/-kl-mdeg--s--kl-g---20210217102133.pdf> , Son erişim 03 Ocak 2022.
- [42] A. Sağbaş ve B. Başbuğ, Sürdürülebilir kalkınma ekseninde enerji verimliliği uygulamaları: Türkiye değerlendirmesi. European Journal of Engineering and Applied Science, 1(2), 43-50, 2018.
- [43] Bütünleşik Kentsel Gelişme Stratejisi (KENTGES) ve Eylem Planı 2010-2023, 4 Kasım 2010 tarihli ve 27749 Sayılı Resmî Gazete.
- [44] S. Doğdu Kaya, 6306 sayılı kanun kapsamında kentsel dönüşüm uygulaması: Karabük ili ve Safranbolu ilçesi örneği. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2019.
- [45] 11. Kalkınma Planı (2018-2023) Konut Politikaları Özel İhtisas Raporu, T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018.
- [46] H. De Soto, Sermayenin Sırrı, Liman Yayınları, Mart 2005.
- [47] Ü. Bulut Karaca ve S. Uçar, Konut çatı ve cephelerinde farklı fotovoltaik sistem uygulamalarının değerlendirilmesi. Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (2), 65-76, 2018.
- [48] A. Bieda and A. Cienciala, Towards a renewable energy source cadastre – a review of examples from around the world. Energies, 14(23), 8095, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14238095>
- [49] 634 Sayılı Kat Mülkiyeti Kanunu, 02.07.1965 tarihli ve 12038 sayılı Resmi Gazete.
- [50] Binalar İle Yerleşmeler İçin Yeşil Sertifika Yönetmeliği, 23.12.2017 tarihli 30279 Sayılı Resmî Gazete.
- [51] N.Çelik Şimsek, Kat mülkiyetine konu taşınmazların yönetiminde üç boyutlu model tabanlı yaklaşım. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [52] A.P. Gurgun, K. Koc ve Ş. Atabay, Yapı bilgi modellemesi kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projeleri üzerine etkileri. Teknik Dergi, 33 (3), 11857-11886, 2022. <https://doi.org/10.18400/tekderg.715574>
- [53] D. Güler ve T. Yomralıoğlu, Yapı ruhsatlandırmadan kat mülkiyetine giden süreçlerin dijitalleştirilmesi: mevcut durum analizi ve öneri. Geomatik, 6 (2), 93-106, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.705559>
- [54] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, İklim Değişikliği, Paris Anlaşması. <https://iklim.csb.gov.tr/paris-anlasmasi-i-98587>, Son erişim 03 Ocak 2022.
- [55] F. Döner, C. Bıyık ve O. Demir, Dünyada üç boyutlu kadaströ uygulamaları. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 104(2), 53-59, 2011.
- [56] Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Üç Boyutlu Kent Modelleri ve Kadastro Projesi. <https://www.tkgm.gov.tr/projeler/3-boyutlu-kent-modelleri-ve-kadastro-projesi>, Son erişim 03 Ocak 2022.
- [57] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, Gerçek Ortofoto Projeleri. <https://cbs.csb.gov.tr/proje-calismalari-i-88743> , Son erişim 03 Ocak 2022.
- [58] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, 3-B Bina ve Şehir Topografyası Veri Setlerinin Üretimi. <https://cbs.csb.gov.tr/proje-calismalari-i-89118> , Son erişim 03 Ocak 2022.
- [59] G. G. Alır, TUCBS kapsamında oluşturulan coğrafi web servislerinin yönetilmesi, izlenmesi ve raporlanması. Uzmanlık Tezi, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017.





# The development of the North Macedonian cadastral system: An overview of the cadastral system

## Kuzey Makedonya kadastro sisteminin gelişimi: Kadastro sistemine genel bakış

Edmond Jonuzi<sup>1,\*</sup> , Süleyman Savaş Durduran<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Necmettin Erbakan University, Geomatic Engineering Department, 42090, Konya, Türkiye

### Abstract

This article is mainly concerned to present an overview situation of the cadastral system, passing through a historical outline to the present day. This study provides a brief overview of the cadastral system, including the early period and the first steps such as the creation and consolidation and subsequent development of the same. A review of the North Macedonian Cadastral System, especially the establishment of the Agency for Real Estate Cadastre (AREC), principles of the cadastral system, a historical outline, and the laws on establishing the cadastral system, notably the Law on Real Estate Cadastre are the basic material of this article. This, together with the structure and organization, responsibilities, works, tasks, obligations, financing, and priorities of the AREC in the future are the main purpose and the focus of this paper. Analyzing the current situation of the AREC and identifying the actual problems which the AREC faces, helps us to ensure a safer approach to the problems and challenges of the future. Furthermore, this review has represented the involvement of the private sector and the importance of its involvement. Although, the concept of Cadastre is unique – it is a public register for real estate registration and includes some basic elements such as immovable ownership information, areas, values of the land, and boundaries. As a final summary, we can freely conclude that the focus, priorities, and goals of the AREC are strengthening, cooperating with international institutions, being more efficient and effective, and being closer to the citizens.

**Keywords:** Cadastre, Real Estate, AREC, Private sector involvement, North Macedonia

### A country report – North Macedonia

**North Macedonia**, is a landlocked country, located in the middle of the Balkan, in Southeast Europe. Covering an area of 25,713 km<sup>2</sup> (25,433 km<sup>2</sup> land area and 280 km<sup>2</sup> water area) and has 766 km of boundaries; gives the opportunity to share them with Kosovo and Albania (to the northwest and to the west), with Serbia (to the north), with Greece (to the south) and Bulgaria (to the east). North Macedonia has approximately 1.9 million inhabitants (due to 2021 Census). The capital city is Skopje, located in the north part of the country, with more than 800.000 inhabitants (see [Table 1](#)).

### Öz

Bu makale, esas olarak, kadastro sisteminin günümüze tarihsel bir çerçeveden geçerek genel bir durumunu sunmakla ilgilidir. Bu çalışma, kadastro sistemine, erken dönem ve oluşturulması, konsolidasyonu ve daha sonraki gelişimi gibi ilk adımlar dahil olmak üzere kısa bir genel bakış sunmaktadır. Kuzey Makedonya Kadastro Sisteminin bir incelemesi, özellikle Emlak Kadastro Ajansı'nın (AREC) kurulması, kadastro sisteminin ilkeleri, tarihi bir çerçeve ve kadastro sisteminin kurulmasına ilişkin kanunlar, özellikle Emlak Kadastro Kanunu, bu makalenin temel malzemesidir. Bu, yapısı ve organizasyonu, sorumlulukları, çalışmaları, görevleri, yükümlülükleri, finansmanı ve gelecekteki AREC'in öncelikleri ile birlikte bu belgenin ana amacı ve odak noktasıdır. AREC'in mevcut durumunu analiz etmek ve AREC'in karşılaştığı gerçek sorunları belirlemek, geleceğin sorunlarına ve zorluklarına daha güvenli bir yaklaşım sağlamamıza yardımcı olur. Ayrıca, bu inceleme özel sektörün katılımını ve katılımının önemini temsil etmiştir. Her ne kadar kadastro kavramı benzersiz olsa da - gayrimenkul tescili için halka açık bir sicildir ve taşınmaz mülkiyet bilgileri, alanlar, arazi değerleri ve sınırlar gibi bazı temel unsurları içerir. Son olarak, AREC'in odak noktası, öncelikleri ve hedeflerinin güçlenmek, uluslararası kuruluşlarla işbirliği yapmak, daha verimli ve etkili olmak ve vatandaşlara daha yakın olmak olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz.

**Anahtar kelimeler:** Kadastro, Emlak, AREC, Özel sektör katılımı, Kuzey Makedonya

**Table 1.** General statistics about North Macedonia

Statistical facts	
Population	~ 1.9 million
Total area	25,713 km <sup>2</sup>
Land area	25,433 km <sup>2</sup>
Water area	280 km <sup>2</sup>
Capital city	Skopje
Largest city	Skopje (~800.000 inhabitants)
Largest river	Vardar
Biggest lake	Lake Ohrid
Tallest mountain	Korab Mountain (2,764 m)
GDP / per capital	12,69 Billion\$ / 6,093.15\$
Currency	Macedonian Denar-MKD

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: edmondjonuzi1@gmail.com (E. Jonuzi)

Geliş / Received: 24.03.2022 Kabul / Accepted: 20.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1092732

## 1 Introduction

In the Republic of North Macedonia, cadastral works have been started 1928-1945. As a result of developing technologies, cadastral works have been facing numerous variations as in the regulations, same also in technological tools and working methods.

In different countries, usually cadastral systems have different purposes. Even though there are different approaches, generally, all of these systems are based on the same logical basis [1]. Either, we are witnesses that different definitions about cadastre and cadastral systems already exist based on different factors such as the scope or content, or even administrative structure.

The establishment of the Cadastre is extremely important, same as developed countries as well as the developing ones. Establishing the Cadastre, need a huge investment and it is crucial to have a detailed budget, and secure the necessary financial resources before starting the project [2].

FIG [3], stated cadastre as a normally parcel-based, and up-to-date land information system containing a record of interests inland. Cadastre can be defined also as a recording of surveyed boundaries that right concerns. The boundaries of the land (also other real estates such as buildings), location, and unique identifier are shown in a cadastral map. The cadastral map may include also buildings and other features [4,5]. Zevenbergen [6], defines cadastre as: “public inventory of spatial data concerning properties within certain country or district, based on a survey of their boundaries”. The concept of cadastre, according to Enemark [7], is difficult to identify. Thus, different countries, depending on their own development, affected by various causes, have created or designed cadastre in many different ways.

For creating a strong institutional structure, qualified, experienced, and professional project management is required [2]. Furthermore, involvement of the private sector seems to be very flexible and cooperation between private and public sectors shows the quality in doing business.

Some countries have merged land registration and cadastre into one organization (e.g. certain European countries as the Netherlands, Sweden, Norway, Finland, Turkey, Hungary, Romania etc.) while in some other countries merging the land registration and cadastre did not take place yet (e.g. certain European countries as Spain, Croatia, Austria, Bulgaria, Poland, Bosnia and Herzegovina etc.) [8]. By merging land registration and cadastre, and creating one organization, many countries in Europe, intended to improve the functioning of those two components reflected the changes [9]. Cadastre can be defined also as a recording of surveyed boundaries that right concerns. The boundaries of the land (also other real estates such as buildings), location, and unique identifier are shown in a cadastral map.

In this paper, we are going to present the structure of cadastral system of North Macedonia, the establishment of the same, an overview situation as a historical part, current situation of the cadastral system and the cadastral works, about the Agency for Real Estate Cadastre (AREC), and its problems, challenges, priorities, and goals. Knowing and

facing problems and taking a step forward in the tendency to solve them makes the process even easier.

## 2 North Macedonian cadastral system

The two main components of a cadastral system are Land registration and Cadastre. In general they are performed in different ways in different regions or countries. After defining the concepts of land registration and cadastre, the most important thing which follows after it, is to derive how the data/information from both components of the cadastral system is maintained and stored nowadays [10].

In most European countries, the creation of the Cadastre and the Cadastral System dates back to the early 19th century while in the Republic of North Macedonia this process started back to the 20th century.

The establishment of the cadastral system in North Macedonia dates back to the first cadastral measurements, in 1928, which is also known as the period of land cadastre. Later then dates the creation of the descriptive cadastre, known more like a fiscal and does not represent graphical part, and in the present days, we have the Real Estate Cadastre. In North Macedonia, the only cadastral system is the Comprehensive cadastral system. By definition, it is a parcel-based cadastral system and covers the entire territory of the state. The cadastral parcel is represented as at least 1m<sup>2</sup> land. Every cadastral parcel has its own unique parcel identifier number, the boundary of the parcel is represented with coordinates and the parcel has its own surface.

The basic principles of the cadastral system, according to the Law on Real Estate Cadastre, are as follows:

- **The principle of compulsory registration**  
Every citizen is obliged to register the right to real estate.
- **The constitutional principle of registration**  
The right of ownership is achieved only by registration in the Real Estate Cadastre and the same prohibits its deletion by the same.
- **The principle of publicity - All data/recordings are public**  
Every registration in the real estate cadastre is open to all citizens – 24/7 online information system.
- **The principle of accuracy and reliability**  
Cadastral data are considered accurate and reliable. There are procedures for correcting the error if it is found.
- **The principle of legality during registration**  
The civil servant is obliged to make registration based on the final legal acts.
- **The principle of priority**  
Registration is based on the time of receipt of the application for registration.
- **The principle of determination**  
Registration must be done based on the determination of real estate, the right holder, as well as the type of right.
- **The principle of independence**  
The civil servant independently notifies the party of the registration/change in the Real Estate Cadastre.

### 2.1 The historical outline of the cadastral system

Initial cadastral surveying in North Macedonia was done in the period of 1928-1945. It covered some towns and their surroundings (Figure 1). The cadastral surveying was done using ground-surveying technologies of time such as theodolites, using the orthogonal and polar method [11].

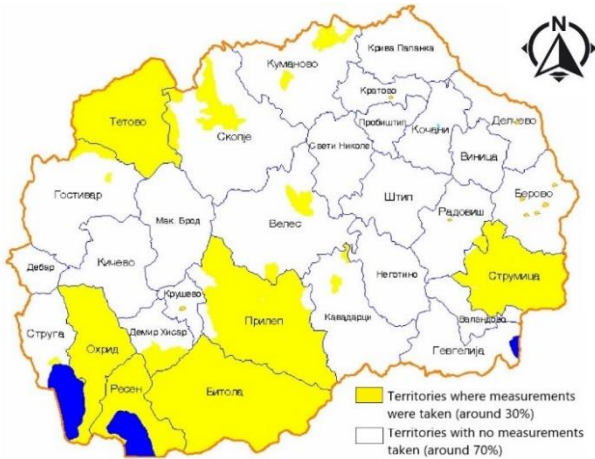


Figure 1. Cadastral surveying (ground based) in the Republic of North Macedonia, 1928-1945 [11]

During that period of time were surveyed 549 cadastral municipalities. The total surveyed area was around 7000 km<sup>2</sup>, which is almost 30% of the whole territory of the state. The cadastral boundaries were mapped in different scales. 1:500 and 1:1000 – in urban areas, 1:2500 – in suburban areas and surroundings (Figure 2), whereas in mountain areas the boundaries were mapped in scale 1:5000 [11].

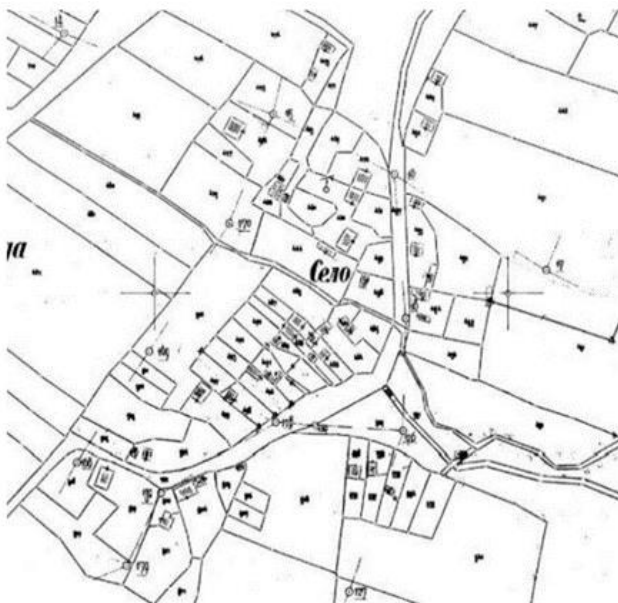


Figure 2. Cadastral map in scale 1:2500 (archive original)

An overview of all the laws, their amendments and legal changes that have been made in certain periods, and that regulate the competence of this institution (with its sub-

regional units) in the previous period in relation to the cadastre represented as follows:

- Law on Land Cadastre - **1928**
- Law on Public Revenues and Taxation (initiates the implementation of the descriptive cadastre - **1952**
- The Decision on the maintenance of data from the land cadastre - **1953**
- Law on Land Surveying and Cadastre - **1965**
- Law on Land Surveying and Cadastre - **1972**
- Amending and Supplementing the 1972 Law - **1978**
- Law on Survey, Cadastre and Real Estate Rights Registration - **1986**
- Amending and supplementing the 1986 Law - **1991**
- Amending and supplementing the 1991 Law - **2005**
- Law on Real Estate Cadastre - **2008** [11]

### 2.2 Establishment of AREC and the present day cadastral system

According to the AREC, on 14 July 1947 was established the Geodetic Authority of the People's Republic of Macedonia. In 1986, with the Law on Survey, Cadastre and Real Estate Rights Registration, the Agency for Immovable Cadastre, in addition to geodetic-cadastral works, was added another function known as the registration of immovable property rights [10].

Three types of registrations; systematic, sporadic, and conversion were initial for doing mainly done the establishment of the cadastral system. The last one converted already registered land data, cadastral boundaries, and legal data, from Land Cadastre into Real Estate Cadastre. The registered land rights are shown in a legal document named as Land Title Certificate [12].

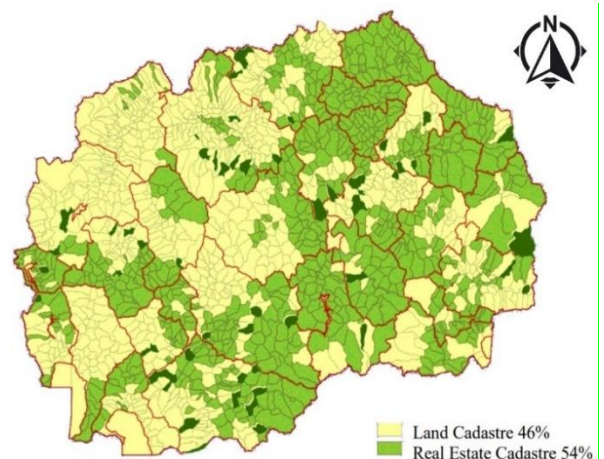


Figure 3. A graphic overview of the established Real Estate Cadastre in 2005, in the Republic of North Macedonia [13]

Land Title Certificate shows the information on the right holder, parcel data (id, area, cadastral culture, class), buildings, as well as other rights, restrictions, and responsibilities. The main functions of the land administration system are performed by the AREC [12].

Some maintenances of the cadastral system are handled by private surveying companies due to the involvement of the private sector in North Macedonia, in 2005. Furthermore, North Macedonia has a complete land administration and it has a fixed boundary approach [12].

### 2.3 Structure and organization

The AREC is managed by a Steering Board (see Figure 4), comprised of five members. The Government of the

Republic of North Macedonia has the right to appoint and dismiss members of the board of directors, who have a 5-year term, and at the end of the term, re-election is not allowed. The director is the leader appointed to lead the AREC, and he has his deputy. The division of tasks, duties, and obligations which also have subdivisions according to type, scope, complexity, and interconnection, is an integral part of the institutional organization of the AREC, whose authorizations are defined by law.

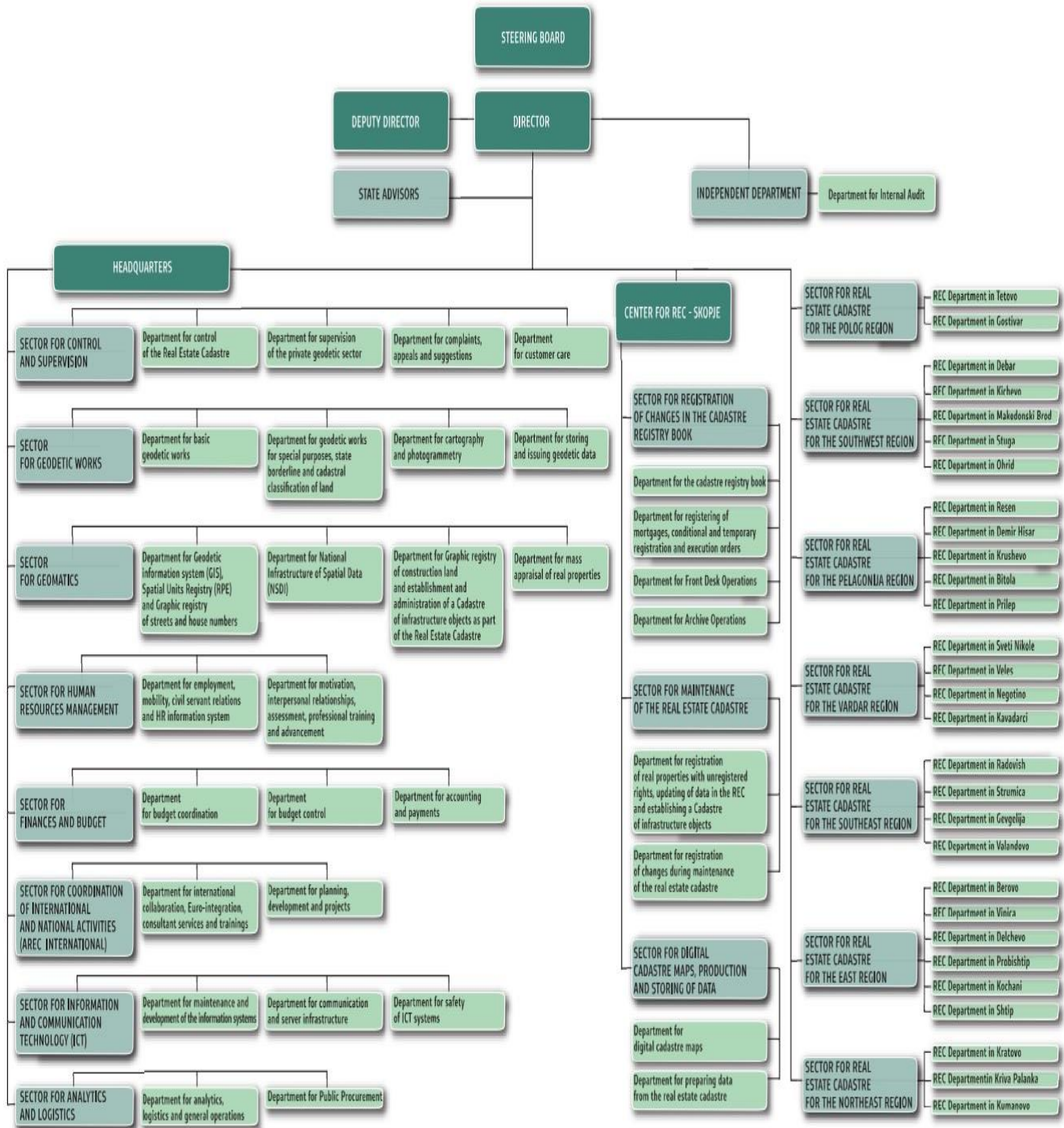


Figure 4. AREC Organizational chart [14]

#### 2.4 AREC responsibilities, works, tasks and obligations

Acting, functioning, and operating on the basic principles; as the principle of legitimacy, the principle of expertise, the principle of efficiency, the principle of transparency, the principle of professionalism and liability, and the principle of service orientation makes the AREC act in the capacity of a legal person. Acting in the capacity of a legal person with its rights, liabilities, and responsibilities, as stipulated by the Law, enables the AREC to report only to the Government of the Republic of North Macedonia.

The cadastral establishment works in North Macedonia, are considered as a “public service”. As a public sector, it has its own competencies (carried by regional and local offices and employees; also see Table 2), it provides public infrastructure projects that should be prepared and implemented by public institutions. However, AREC in North Macedonia provides deep cooperation with the private sector. Thus, in addition to cooperation, it is also a controller, supervisor and plays a special role in the development of private-sector affairs.

**Table 2.** General statistics about public sector competences of AREC [15]

Public Sector Competence – AREC	
Regional/Local offices	29
Number of employees	878
Employed surveyors	220
Employed lawyers	180

The amendments made in 2005 were aimed at enabling the establishment of the real estate cadastre throughout the territory of the country within a short time frame, by:

- simplifying the real estate survey and allowing the collection of data relevant to the real estate rights registration only (thus refraining from the collection of data for vertical land layout, as well as of data on land classes);
- shortening the procedure for establishing the real estate cadastre;
- determining new procedures for real estate rights registration; as well as engaging the private sector in the performance of the geodetic practice [13].

#### 2.5 AREC financing

AREC is the only legal body that performs the functions of land registration and cadastre. Therefore, AREC works and activities are financed by the government of the state. AREC has two budgets (see Table 3); the State budget (which is approximately ~30%), and the Cost recovery budget (which is approximately ~70%).

**Table 3.** The budget for financing the AREC [15]

Public Sector Competence – AREC	
COMPETENCE	AREC
BUDGET	~70% cost recovery ~30% state budget

According to the sixth principle of the Cadastre 2014 or also well known as the Statement 6 on Cadastre 2014, “Cadastre 2014 will be cost-recovering!” [16], and observing Table 3 (also see Figure 5), today, we can ascertain and conclude that, “Statement 6 on Cadastre 2014” seems to be vital and real for the Republic of North Macedonia. It shows us that 70% of the budget of the AREC is cost recovery and only 30% of the budget seems to be the state budget.

#### 2.6 Private sector involvement

According to Dimova [13], one of the most fundamental and vital changes in the law on Real Estate Cadastre is the changes that enabled the inclusion of the private sector and the development of private surveying companies to perform engineering and geodetic services.

Private sector involvement, in geodetic activities, has provided great advantages and seems to be very effective and efficient in North Macedonia. Also, this is seen as inevitable. For the period of this, the number of staff who used to work in the Public Sector has reduced. Even though North Macedonia is a small country with 25,713 square kilometers of area, besides this, inside this small country there are about 4,082,407 parcels registered. Represented in the table below (see Table 4), are the private surveying offices active nowadays in North Macedonia and also the licensed surveyors which operate in the business.

**Table 4.** Involvement of the private sector in North Macedonia [15]

Private sector involvement	
PRIVATE SURVEYING OFFICES	272
LICENCED SURVEYORS	411

Today, we can ascertain with more conviction that, “Statement 5 on Cadastre 2014” seems to be vital for the Republic of North Macedonia. According to Statement 5 on Cadastre 2014, “Cadastre 2014 will be highly privatized! Public and private sector are working closely together!” [16], and we can truly say that today this seems to be vivid for a cadastral system and irreplaceable (see Figure 5).

Looking back at the time stages that North Macedonia has gone through, and according to the Cadastre 2014 and its Statements, today we can notice that a lot of work has been done successfully. There is certainly yet more to constantly solve, create, produce, develop, and shortly yet more to do and a lot of work to be done.

According to the fourth principle of the Cadastre 2014, which says “Paper and pencil – cadastre, will have gone!” [16] (see Figure 5), we can truly confirm that since the 2D cadastre hasn’t been completed yet, this Statement of the Cadastre 2014 it’s not fully completed, and ‘Paper and pencil – cadastre’ has continued its own path. However, technological development and the digitalization process have managed to have their effects and the impact of technology and transition to the digital cadastre based on technology is very successful and very important.

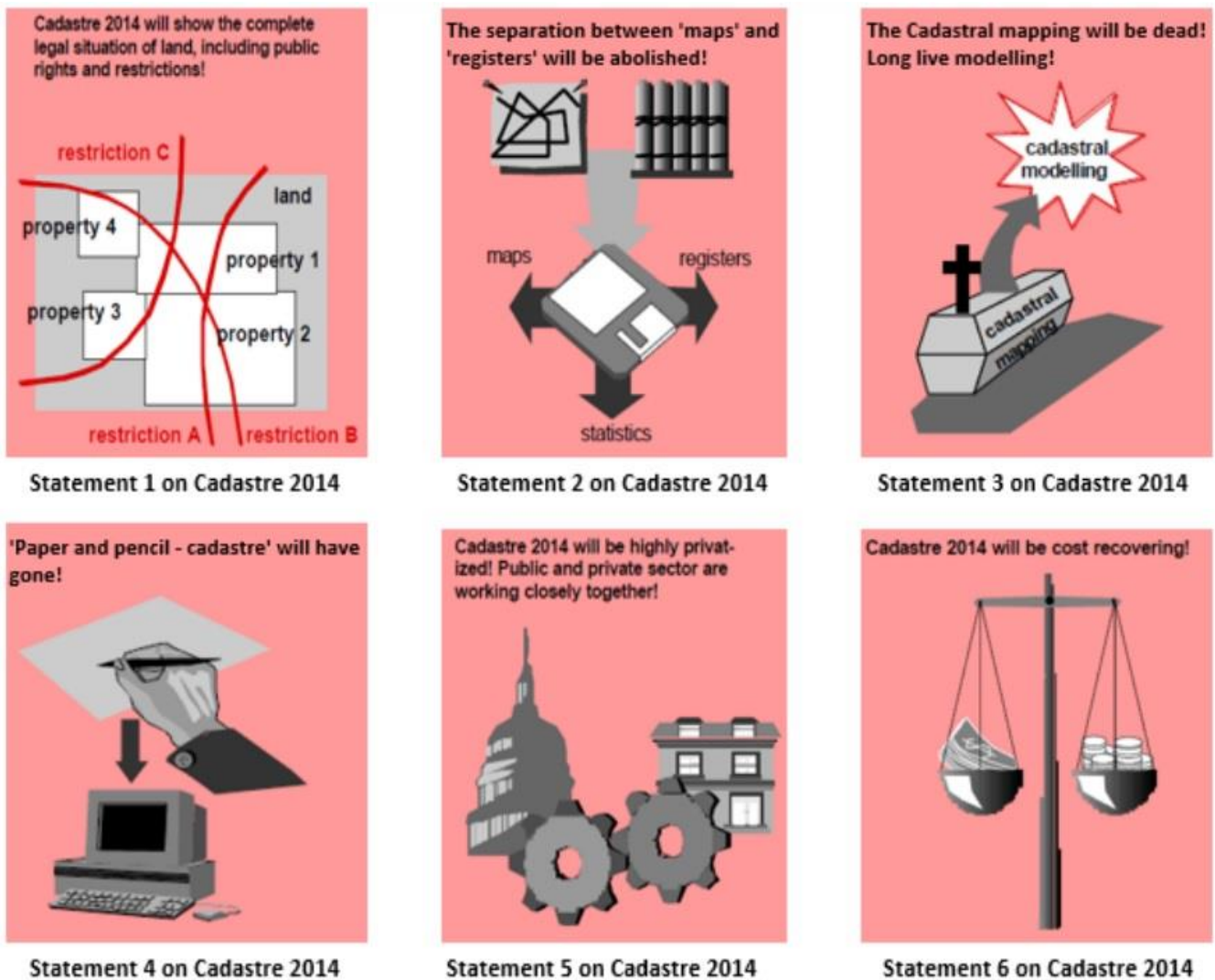


Figure 5. The six statements on Cadastre 2014 [16]

Cadastre 2014, or more precisely its principles, also known as the Statements (*Statement 1, Statement 2, Statement 3, Statement 4, Statement 5, and Statement 6*) of the Cadastre 2014, have been a guide for the development of a cadastral system like the cadastral system of North Macedonia and the cadastre itself. Although some of them are not fully realized and are not completed based on the foreseen frameworks of Cadastre 2014, some of which continue to be in the process of development and work; however, without a doubt it can be said that a basic and very important work has been done and it's very fruitful.

### 3 Priorities of AREC

According to the *STRATEGIC WORK PLAN* [14], AREC, there are three main priorities as a strategy for the realization of goals that AREC puts to itself:

- **Priority No. 1:** AREC is a service-oriented institution.
- **Priority No. 2:** Efficient, Secure, and Safe digital GCIS.

- **Priority No. 3:** Strengthening AREC in institutional capacities and cooperation on the national and international level.

AREC is a service-oriented institution that provides secure and efficient access to GCIS digital data through e-services, manages Graphical Registry of construction land, enters data on streets and house numbers in the database of Graphical Registry, and maintains the Graphical Registry. AREC is a contemporary institution with fully established primary and secondary business processes which ensure the exchange of top quality and updated digital data and services on national and regional levels and contribute to the economic growth and development of the society.

### 4 Conclusions

This paper shows the cadastral system of North Macedonia, and how one has gone through different time stages. It also shows the dealing of the study of historical development and advancement of the cadastral system of North Macedonia. The North Macedonian Cadastre has gone through different periods of time, from the foundation of its



own institution until the present time – nowadays. These are respectively land cadastre, descriptive cadastre, and real estate cadastre, in another way, through graphical, textual, and digital cadastral systems. It shows the development of the cadastral system on its own and the help and the importance of this development as a factor for the rapid development of the state.

The Law on Real Estate Cadastre and later following amendments of the Law also shows its importance on firstly establishing the Real Estate Cadastre, then structure and its organizational part, AREC responsibilities, tasks and works, and AREC financing.

The involvement of the private sector in cadastral works is also a part of this work. It is a very important matter, which plays a unique role, especially for the road of the “Cadastre 2014”. Furthermore, the involvement of the private sector in North Macedonia seems to be very fruitful due to the flexibility of this sector. Cooperation, the method of doing business, and complicity between the private and public sectors lead us to the quality of the work. With private sector involvement in cadastral works, business seems to be explicit and evident.

Priorities and goals of the AREC, also shows that the AREC is concerned and dedicated to being more transparent to users and to the citizens, to get to be more productive in informing and keeping up-to-date users and citizens, also in terms of professional representation of affairs and the responsibilities of the AREC to get to be more efficient, well-organized, more secured and safer, and strengthening the capacities and cooperation of AREC as an institution on the national and international level.

Finally, in this paper, the cadastral system of North Macedonia was discussed with a focus on its administration, technical, and functioning. As a result, we can freely say that the seriousness of improving and developing, has created an effective and efficient cadastral system in North Macedonia in terms of a legal, economic, social, historical, political, and professional context.

#### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

**Similarity rate (iThenticate):** 16%

#### References

- [1] M. Alkan and Z. Abidin, Analysis of Studies on the Land Administration Domain Model in Turkey. 7th International FIG workshop of the Land Administration Domain Model, Zagreb, Croatia, 12-13 April 2018. <https://doi.org/10.4233/uuid:307b5f0d-5b2b-4b7f-8e16-7c01e0c3e2d6>.
- [2] O. Ercan, A closer look at Turkish cadastre and its successful completion. *Land Use Policy*, 110, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104951>.
- [3] FIG, The FIG Statement on the Cadastre. The International Federation of Surveyors (FIG), Commission 7 (Cadastre and Land Management), FIG Publication No: 11, pp.1, 1995.
- [4] G. Navratil, Cadastral Boundaries: Benefits of Complexity. *Urisa Journal*, 23(1), 19–27, 2011.
- [5] I. Williamson, S. Enemark, J. Wallace and A.Rajabifard, Land Administration for Sustainable Development. FIG Congress, Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia, 11-16 April, 2010.
- [6] J. Zevenbergen, A Systems Approach to Land Registration and Cadastre. *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 1(1), 11–24, 2004.
- [7] S. Enemark, From Cadastre to Land Governance. FIG Working Week 2012, Young Surveyors Conference, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 4 – 10 May, 2012.
- [8] T. Bogaerts and J. Zevenbergen, Cadastral systems - alternatives. *Computers. Environment and Urban Systems*, 25, 325–337, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(00)00051-X).
- [9] T. N. Mauparari, Evaluation of mergers of cadastral systems: A corporate cultural perspective. Master's Thesis, University of Twente, Faculty of Geo-Information and Earth Observation, ITC, Twente, Netherlands, 2013.
- [10] B. Fetai, Analysing the Effects of Merging Land Registration and Cadastre Analysing the Effects of Merging Land Registration and Cadastre. Master's Thesis, University of Twente, Faculty of Geo-Information and Earth Observation, Twente, Netherlands, 2015.
- [11] J. Fetai, The development of cadastre in Republic of Macedonia. Master's Thesis, University ss. Cyril and Methodious, Faculty of Civil Engineering, Skopje, North Macedonia, 2009.
- [12] B. Fetai and J. Fetai, Handling of land data : Macedonian case. 3rd International Conderence of Applied Science, ICAS, 2017.
- [13] S. Dimova, Impact of the law on real estate cadastre on improvement of land governance. FIG Working Week 2012, Young Surveyors Conference, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage, Rome, Italy, 6 – 10 May, 2012.
- [14] Agency for Real Estate Cadastre, Strategic Plan of the Agency for Real Estate Cadastre (for the period 2020-2022). [http://www.katastar.gov.mk/wp-content/uploads/dokumenti/strateski\\_planovi/Strateski\\_plan\\_AKN\\_2020.pdf](http://www.katastar.gov.mk/wp-content/uploads/dokumenti/strateski_planovi/Strateski_plan_AKN_2020.pdf)[6.1.2020, Accessed 6.1.2020.
- [15] B. Fetai, M. Krivic, and A. Lisec, Different ways of organizing Land Administration: Slovenian and Macedonian experiences. VI. Croatian Congress on Cadastre and LADM, Croatia, 2018.
- [16] J. Kaufmann and D. Steudler, Cadastre 2014: A vision for a future cadastral system. *Scientific Research*, pp.167-173, 1998.





# Mechanical and microstructural properties of cement mortars developed with different curing conditions and design parameters

## Farklı kür koşulları ve tasarım parametreleri ile geliştirilen çimento harçlarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri

Muhammet Güneş<sup>1</sup> , Hasan Erhan Yücel<sup>2,\*</sup> , Hatice Öznur Öz<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Niğde Ömer Halisdemir University, Civil Engineering Department, 51240, Niğde Turkey

### Abstract

The aim of this study is the investigation of microstructural effects on cement mortars (CMs) of four different parameters as cement dosage, water/cement ratio, pozzolanic material and curing effect. To achieve the purpose of this study, SEM/EDX, XRD, FTIR and TGA/DTA analysis were performed. A total of 18 mixtures were produced and exposed to water curing (WC) and air curing (AC). In the design of these mixtures, three different cement dosages as 360, 400 and 450 kg/m<sup>3</sup> and three different water/cement ratios as 0.40, 0.45 and 0.50 were used. Silica fume (SF) was preferred to observe the effect on microstructural properties clearly of pozzolanic material. In addition, super plasticizer (SP) was utilized in all mixtures and kept constant as 12 kg/m<sup>3</sup>. The compressive strength, flexural strength and ultrasonic pulse velocity (UPV) of these mixtures were determined at 28 and 90 days. Eight mixtures were chosen to observe the effect of four different parameters in a microstructural sense. XRD, SEM/EDX, FTIR and TGA/DTA analyses were applied to these mixtures. It can be said that microstructural analyses supported the findings obtained from mechanical tests.

**Keywords:** Microstructural properties, XRD, TGA/DTA, FTIR, Cement mortars

### 1 Introduction

Some of the factors affecting the strength gain of cementitious composites are cement dosages, water/cement (w/c) ratio and curing. Moreover, the addition of a pozzolanic material to cement matrix directly affects the strength, depending on the amount of active silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) in its content. In the last two decades, a great deal of research has been done on the effect of cement dosage [1,2], w/c ratio [3,4], curing method [5,6] and pozzolanic materials [7,8] on the strength development of cementitious composites. According to these researches, while the increase in cement dosage increased the basic mechanical properties, the increase in w/c ratio affected negatively [1-4]. Nevertheless, strength development of concretes subjected to water curing (WC) was much higher compared to air curing (AC) [5,6].

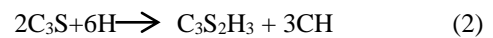
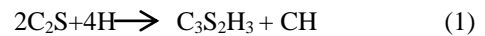
Cementitious composites incorporating several types of concretes and mortars are the most common construction and

### Öz

Bu çalışmanın amacı, çimento dozajı, su/çimento oranı, puzolanik malzeme ve kür etkisi olmak üzere dört farklı parametrenin çimento harçları (ÇH) üzerindeki mikroyapısal etkilerinin araştırılmasıdır. Bu amaca ulaşmak için SEM/EDX, XRD, FTIR ve TGA/DTA analizleri yapılmıştır. Toplam 18 karışım üretilmiş ve bu karışımlar su kürü (SK) ve hava kürüne (HK) maruz bırakılmıştır. Bu karışımların tasarımında 360, 400 ve 450 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere üç farklı çimento dozajı ve 0,40, 0,45 ve 0,50 olmak üzere üç farklı su/çimento oranı kullanılmıştır. Puzolanik malzemenin mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisini net olarak gözlemlenmek için silis dumanı (SF) tercih edilmiştir. Ayrıca, tüm karışımlarda süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmış ve 12 kg/m<sup>3</sup> olarak sabit tutulmuştur. Bu karışımların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı (UTH) değerleri 28 ve 90 günde belirlenmiştir. Mikroyapısal anlamda dört farklı parametrenin etkisini gözlemlenmek için sekiz karışım seçilmiştir. Bu karışımlara XRD, SEM/EDX, FTIR ve TGA/DTA analizleri uygulanmıştır. Mikroyapısal analizlerin, mekanik testlerden elde edilen bulguları desteklediği söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Mikroyapısal özellikler, XRD, TGA/DTA, FTIR, Çimento harçları

building materials used since the manufacture of cement. The main reason for using cement in these composites is that it reacts with water and provides strength since it has a hydraulic binding feature. Increment in the strength can be explained with the Calcium-Silica-Hydrate (C-S-H, C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub>) gels formed by the hydration of dicalcium silicate (C<sub>2</sub>S) and tricalcium silicate (C<sub>3</sub>S), which are the basic components of cement to provide C-S-H gels. The reaction of C<sub>2</sub>S and C<sub>3</sub>S are shown in Equation 1 and Equation 2, respectively as follows [9-14].



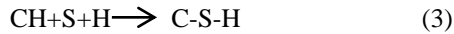
In addition to the reactions mentioned above, there may be different reactions where C-S-H gels are formed depending on the content of the cementitious composites

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: heyucel@ohu.edu.tr (H.E. Yücel)

Geliş / Received: 30.12.2021 Kabul / Accepted: 13.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1055199

[10]. For example, if a pozzolanic material is present in the cementitious mixture, a reaction occurs between active silica and calcium hydroxide (CH) [10]. This reaction, in which C-S-H gels are obtained, is stated below as Equation 3 [10].



These complicated reactions occurring in cementitious composites directly affect the strength gain of the composites [14,15]. Therefore, knowing the mineralogical properties of the mixture and microstructural characteristics of the obtained composite can clearly reveal the effects of these reactions on strength development [14,15].

When the researches are examined in terms of the pozzolanic material, usually, the mechanical strength developed with the increment of the pozzolanic material amount in the cementitious composites [7,8]. Particularly, the positive effect of pozzolanic materials with high SiO<sub>2</sub> content, such as silica fume (SF), on the flexural strength and compressive strength was clearly seen [16-18]. SF is an amorphous (non-crystalline) and non-hazardous by-product material from silicon and Ferro-silicon alloy industry having ultra-fine particle size and large surface area which is suitable for concrete mix [16,19,20]. SF reacts with calcium hydroxide in the concrete mix to form stable calcium hydro silicates. According to research carried out by the authors of [21,22], silica fume does not affect C-S-H densities but does influence the chemical composition of the phase. At the same time, C-S-H phase thickening is observed with time. Fine particles of silica (nanosilica) significantly affect the acceleration of the hydration processes of clinker phases, as well as the amount of hydrated phases formed, especially during the first seven days of hydration [21,23]. Therefore, as seen in Equation 1 and 2, the amount of CH emerging as a by-product has also attracted the attention of the researchers owing to the contribution to the formation of C-S-H gel as given in Equation 3 [9-14]. Previous studies revealed that at 10–15% partial replacement of cement with SF can result in an increasing strength of concrete [18,24-26]. Benli [16,27] investigated the performance of mechanical properties of self-compacting mortars mixes with SF and fly ash and observed that 15% (5% fly ash and 10% SF) replacement of cement produced best compressive and flexural strengths. [16]. In other research, Duval and Kadri [28] indicated that partial replacement of SF up to 10% does not reduce the workability and also up to 20 percent SF content the maximum strength is obtained. Singh et al. [29] observed that when 5% and 10% of cement are replaced with SF, the maximum compressive strength is obtained by replacing 10% of SF. According to the literature studies, it can be clearly stated that SF increases the mechanical performance of concrete. However, investigating the effects of SF on the increase in strength in two different curing effects may be a privilege of this study.

In literature studies, important analysis techniques such as XRD, FTIR and TGA/DTA have been used to characterize the C-S-H and CH content and to investigate the potential and actual CaCO<sub>3</sub> (C) binding for the different mixtures of cementitious composites [30]. In addition,

SEM/EDX is applied to determine the variations in microstructures. For example, Weerdt et al. [31] indicated that the Ca/Si ratio of ordinary Portland cement incorporating fly ash as pozzolanic material decreased compared to ordinary Portland cement while Al/Si ratio increased. Similarly, other literature studies showed that cement-based materials included the higher Al/Si and lower Ca/Si ratios in the presence of pozzolanic material after longer reaction times [31-36]. Moreover, at the end of XRD analysis performed by Awoyera et al. [37] were determined CH formed as result of hydration reaction between cement and water in cementitious materials can be provide for early strength gain in the cement paste, largely because of fast self-hydration of the cement. They reported that the reduction of the CH peaks in the cement matrix after 28 days can be explained with the pozzolanic reactions performed after the initial hydration reactions, in the presence of the pozzolanic material. Akça and Özyurt [38] used XRD analysis to determine the quantities of C-S-H, CH and C in concrete under different curing conditions. Moreover, in the same research, variations of CH and C content were determined with TGA/DTA analysis. Researchers observed that the effects of AC and WC conditions for CH and C contents changed in samples taken from the center and surface of the samples [38]. Du and Tan [39] indicated that CH consistently reduced in the cement matrix with increased pozzolanic material. Wang et al. [40] reported that mechanical and durability properties of the concrete incorporating SF developed and this development can be explained with the pozzolanic reactivity of SF, which is verified by FTIR at 3640 cm<sup>-1</sup> revealed that chemical reactions between SF and CH. According to this information obtained from the literature, it was determined that the C-S-H and CH changes in cementitious composites with the addition of pozzolanic material were determined or the curing effects on CH and C were investigated. However, when different cement dosage and different water/binder ratio was used, the lack of scientific studies in the literature on how the CH and C contents change has been identified. In addition, it is considered that pozzolanic material behavior under different curing effect needs to be investigated with XRD, SEM/EDX, FTIR and TGA/DTA analysis. Therefore, it is very important to evaluate these parameters mineralogical by XRD analysis and to reveal their microstructural properties with SEM-EDX, FTIR and TGA/DTA analysis and to examine them in terms of hydration reactions.

Although the effects of the above-mentioned parameters on the basic mechanical tests such as flexural strength and compressive strength of cementitious composites were investigated in previous studies, there is no study evaluating the results in terms of microstructural and mineralogical characteristics. For this purpose, the mineralogical and microstructural properties of CMs, whose compressive and flexural strengths were investigated with four different parameters (cement dosages, w/c ratio, curing and pozzolanic material), were determined on selected eight mixtures.

## 2 Experimental Study

### 2.1 Materials

A total of 18 CMs developed in this study were composed of CEM I 42.5R type (ASTM Type I cement) ordinary Portland cement. The one of aims in this study was to determine how the pozzolanic material will exhibit its effect on strength development in two different curing effects. Therefore, it was thought that a single usage rate would be decisive in determining this difference. According to literature studies, it was determined that SF had a significant effect on strength development at 10% usage rate. Consequently, in the 9 CM mixture, SF was used as a pozzolanic material at a rate of 10%. The SEM images and physical and chemical properties of cement and SF are presented in Figure 1 and Table 1, respectively. As seen in Table 1, silica content of SF was determined as 68.64%. As it is known, silica content of SF is generally 90% and above. Therefore, the XRD analyses of both the SF used in this study and the SF with 91.85% silica content are given in Figure 2 together with the XRD analysis of the cement. According to the XRD results, it was determined that the SF used in this study had similar XRD patterns to SF incorporating 91.85% silica. Thus, it has been proven that the material used in this study is SF. However, the peak differences at 19, 28, 32 and 36 [ $2\theta$ ] of the SF used in this study can be considered as a result of the fact that it contains less silica and more MgO, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O than that of the other SF. In addition, particle size distribution curves of materials used in the production of CMs are presented in Figure 3. Natural sand (0–4 mm) and crushed sand (0–2 mm) were used in the CMs. Specific gravities of these materials are 2.67 and 2.63, respectively. The natural sand from river was utilized to enhance the workability of HPM because of natural process of attrition tends to possess better shape and smoother surface texture. It also carries moisture that is trapped in between the particles. Crushed sand with angular, rough surface structure and low grain size (0–2 mm) was used to meet the strength requirement of CM. CMs contained 100% natural aggregates including 70% natural sand and 30% crushed sand by the total aggregate volume. For each volume concentration, a grading curve was generated to be used in the final mortar mixture regarding the regions recommended by TS 706 [41]. Liquid polycarboxylic ether-based super plasticizer (SP) with specific gravity of 1.07 and solid content of 40% was utilized to increase workability.

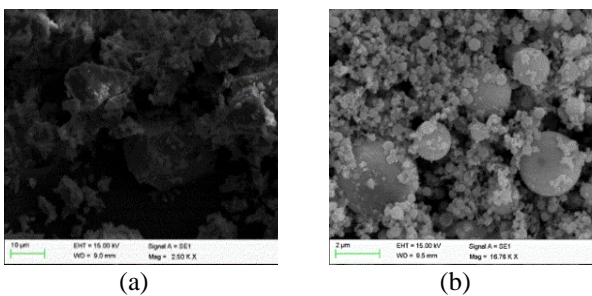


Figure 1. SEM images of (a) cement and (b) SF

Table 1. The chemical and physical properties of cement and SF

Chemical Analysis (%)	Cement	SF
CaO	65.73	1.16
SiO <sub>2</sub>	18.24	68.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.57	1.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.89	1.54
MgO	1.87	9.63
K <sub>2</sub> O	0.79	3.11
Na <sub>2</sub> O	0.25	4.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.10
Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	0.07	0.15
TiO <sub>2</sub>	0.28	-
Physical Properties	Cement	SF
Loss of Ignition	2.50	4.50
Specific Gravity	3.15	2.42
BET Analysis (m <sup>2</sup> /kg)	431.29	2983.70

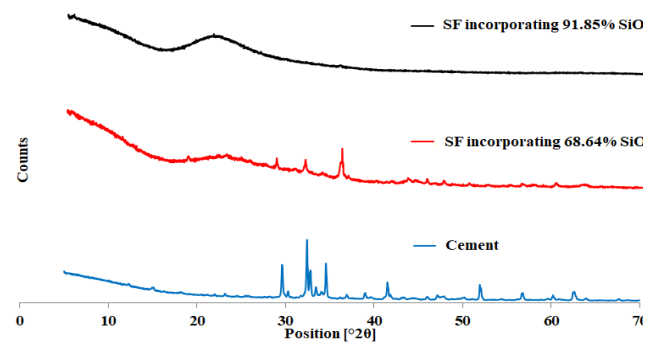
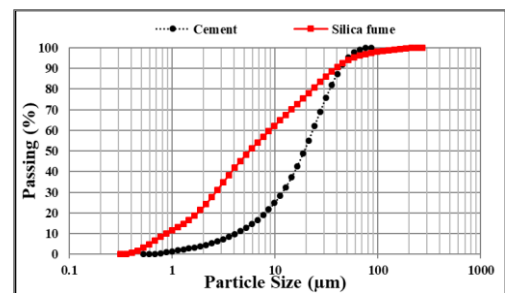
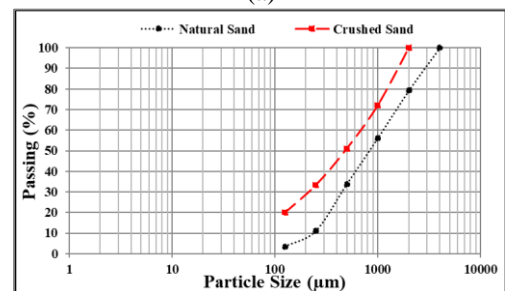


Figure 2. XRD analyses of cement and SF



(a)



(b)

Figure 3. SEM images of (a) cement and SF and (b) natural sand and crushed sand

## 2.2 Production procedure and mixing proportions of CMs

A total of 18 CMs were produced and these mixtures were exposed to WC and AC. In the design of CM mixtures, three different cement dosages as 360, 400 and 450 kg/m<sup>3</sup> and three different w/c ratios as 0.40, 0.45 and 0.50 were determined. In addition, SF was preferred to investigate clearly the effects on microstructural properties of CMs of pozzolanic material. SP was utilized in all mixtures as 12 kg/m<sup>3</sup>. Mixing proportions of CMs are given in Table 2. Codes of CMs were denoted depending on binder amount, water/binder ratio and SF content, respectively, For example; CM-360-0.4-10 mixture designed with 360 kg/m<sup>3</sup> cement and SF, 0.4 water/binder ratio and 10% SF (10% of binder content). CM mixtures were produced according to ASTM C305 [42].

## 2.3 Test procedures

### 2.3.1 Fresh and mechanical tests

The fresh properties of CMs were determined with slump flow diameter test according to ASTM C1437 [43]. Firstly, CMs were tamped 20 times after fill to half and all of the mold. Then, the surface of the CMs was levelled with a trowel. Finally, the table dropped 25 times in the 15 second, and the slump flow diameters of CMs were determined.

The mechanical behaviours of CMs were determined with flexural strength, compressive strength and ultrasonic pulse velocity (UPV) tests. Compressive strengths and flexural strengths of CMs were determined with respect to ASTM C349 [44] and ASTM C348 [45] at 28 and 90 days, respectively. The flexural strength tests of CMs were performed with three specimens in dimensions of 40x40x160

mm<sup>3</sup>. Compressive strength tests of CMs were carried out on six specimens using prism pieces broken in flexural strength tests. The flat surfaces of the broken samples were placed in a special apparatus. Inside the special apparatus, there were two square pieces, one at the bottom and the other at the top of the apparatus, with a side length of 40 mm. The samples were placed between the parts inside this apparatus. Thus, sample was made to break into a cube with a length of 40 mm of one side. UPV test, performed on three specimens in the dimensions of 40x40x160 mm<sup>3</sup> was done accordance with ASTM C597 [46] at 28 and 90 days. UPV values along with flexural strengths and compressive strengths of CMs were determined with the average of test results.

### 2.3.2 SEM/EDX, XRD, TGA/DTA and FTIR analyses

To observe the effect of the design parameters on the microstructural analysis of CMs, the eight mixtures were determined. The morphological, mineralogical and microstructural performance characteristics of the CM-360-0.40-0-WC, CM-400-0.40-0-WC, CM-450-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC, CM-400-0.50-0-WC, CM-400-0.40-10-WC, CM-400-0.40-0-AC and CM-400-0.40-10-AC mixtures were determined with the aid of SEM/EDX, XRD, TGA/DTA and FTIR analyses. Morphological properties expressed shape and structure were investigated with SEM analysis. Since mineralogical properties indicate the compounds forming the structure, mineralogical properties of CMs were determined by EDX, XRD, TGA/DTA and FTIR analyses. Microstructural properties, on the other hand, include all these analyses since they express all the factors in the microstructure.

**Table 2** Mixing proportions of CMs (kg/m<sup>3</sup>)

Mix ID	water/ binder	Binder amount	Cement	SF	Water	Natural sand	Crushed sand	SP
CM-360-0.40-0	0.40	360	360	-	144	1367.6	577.3	12
CM-360-0.40-10	0.40	360	324	36	144	1361.1	574.6	12
CM-400-0.40-0	0.40	400	400	-	160	1313.9	554.7	12
CM-400-0.40-10	0.40	400	360	40	160	1306.7	551.6	12
CM-450-0.40-0	0.40	450	450	-	180	1246.9	526.4	12
CM-450-0.40-10	0.40	450	405	45	180	1238.8	523.0	12
CM-360-0.45-0	0.45	360	360	-	162	1333.9	563.1	12
CM-360-0.45-10	0.45	360	324	36	162	1327.5	560.4	12
CM-400-0.45-0	0.45	400	400	-	180	1276.6	538.9	12
CM-400-0.45-10	0.45	400	360	40	180	1269.4	535.9	12
CM-450-0.45-0	0.45	450	450	-	202.5	1204.8	508.6	12
CM-450-0.45-10	0.45	450	405	45	202.5	1196.7	505.2	12
CM-360-0.50-0	0.50	360	360	-	180	1300.3	548.9	12
CM-360-0.50-10	0.50	360	324	36	180	1293.8	546.2	12
CM-400-0.50-0	0.50	400	400	-	200	1239.2	523.1	12
CM-400-0.50-10	0.50	400	360	40	200	1232.0	520.1	12
CM-450-0.50-0	0.50	450	450	-	225	1162.8	490.9	12
CM-450-0.50-10	0.50	450	405	45	225	1154.7	487.5	12

CM-360-0.40-0-WC, CM-400-0.40-0-WC and CM-450-0.40-0-WC mixtures have been selected to determine the differences between different cement dosages. CM-400-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC and CM-400-0.50-0-WC mixtures have been used to observe the different w/b effect. CM-400-0.40-0-WC, CM-400-0.40-10-WC, CM-400-0.40-0-AC and CM-400-0.40-10-AC mixtures have been analysed to determine the effect of pozzolanic material under different curing conditions. In addition, CM-400-0.40-0-WC with CM-400-0.40-0-AC mixtures and CM-400-0.40-10-WC with CM-400-0.40-10-AC have been compared to observe the effects of WC and AC. While SEM analysis was performed, EDX was determined at area determined on the SEM analysis. The XRD scanning process was applied at steps of 0.013° and in the range of 10 to 70°. TGA analysis was performed in the range of 25 °C–1000 °C. 15 mg powered samples for TGA analysis was heated at nitrogen atmosphere with scanning rate of 10 °C/min. Typical FTIR frequency unit analysis was wave numbers (cm<sup>-1</sup>). Analysis of the individual spectra in FTIR was determined with a chemical reaction in the specimen. The temperature and relative humidity in the FTIR analysis were 20 °C and 60%, respectively.

### 3 Results and discussions

#### 3.1 Slump flow diameter

The results of slump flow diameters of a total of 18 CMs were presented in Figure 4. As seen in Figure 4, workability of CMs increased as a result of decreased aggregate amount due to increasing cement dosage at the same water/binder (w/b) ratios. For example, slump flow diameter of CM450-0.4-0 mixture was higher than that of CM400-0.4-0 and CM-360-0.4-0. Therefore, it can be said that a reduction in the aggregate content depending on increase of cement dosage leads to a reduction in the water content, which decreases the CMs' workability. In addition, it is known that as water increases in the cement based composites, the spacing of the fine materials grains increase. This increment in grain spacing of powder materials can improve the workability of mortar/concrete [47,48]. Therefore, for all CMs, when considered fixed cement dosages and SF contents, slump flow diameters of CMs increased with rise of w/b ratio. Exemplarily, workability of CM-360-0.5-0 was higher than that of CM-360-0.45-0 and CM-360-0.4-0. In addition, SF, another parameter of this study, increased partially the workability of CMs. For instance, slump flow diameters of CM-450-0.5-10, CM-400-0.5-10 and CM-360-0.5-10 mixtures was measured as 24.4, 20.7 and 17.5 while for CM-450-0.5-0, CM-400-0.5-0 and CM-360-0.5-0 mixtures, this values were determined as 22.7, 20.3 and 15.2, respectively. Incorporation of SF developed results of slump flow diameter because of its lubrication effect that would release water entrapped between small particles [15,49]. Moreover, this development in workability of CMs can be explained with the spherical micro-structure of SF presented in Figure 1. This spherical microstructure reduced inter-particle friction as a result of the particles act as small bearings [15,50,51]. Therefore, it can be said that all these results are

in agreement with conclusions pointed out in previous studies.

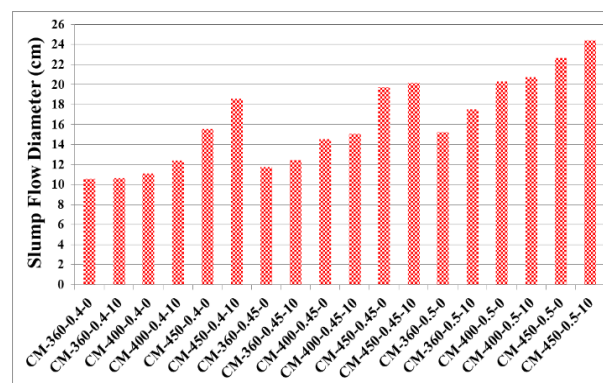


Figure 4. Slump flow diameters of CMs

#### 3.2 Compressive and flexural strengths and ultrasonic pulse velocity (UPV)

The compressive strength, flexural strength and UPV test results of CMs exposed to WC and AC are shown in Figure 5, Figure 6 and Figure 7, respectively. As expected, the strength characteristics of the samples subjected to WC were higher than that of AC. However, the compressive strengths at 90 days of the mixtures exposed to WC were 14.5%-22.1% higher than the compressive strengths at 28 days. These values for mixtures exposed to AC were determined as 10.1%-23.8%. Similarly, in study investigating the effect of SF on the compressive strength of concrete by Duman [52], was determined that the 90-day compressive strength of the mixtures was 10.3%-46.2% higher than the 28-day compressive strength. Compressive strength, flexural strength and UPV values of CMs changed in parallel to each other. For constant w/b ratio and constant SF content (CMs with/without SF), with the increase of cement dosage improved the mechanical properties of CMs at 28 and 90 days. Exemplarily, for both WC and AC, strength characteristics of CM-450-0.4-10 were higher than that of CM-400-0.4-10 and CM-360-0.4-10. The increase in cement content increased the hydration reaction and the resulting hydration product. Moreover, the use of more cement reduced the porosity of CMs. When mixtures having constant cement and SF (with/without) content was evaluated, it can be clearly said that the increase in w/b ratio reduced the strength characteristics and UPV values of CMs for both WC and AC. For example, compressive strength of CM-450-0.4-0 was higher than that of CM-450-0.5-0 in the ratios of 11.9% and 12.3% at 28 and 90 days for WC, respectively. For AC, these values were calculated as 15% and 7.7% at 28 and 90 days, respectively. As a result of the increase in the water content of CMs, hydration products had greater difficulty to fill the space between the cement grains [47,48]. This increment in porosity decreased the mechanical performance and UPV values of CMs [53]. Bentz and Aitcin [54] and Dowell and Cramer [55] expressed that water to cement ratio had adverse relation with strength. Some other investigators stated have that strength characteristic of concrete developed with reducing water to cement ratio [56-

60]. In addition, 10% SF content in CMs increased the flexural and compressive strengths along with UPV values compared to CMs produced without SF at 28 and 90 days. For WC, this development changed in the range of 4.4-9.8% and 5.3-8.4% at 28 and 90 days, respectively. For AC, these values were in the range of 6.9-12.6% and 5.2-10.0% at 28 and 90 days, respectively. Similar to these results, in the study conducted by Özcan [61] using different w/b ratios, the compressive strength of concrete containing 10% SF compared to the control concrete was found to be higher in the ranges of 3.8%-20% at 28 days and 4.3%-22.5% at 90 days for WC. Moreover, at different w/b ratios, the compressive strength of the mixture containing 10% SF for AC at 28 and 90 days was higher than that of the control mixture in the ranges of 10.8%-30.5% and 11.5%-30.2%, respectively. In addition, Özcan [61] stated that this strength improvement continued for both different w/b ratios and different curing methods in the use of 10% SF at 180 days. According to these results, the physical and chemical effects of SF provided a significant improvement in compressive strength. Strength increase performed under both curing conditions in the presence of SF can be explained with pozzolanic characteristic and fineness of SF. The pozzolanic reactions between CH occurring from hydration of cement and amorphous SF formed C-S-H (calcium-silicate-hydrate) gels [15, 51]. In addition, as seen in Table 1, fineness of SF mineral (2983.70 kg/m<sup>3</sup>) was much higher than that of cement (431.29 kg/m<sup>3</sup>). This micro-fine mineral increased the packing of solid materials and decreased the porosity by filling spaces between cement grains [15, 62].

### 3.3 SEM/EDX

The eight samples of 18 mixture exposed to WC and AC were selected to observe the effect of the design parameters on the mineralogical and microstructural properties of CMs. Figure 8 shows the results obtained from the SEM/EDX scanning. Ca/Si ratios of these eight samples were given in Table 3. As seen in Figure 8 and Table 3, Ca/Si ratios of CM-360-0.40-0-WC, CM-400-0.40-0-WC, CM-450-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC, CM-400-0.50-0-WC and CM-400-0.40-0-AC mixtures were almost equal to each other. According to this result, different cement dosage and w/b ratio of CMs exposed to different two curing effect did not change the Ca/Si ratio in the CMs due to the elemental contents of the materials forming the matrix for these six samples were the same. Therefore, it can be said that increasing or decreasing the cement dosage and w/b ratio in CM, or curing in water/air of the mixtures may be affected positively or negatively the reactions in the matrix, but does not changed the elemental ratios in the total mass. However, the inclusion of a different material in the cement matrix can affect chemical reactions or change the ratio of Ca/Si in the total mass. As stated in the Table 3, Ca/Si ratios of CM-400-0.4-10-WC and CM-400-0.4-10-AC were lower than that of CM-400-0.4-0-WC and CM-400-0.4-0-AC, respectively. This can be explained with higher SiO<sub>2</sub> content of SF used instead of cement as seen in Table 1. In addition, the Ca/Si ratio of the CM-400-0.4-10 mixture containing 10% SF and exposed to two different curing effect, was very close to each

other. Therefore, it can be said that different curing types effected chemical reactions but, did not affect the mineralogical structure of the materials in cement matrix.

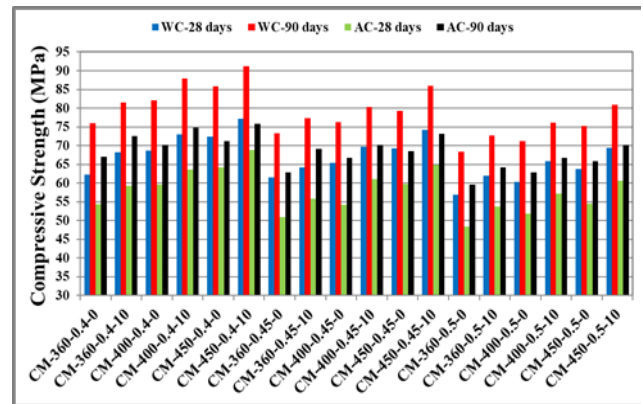


Figure 5. Compressive strengths of CMs

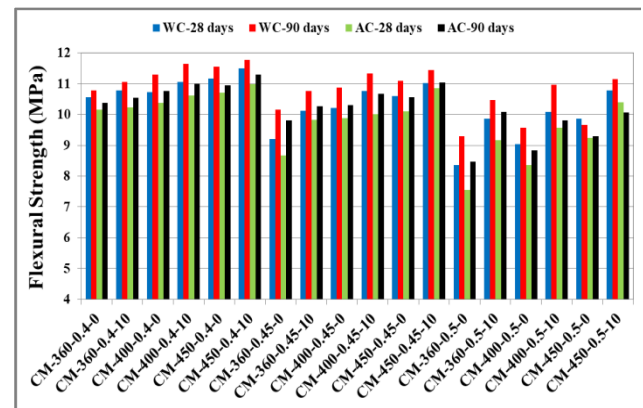


Figure 6. Flexural strengths of CMs

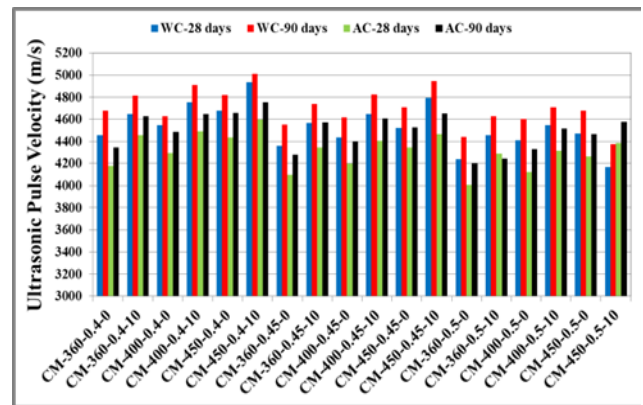


Figure 7. UPV values of CMs

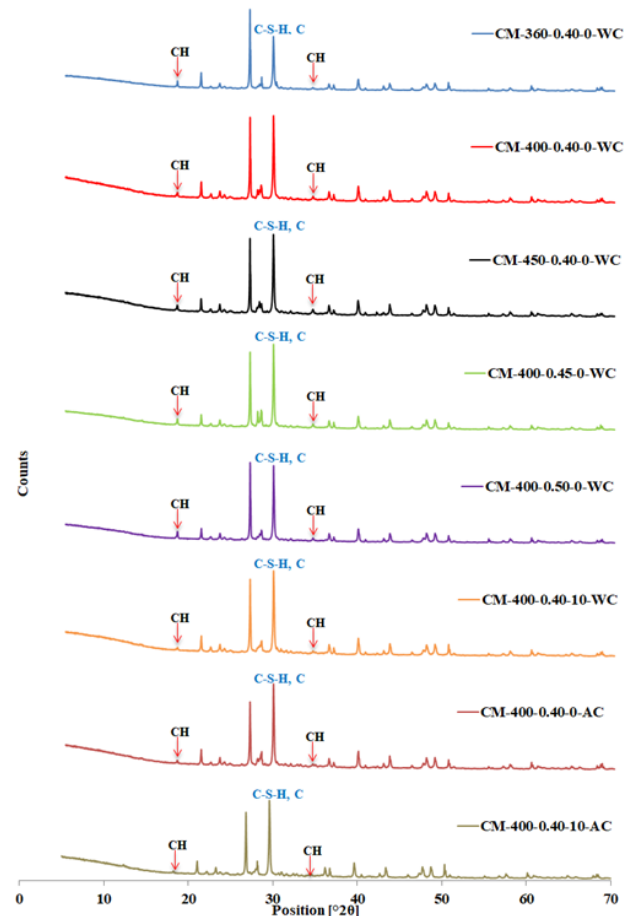
### 3.4 XRD

The XRD analyses of the selected eight mixtures for 90 days are given in Figure 9. As seen in Figure 9, the peak (around 29.5 °2θ) showed the C-S-H and CaCO<sub>3</sub> (C) components is exactly the same. For this reason, the evaluation of XRD results was made based on the peaks (around 18.0 and 33.7 °2θ) showed Ca(OH)<sub>2</sub> (CH) content instead of C-S-H. The CH contents of CM-360-0.40-0-WC,

CM-400-0.40-0-WC and CM-450-0.40-0-WC mixtures given in Figure 8 increased depending on increasing cement content. This increase can be explained by the formula presented in Equation (1,2). According to these formulas, the CH content in the mortar/concrete increases in parallel with the increase in strength ( $C_3S_2H_3$ ). Therefore, it can be said that the increment in the cement content increased the CH content of the CMs as well as rising the strength. The effect of changing w/b ratio on the CH content of cement mortar was determined with the help of CM-400-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC and CM-400-0.50-0-WC. As seen in Figure 8, the w/b ratio had no significant effect on the CH content of the CMs. Two different curing effects on the CH content of CMs were investigated with CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC. According to the results, the CH content of mixture exposed to AC was lower than that of WC. Similarly, the CH content of CM-400-0.40-10-AC was lower than that of CM-400-0.40-10-WC. This situation can be explained by the fact that the reaction in WC can be developed faster thanks to the water in the environment and thus the hydration products (C-S-H and CH) are more. Therefore, both the strength and CH content of the CMs exposed to WC were higher than AC. It can be said that SF reduced the CH content of CMs for both curing conditions. The CH content of CM-400-0.40-10-WC and CM-400-0.40-10-AC was lower than that of CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC, respectively. It is known that the chemical reactions between CH formed as a result of cement hydration with amorphous SF, form C-S-H gels [15,51]. In addition, the presence in the cement paste of SF mineral form smaller CH crystals, accelerates the reactions and induces several nucleation sites for precipitation of the hydration products [15,63]. Therefore, SF increased strength characteristics, also reduced the CH content in cement matrix.

**Table 3.** Ca/Si ratios,  $Ca(OH)_2$  (CH, %) and  $CaCO_3$  (C, %) contents of CMs

Mix ID	SEM/EDX	TGA/DTA	
	Ca/Si	$Ca(OH)_2$ (CH,%)	$CaCO_3$ (C,%)
CM-360-0.40-0-WC	2.01	0.60	16.63
CM-400-0.40-0-WC	1.99	0.77	16.01
CM-450-0.40-0-WC	1.99	0.82	16.19
CM-400-0.45-0-WC	1.94	0.74	16.63
CM-400-0.50-0-WC	1.98	0.75	17.74
CM-400-0.40-10-WC	1.59	0.43	16.34
CM-400-0.40-0-AC	1.95	0.50	15.15
CM-400-0.40-10-AC	1.57	0.26	15.45

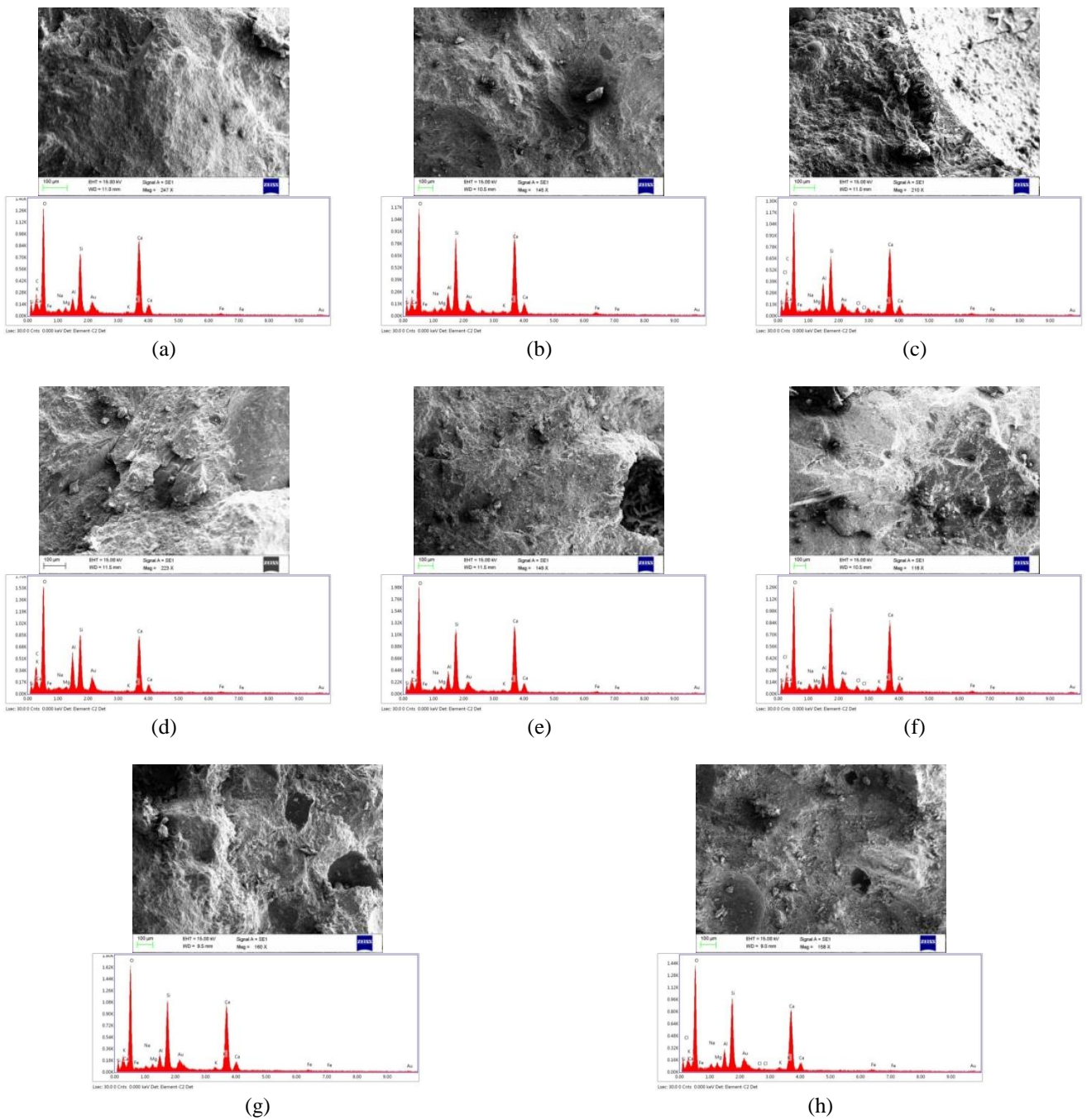


**Figure 9.** XRD analyses of determined eight mixtures

### 3.5 TGA/DTA

The results obtained from the TGA and DTA analysis should be considered to better understand the pozzolanic reactions and hydration kinetics of the CMs [64]. The portlandite content in CMs could be determined thinking the theoretical mass losses from the mass losses calculated from the TGA charts (Figure 10) between approximately peaks corresponding to 400 °C-460 °C temperatures (initial-final) in the DTA charts (Figure 10) [65]. Therefore, the weight corresponding to 460 °C was subtracted from the weight corresponding to 400 °C in the TGA diagrams and the CH contents given in Table 3 of the mixtures were determined. Note that, when CH in cement matrix is decomposed to  $H_2O$  and CaO (burnt lime), the theoretical mass loss by the evaporation of the water was calculated [65]. It is an important curiosity issue how the content of CH has changed with increasing cement dosage, varying w/b ratios and different curing conditions. In addition, the change of CH content for both different curing effect in the cement paste over time, was utilized to quantify the chemical reaction of SF [66]. TGA/DTA analysis could be utilized to identify the hydration degree of cement via CH decomposition [66].





**Figure 8.** SEM images EDX results of a) CM-360-0.40-0-WC, b) CM-400-0.40-0-WC, c) CM-450-0.40-0-WC, d) CM-400-0.45-0-WC, e) CM-400-0.50-0-WC, f) CM-400-0.40-10-WC, g) CM-400-0.40-0-AC, h) CM-400-0.40-10-AC

Table 3 and the sharpness of DTA peaks in the range of 400-460 °C in Figure 10 (a, b, c) indicated that the CH content of CM-450-0.40-0-WC mixture were higher than that of CM-400-0.40-0-WC. The lowest CH content between these three mixtures was obtained from the CM-360-0.40-0-WC mixture. According to these results and the mechanical test results, based on the increased cement dosage, the CH contents of CMs increased, as well as the strengths. This can be explained by the hydration reaction of  $C_3S$  and  $C_2S$  presented in Equation (1) and Equation (2). As seen in Equation (1) and Equation (2), the increase in the amount of

$C_3S$  and  $C_2S$  reacted in cement matrix has been increased the CH content together with the C-S-H gel formed as a result of the reaction.

Graphical representations of CM-400-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC and CM-400-0.50-0-WC mixtures preferred to evaluate the effect of w/b ratio were shown in Figure 10 (b,d,e) and calculated CH contents of these three CMs were listed in Table 3. The CH contents of these three mixtures were very close to each other. Therefore, it can be said that no affecting the CH content in CMs of the increase/decrease in the w/b ratio. However, it was described in the section of

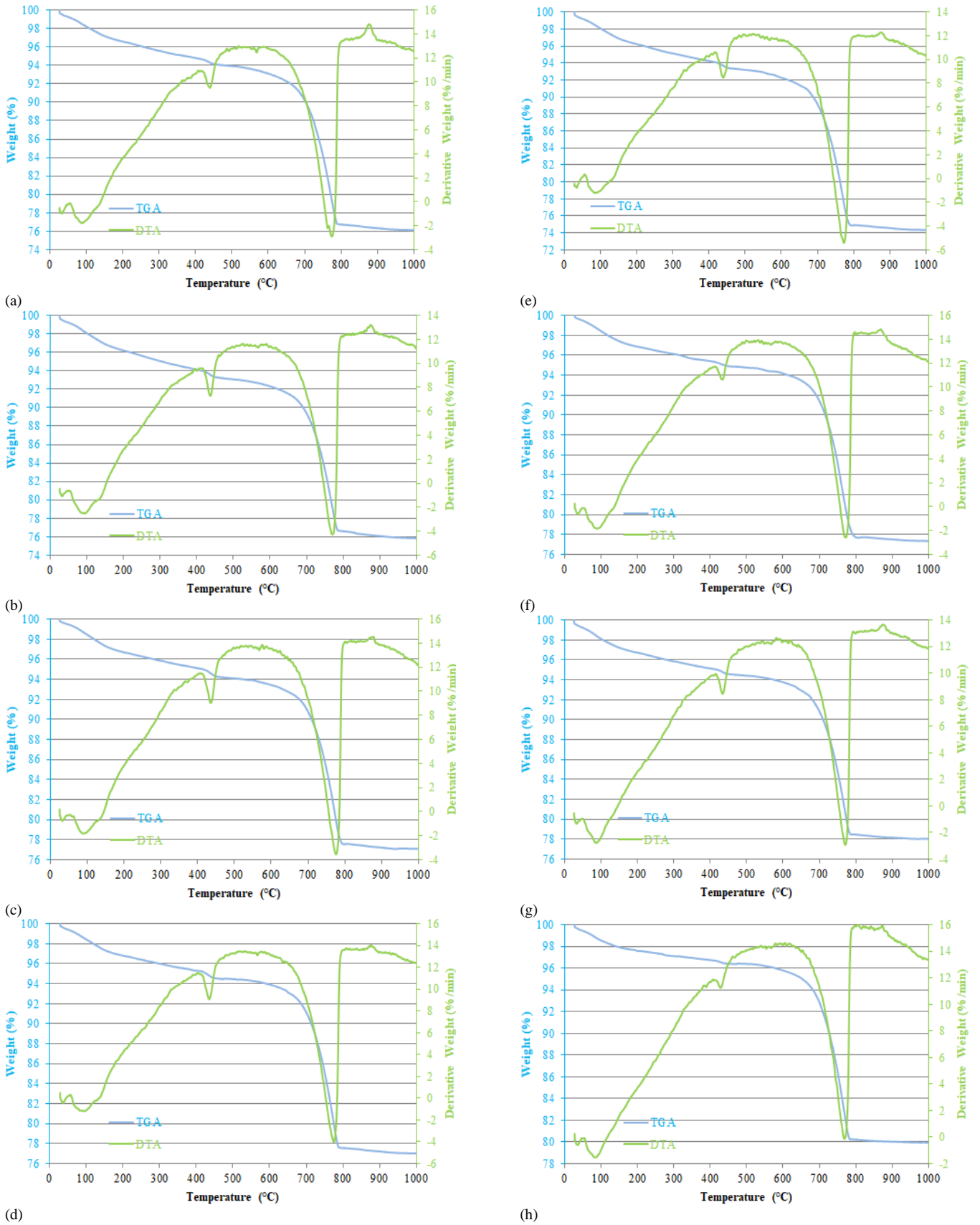
mechanical properties that the increased w/b ratio reduced strength characteristics. Therefore, this decrease can be attributed to porosity caused by increased water content and was not related to the content of CH. The effects of WC and AC on the CH contents of CMs were investigated with CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC mixtures given TGA/DTA curves in Figure 10 (b,g). Table 3 indicated that CH contents of these two samples were 0.77% and 0.50%, respectively. Similarly, when CM-400-0.40-10-WC and CM-400-0.40-10-AC (Figure 10 (f,h)) mixtures containing SF are also compared to each other in terms of CH contents, it was observed that CM subjected to the AC had a lower CH content. The lower CH content amount of CM exposed to AC can be attributed to much more hydration products formed the faster hydration reaction result in the WC. When Equation (1) and Equation (2) was considered, it can be said that there is more C-S-H gels of CM-400-0.40-0-WC, due to included more CH as a result of increased hydration product. Thus, the higher mechanical performances of CMs exposed to WC can be explained micro structurally more effectively. In addition, the weight loss because of CH decomposition of hydration products by TGA/DTA analysis was utilized to measure the amount of pozzolanic reaction [66]. The CH content of the CM-400-0.40-10-WC shown in Figure 10 (b,f) was much lower than that of the CM-400-0.40-0-WC. Similarly, the CH content of the CM-400-0.40-10-AC shown in Figure 10 (g, h) is much lower than that of the CM-400-0.40-0-AC. When the TGA/DTA analysis were evaluated, it can be seen that CH in CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC was 0.77% and 0.50% while CH in CMs incorporating 10% SF was 0.43% and 0.26%, respectively. Presence in the lower amount of CH in CMs incorporating SF can be the result of chemically bonding of the CH thanks to much more silica content (%68.64 given in Table 1) in chemical composition of SF [15].

It is known that decarbonation of carbonates in mortar/concrete began after 600 °C [51,68]. DTA peaks of a mortar/concrete sample for approximate 700 °C present CaCO<sub>3</sub> (C) decarbonation [69-72]. After 800 °C, weight loss of mortar/concrete slows down and also, most of the components in mortar/concrete become decomposed [67]. TGA/DTA curves given in Figure 10 have been confirmed the information above. The C contents of CMs were determined with the mass losses calculated from the TGA graphics approximately in the range of 600 °C-800 °C (initial-final) temperatures of the corresponding to peaks in the DTA graphics. Therefore, the weight corresponding to 600 °C was subtracted from the weight corresponding to 800 °C in the TGA diagrams and the C contents given in Table 3 of the mixtures were determined. When the values given in Table 3 for Figure 10 (a,b,c) were examined, it can be said that the cement dosage did not have a significant effect on carbonation. XRD and TGA/DTA analyses showed that the CH content of CMs changed in parallel with the cement content in the matrix. Therefore, the C content of CMs not being parallel to the cement dosage can be attributed to the C ensuing from C-S-H carbonation in the cement paste. The values given in Table 3 for Figure 10 (b,d,e) showed that the C content of the CMs increased with rising w/b ratio. In the

XRD and TGA/DTA analysis, it was determined that the water content did not have a significant effect on the CH content. The increased C with increment in water content may be the result of the carbonation of C-S-H. When the CM-400-0.40-0-WC and CM400-0.40-10-WC (Figure 10(b,f)) were compared, it can be said that SF was slightly increased carbonation. Similarly, when Figure 10 (g) and Figure 10 (h) were compared, the partial increment for carbonation of CM containing SF was observed. Considering that the mixtures incorporating SF have less CH content, it can also be thought to increase the carbonation caused by C-S-H due to increased C-S-H in the cement matrix. Effects of WC and AC cures on carbonation of CMs were evaluated via CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC or CM-400-0.40-10-WC and CM-400-0.40-10-AC. According to XRD and TGA/DTA analyses, CH content of the mixtures subjected to AC was lower than that of other mixtures. In addition, the lower strength characteristics of the mixtures subjected to AC can be explained by the fact that less C-S-H formed as a result of slowing hydration due to the absence of water in the environment. Therefore, the degree of carbonation for AC was lower due to the mixtures exposed to AC contained less CH and C-S-H.

### 3.6 FTIR

FTIR spectrum can be thought as a graphic of transmittance and/or infrared light absorbance as a function of wavelength and/or frequency. When infrared light passes through the sample, all of functional group ensures the spectra to resonate at the characteristic absorption frequencies. The chart results define chemical reaction between the molecules [73]. It is known that, approximate 3643 cm<sup>-1</sup> wave number in FTIR spectra represents the CH redient of mortar/concrete. Therefore, as seen in Figure 11, 3600-3700 cm<sup>-1</sup> wavelength range of FTIR spectra was presented to investigate CH changes of the eight mixtures [74]. FTIR spectra showed that CH changes of the mixes supported the results obtained from XRD and TGA/DTA analyses. In accordance with the formula given in Equation 1 and Equation 2, the increased amount of cement increased the CH content in cement matrix. The CH content of CM-450-0.40-0-WC was higher than that of CM-400-0.40-0-WC and CM-360-0.40-0-WC, respectively. According to FTIR spectra of CM400-0.40-0-WC, CM-400-0.45-0-WC and CM400-0.50-0-WC, increased water content for constant cement dosage did not have a significant effect on the quantity of CH. When the pozzolanic material was used in CM, FTIR spectra were in agreement with TGA/DTA curves and XRD patterns. Namely, CH peak in the FTIR spectrum of the CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-10-WC with hydration reactions accelerated thanks to water curing was higher than that of CM-400-0.40-0-AC and CM-400-0.40-10-AC, respectively. The CH peaks of the CM-400-0.40-0-WC and CM-400-0.40-0-AC mixtures were sharper than that of the CM-400-0.40-10-WC and CM-400-0.40-10-AC mixtures, respectively. FTIR spectrum clearly indicated that, the increased amount of SF in CM reduced the CH content by the pozzolanic reaction.



**Figure 10.** TGA and DTA results of a) CM-360-0.40-0-WC, b) CM-400-0.40-0-WC, c) CM-450-0.40-0-WC, d) CM-400-0.45-0-WC, e) CM-400-0.50-0-WC, f) CM-400-0.40-10-WC, g) CM-400-0.40-0-AC, h) CM-400-0.40-10-AC

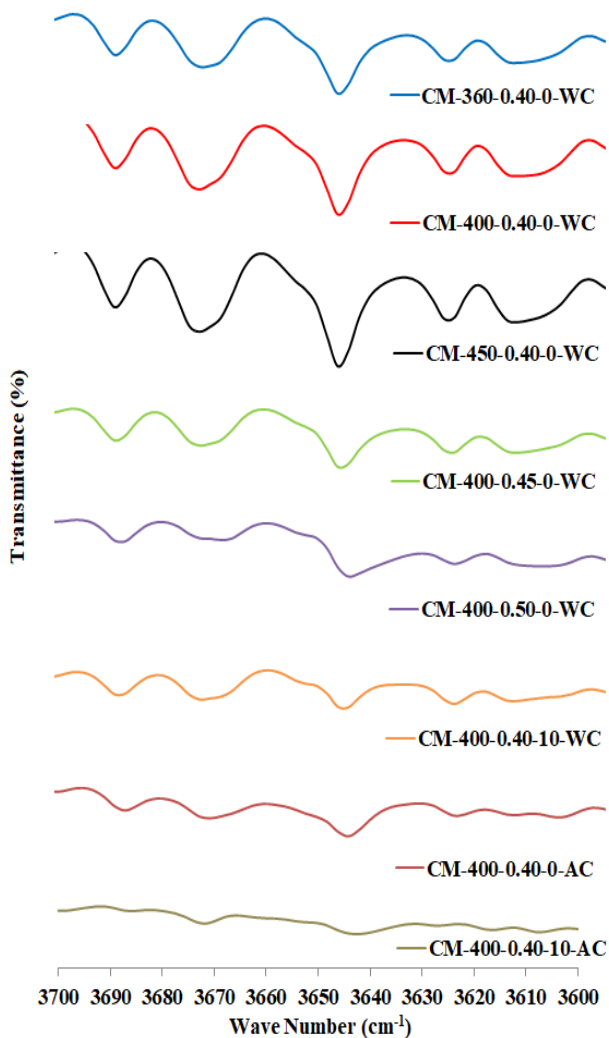


Figure 11. FTIR analyses of determined eight mixtures

#### 4 Conclusions

The following findings from this study were obtained. The workability of CMs increased with the increment of cement dosage, w/b ratio and SF content. The mechanical properties of CMs improved due to acceleration the hydration reactions with increased cement content. However SEM/EDX indicated that Ca/Si ratio did not change significantly. XRD, FTIR and TGA/DTA analysis indicated that the CH content in the matrix changed in compatible with the improvement in strength with increased cement dosages. In addition, TGA/DTA showed that the cement dosage did not have an important influence on C variation.

The strength characteristics of CMs decreased as a result of increased porosity with the increment of w/b ratio. However, SEM/EDX analysis indicated that Ca/Si ratio almost keep steady. According to XRD, TGA/DTA and FTIR analyses, the w/b ratio had no important influence on the CH content of the CMs. Moreover, TGA/DTA showed that the C contents of the CMs increased with increment of w/b ratio.

XRD, TGA/DTA and FTIR demonstrated that the CH content of mixture exposed to WC was higher than that of AC. In addition the degree of carbonation in the WC was higher than that of AC.

The CH contents of CMs incorporating SF were higher than that of CMs without SF. Therefore, SF increased strength characteristics. TGA/DTA analysis demonstrated that SF was slightly increased the carbonation.

#### References

- [1] A. Ergün, G. Kürklü, M. S. Başpınar and M. Y. Mansour, The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 55, 160–167, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.016>.
- [2] R. Şahin, R. Demirboğa, H. Uysal and R. Gül, The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 1245–1249, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00048-6).
- [3] O. Lotfi-Omran, A. Sadrmomtazi and I. M. Nikbin, A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116905, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116905>.
- [4] V. G. Haach, G. Vasconcelos, and P. B. Lourenço, Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25, 2980–2987, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>.
- [5] S. A. Alabi and J. Mahachi, Compressive strength of concrete containing palm oil fuel ash under different curing techniques. *Materials Today: Proceedings*, 43 (2), 1969–1972, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.426>.
- [6] C. M. Yun, R. Rahman, C. Y. W. Phing, A. W. M. Chie and M. K. B. Bakri, The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar. *Construction and Building Materials*, 260, 120622, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120622>.
- [7] S. H. V. Mahalakshmi and V. C. Khed, Experimental study on M-sand in self-compacting concrete with and without silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1061–1066, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120622>.
- [8] A. Mehtaa and D. K. Ashish, Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29, 100888, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100888>.
- [9] X. Y. Wang and H.-S. Lee, Modeling the hydration of concrete incorporating fly ash or slag. *Cement and Concrete Research*, 40, 984–996, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.001>.

- [10] V. G. Papadakis and S. Tsimas, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, 291–299, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00249-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00249-5).
- [11] V. G. Papadakis, C. G. Vayenas and M. N. Fardis, Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, 88, 186–196, 1991. <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx.aspx?m=details&i=1993>.
- [12] V. G. Papadakis, Effect of fly ash on Portland cement systems, Part I: low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 29, 1727–1736, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00153-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00153-2).
- [13] V. G. Papadakis, Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. *Cement and Concrete Research*, 29, 79–86, 1999. <https://doi.org/10.1155/2014/102392>.
- [14] V. G. Papadakis, Effect of fly ash on Portland cement systems, Part II: high calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30, 1647–1654, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00388-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00388-4).
- [15] S. Wang, L. Baxter and F. Fonseca, Biomass fly ash in concrete: SEM, EDX and ESEM analysis. *Fuel*, 87, 372–379, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.024>.
- [16] M. Sharma, P. Behera, S. Saha, T. Mohanty and P. Saha, Effect of silica fume and red mud on mechanical properties of ferrochrome ash based concrete. *Materials Today: Proceedings*, in press. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.372>.
- [17] S. Saha, P. Saha and T. Mohanty, Mechanical properties of fly ash and ferrochrome ash based geopolymer concrete using recycled aggregate. *Recent Development in Sustainable Infrastructures*, 75, 417–426, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_34).
- [18] A. Sikder and P. Saha, Effect of bacteria on performance of concrete/mortar: A review, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7 (6C2), 12-17, 2019.
- [19] L. Jianyong and T. Pei, Effect of slag and Silica fume on mechanical properties of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 27 (6), 833–837, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00076-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00076-8).
- [20] T. C. Holland, Silica fume user's manual. Silica fume Association, Report no FHWA-IF-05-016, 2005.
- [21] M. Gruszczyński and M. Lenart, Durability of mortars modified with the addition of amorphous aluminium silicate and silica fume. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 102526, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102526>.
- [22] A. C. A. Muller, K. L. Scrivener, J. Skibsted, A. M. Gajewicz, and P. J. McDonald, Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research*, 74, 116–125, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.005>.
- [23] J. I. Tobón, J. J. Payá, M. V. Borrachero and O. J. Restrepo, Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength, *Construction and Building Materials*, 36, 736–742, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.043>.
- [24] F. V. Ajileye, Investigations on micro-silica (silica fume) as partial cement replacement in concrete. *Global Journal of Research in Engineering*, 12, 17–24, 2012. <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/575>.
- [25] A. Mathew, Effect of silica fume on strength and durability parameters of concrete. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, IJESSET 3, 28–35, 2012.
- [26] D. King, The effect of Silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74. cementitious materials, in: 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, 29–31, 2012.
- [27] A. Benli, Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, 20, 1096–1108, 2019. <https://doi.org/10.1002/suco.201800302>.
- [28] R. Duval and E. H. Kadri, Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research* 28 (4), 533–547, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00010-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00010-6).
- [29] S. Singh, G. D. Ransinchung and P. Kumar, Effect of mineral admixtures on fresh, mechanical and durability properties of RAP inclusive concrete. *Construction and Building Materials*, 156, 19–27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.144>.
- [30] Z. Shi, B. Lothenbach, M. R. Geiker, J. Kaufmann, A. Leemann, S. Ferreira and J. Skibsted, Experimental studies and thermodynamic modeling of the carbonation of Portland cement, metakaolin and limestone mortars. *Cement and Concrete Research*, 88, 60–72, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.06.006>.
- [31] K. D. Weerdt, M. B. Haha, G. L. Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes and B. Lothenbach, Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41, 279–291, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>.
- [32] K. Luke and E. Lachowski, Internal composition of 20-year-old fly ash and slag blended ordinary Portland cement pastes. *Journal of American Ceramic Society*, 91, 4084–4092, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02783.x>.
- [33] J. I. Escalante-Garcia and J. H. Sharp, The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 26, 967–976, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.036>.
- [34] A. M. Harrison, N. B. Winter and H. F. W. Taylor, An examination some pure and composite Portland cement

- pastel using scanning electron microscopy with X-ray analytical capability. 8<sup>th</sup> ICCC, pp. 170–175, Rio de Janeiro, Brasil, 1986.
- [35] P. L. Rayment, The effect of pulverised-fuel ash on the C/S molar ratio and alkali content of calcium silicate hydrates in cement. *Cement and Concrete Research*, 12, 133–140, 1982. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(82\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(82)90001-1).
- [36] H. F. W. Taylor, K. Mohan and G. K. Moir, Analytical study of pure and extended Portland cement pastes: II, fly ash- and slag-cement pastes. *Journal of American Ceramic Soc.* 68, 685–690, 1985. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb10125.x>.
- [37] P. O. Awoyera, J. O. Akinmusuru, A. R. Dawson, J. M. Ndambuki and N. H. Thom, Microstructural characteristics, porosity and strength development in ceramic-laterized concrete. *Cement and Concrete Composites*, 86, 224–237, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.017>.
- [38] A. H. Akca and N. Özyurt, Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure, *Construction and Building Materials*, 168, 431–441, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.122>.
- [39] H. Du and K. H. Tan, Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 75, 22–29, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>.
- [40] L. Wang, S. H. Zhou, Y. Shi, S. W. Tang and E. Chen, Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete. *Composites Part B: Engineering*, 130, 28–37, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.058>.
- [41] TS 706 EN 12620-A1, Aggregates for concrete. Institute of Turkish Standards, 2009.
- [42] ASTM C305, Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. Annual book of ASTM standards, 2017.
- [43] ASTM C1437, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. Annual book of ASTM standards, 2017.
- [44] ASTM C349, Standard test method for compressive strength of hydraulic–cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). Annual book of ASTM standards, 2017.
- [45] ASTM C348, Standard test method for flexural strength of hydraulic–cement mortars. Annual book of ASTM standards, 2017.
- [46] ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete. Annual book of ASTM standards, 2016.
- [47] J. B. Robertson and M. T. Ley, Determining the water to cement ratio of fresh concrete by evaporation. *Construction and Building Materials*, 242, 117972, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117972>.
- [48] T. C. Powers and T. Willis, The air requirement of frost resistant concrete. In High. Res. Board Proceedings, 1950.
- [49] Z. Wu, C. Shi and K. H. Khayat, Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Cement and Concrete Composites*, 71, 97–109, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.005>.
- [50] S. Mindess, J.F. Young, and D. Darwin, *Concrete*. second ed., Prentice Hall, Pearson Education, USA, 2003 NJ 07458.
- [51] T. K. Erdem and Ö. Kırca, Use of binary and ternary blends in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 1477–1483, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.026>.
- [52] R. Duman, Silis dumaninin betonun performansına ve klor geçirimsizliğine etkilerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [53] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff and W. C. Panarese, Design and control of concrete mixtures. The Portland Cement Association, 2011.
- [54] D. P. Bentz and P. C. Aitcin, The hidden meaning of water–cement ratio. *Concrete International*, 30 (5), 51–54, 2008.
- [55] A. Dowell, and S. Cramer, Field measurement of water–cement ratio for Portland cement concrete – Phase II Field evaluation and development; Final Report. University of Wisconsin – Madison, Department of Civil and Environmental Engineering. Wisconsin Highway Research Program, 2002.
- [56] B. Felekoğlu, S. Türkel and B. Baradan, Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42 (4), 1795–1802, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.012>.
- [57] R. Siddique, P. Aggarwal and Y. Aggarwal, Influence of water/powder ratio on strength properties of self compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 29, 73–81, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035>.
- [58] N. S. Apebo and A.J. Shiwua, Effect of water-cement ratio on the compressive strength of gravel – crushed over burnt bricks concrete. *Civil and Environmental Research*, 3 (4), 74–81, 2013.
- [59] I. M. Nikbin, M. H. A. Beygi, M. T. Kazemi, J.V. Amiri, S. Rabbanifar, E. Rahmani and S. Rahimi, A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratio and powder content on mechanical properties of self compacting. *Construction and Building Materials*, 57, 69–80, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.098>.
- [60] L. R. Kumar, M. Karthikeyan and R. Raghu, Influence of water-cement ratio on compressive strength of burnt bricks. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 14 (2), 91–94, 2017.
- [61] F. Özcan, Silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri ve hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.

- [62] D. Pedro, J. de Brito and L. Evangelista, Evaluation of high-performance concrete with recycled aggregates: use of densified silica fume as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 147, 803–814, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.007>.
- [63] ACI Committee 234, 234R-06, Guide for the use of silica fume in concrete, (2006) Michigan, USA <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/16670>.
- [64] H. K. Kim and H.K. Lee, Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing. *Cement and Concrete Composites* 91, 67–75, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.017>.
- [65] J. Dweck, P. M. Buchler, A. C. V. Coelho and F. K. Cartledge, Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, 346 (1–2), 105–113, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00369-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00369-X).
- [66] I. Pane and W. Hansen, Investigation of blended cement hydration by isothermal Calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1155–1164, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.027>.
- [67] D. N. Crook and M. J. Murray, Regain of strength and firing of concrete, *Magazine and Concrete Research*, 22 (6), 149–154, 1970.
- [68] M. Henry, K. Hashimoto, I. S. Darma and T. Sugiyama, Cracking and chemical composition of cement paste subjected to heating and water re-curing. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14, 134–143, 2016.
- [69] A. H. Akca and N. Özyurt, Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 159, 540–552, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.005>.
- [70] E. Menendez and L. Vega, Analysis of the behaviour of the structural concrete after the fire at the Windsor Building in Madrid. *Fire Materials*, 34, 95–107, 2010. <https://doi.org/10.1002/fam.1013>.
- [71] F. Branda, G. Luciani, A. Costantini and C. Piccioli, Interpretation of the thermogravimetric curves of ancient pozzolanic concretes. *Archaeometry*, 43, 447–453, 2001. <https://doi.org/10.1111/1475-4754.00027>.
- [72] G. Villain, M. Thiery and G. Platret, Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gamma densimetry. *Cement and Concrete Research*, 37, 1182–1192, 2007.
- [73] H. E. Yücel and S. Özcan, Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique. *Construction and Building Materials*, 223, 165–176, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.195>.
- [74] V. Bulatovic', M. Melešev, M. Radeka, V. Radonjanin and I. Lukic', Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, 152, 614–631, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.161>.





## Investigation of boron waste usage in civil engineering applications

### İnşaat mühendisliği uygulamalarında bor atıklarının kullanımının araştırılması

Aseña Karşlıoğlu<sup>1,\*</sup> , Mehmet İnanç Onur<sup>2</sup> , Eren Balaban<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Eskişehir Teknik University, Civil Engineering Department, 26555, Eskişehir, Turkey

#### Abstract

Nowadays, limited natural resources and huge consumption leads to increase in production costs and energy usage. Increasing energy consumption causes environmental damages, which yield climate change. This situation increases the interest in sustainability along with the recycling of waste material in different areas. While sustainability awareness of society is tried to be created in different countries, research and development studies are also carried out on the other hand. Studies regarding sustainability in civil engineering include recycling and reuse of various wastes. Turkey has 73% of the boron reserves, and provides 50% of boron need in the world. The boron mine can be used in a wide variety of applications such as aerospace and aircraft industries and even in disinfectant production due to the Covid-19 pandemic. On the other hand, boron waste is expected to increase with the increase in production potential. The objective of this study is to introduce the potential of using boron wastes in civil engineering. Applications of boron waste in civil engineering have been researched in the literature and evaluated in detail. As a result of the study, possible boron waste assessment suggestions have been presented for Turkey.

**Keywords:** Boron waste, Civil engineering, Re-usage, Sustainability.

#### 1 Introduction

Natural resources and raw materials have been used to produce whatever is needed by humanity especially after industrial revolution. Natural resource reserves decreased during this process. Population increases resulted mass production which increased demand for energy and workforce. Wastes are generated from process of production which cause environmental and storage problems. These wastes can reduce air quality, pollute water and soil, and damage food supply chains. Importance of recycling is increasing to limit effects of production to nature. Recycling may reduce environmental problems and contribute to the country's economy [1, 2].

Boron is one of the most important underground resources of Turkey, which has approximately 70% of the world's boron reserves. Some processes are required to obtain boron since boron is not found in pure form in nature. First of all, boron ore is removed from the soil and then goes through several stages such as crushing, sieving, washing

#### Öz

Günümüzde sınırlı doğal kaynaklar ve fazla tüketim, üretim maliyetlerinin ve enerji kullanımının artmasına neden olmaktadır. Artan enerji tüketimi, iklim değişikliğine neden olan çevresel zararlara neden olmaktadır. Bu durum, farklı alanlarda atık malzemelerin geri dönüşümü ile birlikte sürdürülebilirliğe olan ilgiyi artırmaktadır. Farklı ülkelerde toplumun sürdürülebilirlik bilinci oluşturulmaya çalışılırken bir yandan da araştırma geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. İnşaat mühendisliğinde sürdürülebilirlik ile ilgili çalışmalar, çeşitli atıkların geri dönüştürülmesini ve yeniden kullanılmasını içermektedir. Türkiye bor rezervinin %73'üne sahiptir ve dünyanın bor ihtiyacının %50'sini sağlamaktadır. Bor madeni, havacılık ve uçak endüstrileri gibi çok çeşitli uygulamalarda ve hatta Covid-19 pandemisi nedeniyle dezenfektan üretiminde kullanılabilir. Öte yandan, üretim potansiyelindeki artışla birlikte bor atıklarının da artması beklenmektedir. Bu çalışmanın amacı, bor atıklarının inşaat mühendisliğinde kullanım potansiyelini ortaya koymaktır. Bor atıklarının inşaat mühendisliğindeki uygulamaları literatürde araştırılmış ve detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda Türkiye için olası bor atığı değerlendirme önerileri sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Bor atığı, İnşaat mühendisliği, Yeniden kullanım, Sürdürülebilirlik.

and grinding, respectively. All these stages in the recover and condensation process of boron generate industrial wastes which have a negative impact on the environment and cannot be recycled by nature. Potential use of boron wastes in civil engineering projects may reduce environmental effects of boron production. In this study, the applications of boron wastes in civil engineering were investigated in the literature and evaluated in detail.

#### 2 Boron minerals and utilization in Turkey

Boron, which is not found as a free element in natural conditions, exists as boron oxide compound. Boron minerals are classified according to their calcium, sodium and magnesium elements composition. The economic value of minerals is determined by the ratio of boron oxide (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) in compound [3].

There are more than 230 boron minerals in nature and the most commercially important boron minerals are tincal, colemanite, kernite, ulexite, pandermite, boracite, szaybelite

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: asenakarslioglu@eskisehir.edu.tr

Geliş / Received: 08.03.2022 Kabul / Accepted: 18.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1084831



and hydroboracite (Table 1). The most abundant boron minerals in Turkey from the point of reserves are tincal and colemanite. Tincal deposits in Turkey are located in Kırka-Eskişehir, colemanite deposits are located in Emet- Kütahya, Bigadiç- Balıkesir and Kestelek- Bursa. Furthermore, ulexite reserves are available in Bigadiç- Balıkesir, and ulexite is obtained from time to time as a by-product in Kestelek-Bursa. The main boron minerals are converted into high value-added products at international quality standards by Eti Maden are colemanite (76%), tincal (22%) and ulexite (2%) (Table 1). The products derived from those ores are concentrated tincal, borax pentahydrate, borax decahydrate, anhydrous borax, boric acid, sodium perborate, etidot-67, boron oxide, zinc borate, calcined tincal, ground colemanite and ground ulexite. Most of the production is exported. Eti Maden Operations General Directorate in Turkey provides the world's 47% boron demand. Boron minerals made valuable by Eti Maden using various mining methods; it is enriched by subjecting it to physical processes and turns into concentrated boron products. Boron products in Turkey are mostly used in glass and ceramic fields at a rate of 36% and 31%, respectively [4].

The production of concentrate boron in Turkey is carried out in the Emet-Kütahya, Bigadiç-Balıkesir, Kırka-Eskişehir, and Kestelek-Bursa enterprises owned by Eti Holding Eti Bor A.Ş. Concentrated boron production in these facilities is based on the removal of clayey material as a result of dispersion and classification at the end of the washing process. Etibank Kırka Borax Factories produce approximately 3 million tons of tincal per year [4]. Borax pentahydrate, borax decahydrate, concentrated tincal, anhydrous borax and calcined tincal are obtained from tincal. During production, 120,000 tons of clay waste is generated annually in the concentrated tincal unit and borax pentahydrate unit. This waste containing approximately 8-22% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is emptied into the facility area. These wastes contain a very high concentration of B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, therefore it is an environmental pollution problem as far as an economic loss [5].

### 3 Review of literature

Developing world countries consume large amounts of energy and resources, and produce waste. Environmental

pollution resulting from waste leads to the deterioration of the ecological balance. For this reason, studies have focused on the usability of recyclable wastes instead of raw materials. The evaluation of waste materials and by-products prevents the destruction of nature by reducing the use of limited natural resources, and also minimizes the problems that will occur in the environment as a result of the storage of materials. However, not all wastes can be used as raw materials or additives, so detailed research is required. In addition, studies on the evaluation of wastes, which are seen as a secondary raw material source that can be an alternative to existing raw material sources, have come to the fore.

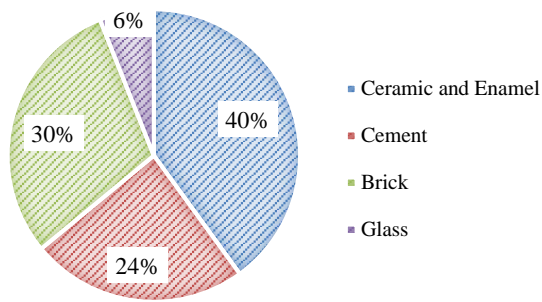
The minerals found in Turkey given in Table 1 are the most important boron minerals used in the production of boric acid and various borates. In these production processes, wastes containing boron are formed, polluting the environment and making storage a big problem. In recent years, the use of waste generated as a result of increased boron production in the construction industry has been investigated.

#### 3.1 The use of boron waste in cement and building materials

Boron has been used in production of cement for a time. Researchers have determined that using B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in cement production resulted significant improvements in cement's properties. When the studies done so far are examined, it has been seen that boron residues with the same B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> percentage were added to the cement in different weight ratios. Strength and durability tests were carried out on the cements containing B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Such studies have been carried out throughout the world. It has been determined that minerals such as colemanite and boron wastes may be suitable for cement production. Boron wastes are generally used as glaze and tile paste in the ceramic industry; in floor and wall tiles; in the production of cement and brick; as a lightweight concrete and lightweight construction element; and as a raw material or additive in the field of glass and enamel. 24% of boron waste is used in the cement sector and 30% in the brick sector as can be seen in Figure 1. The literature studies on the usability of boron waste in cement and building materials are examined in this section.

**Table 1.** Boron minerals' B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios (%) [4]

Structure	Mineral Name	Formula	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % ratio	Location
Sodium Borate	Tincal	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	36.6	Kırka, Emet, Bigadiç, USA
	Kernite	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O	51.0	Kırka, USA, Argentina
Calcium Borate	Colemanite	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O	50.8	Emet, Bigadiç, USA
	Pandermite	Ca <sub>4</sub> B <sub>10</sub> O <sub>19</sub> .7H <sub>2</sub> O	49.8	Sultançayır, Bigadiç
Sodium-Calcium Borate	Ulexite	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O	43.0	Bigadiç, Kırka, Emet, Argentina
	Probertite	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O	49.6	Kestelek, Emet, USA
Magnesium-Calcium Borate	Hydroboracite	CaMgB <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .6H <sub>2</sub> O	50.5	Emet



**Figure 1.** Distribution of boron wastes by sector [6]

The use of boron and boron waste in the production of cement and building materials has been considered by many researchers and experimental studies have been carried out. Industrial-scale cement production was carried out in Denizli and Gölaş cement factories with the joint efforts of BOREN National Boron Research Institute and Turkish Cement Manufacturers' Association [7].

Özdemir and Öztürk (2003) [5] examined the use of boron-containing clay wastes in cement production. The mechanical and chemical properties of cement prepared by adding boron waste to clinker and gypsum was investigated. When the acquired results were compared with the Portland cement properties and Turkish standards, it was specified that boron waste could be used as a cement additive up to 10%.

Kavas and Emrulloğlu (2005) [8] produced high quality bricks with high strength and low water absorption by mixing Seydişehir red mud and Kırka boron waste clays at different rates. Kavas (2006) [9] investigated the use of boron waste up to 15% in brick production. As a result of mineralogical and mechanical experiments, it has been found that the use of boron waste is possible. It has been shown that the use of 15% boron waste results in a significant reduce in brick firing temperature and increase in mechanical performance.

Demir and Keleş (2006) [10] investigated the radiation transmission of concrete samples containing borogypsum and colemanite concentrator waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays. Borogypsum is one of the wastes produced in boric acid production. It has been shown that boron waste is effective in producing gamma ray shielding material and preventing radiation transmission.

Batar and Köksal (2009) [11] used waste calcined tincal to develop a new environmentally friendly plaster material. When the plaster consisting of 3% perlite, 1.5% waste paper and 7.1% waste calcined tincal is compared with the plaster available in the market, its heat permeability resistance increased by 26% and its strength value increased by 31%.

Davraz (2010) [12] examined the mechanism of action of boron mineral on cement hydration in his study. It has been stated that the boron compound slows down the hydration and prolongs the setting time depending on the boron oxide concentration it contains.

Kavas et al. (2011) [13] investigated four different types of waste containing boron for the production of artificial

lightweight aggregates. Two different types of waste (SBW (sieve boron-containing waste) and DBW (dewatering boron-containing waste)) have properties close to pumice. The best results were obtained with a mixture of 20% clay, 35% SBW, 35% DBW and 10% quartz sand. Flash heating of the dry pellets at 760 °C for 5 minutes resulted in porous LWA with a bulk density of 0.97 g/cm<sup>3</sup>.

Akyıldız (2012) [14] researched the availability of boron wastes as a pozzolanic material in concrete production. Strength and durability tests were carried out on concrete containing 3-12% boron waste. It was determined that the 56-day compressive strength of the 3% additive increased by 88% to 25.73 MPa according to 7-day compressive strength. In addition, according to the cost analysis, it has been revealed as a result of the calculations that boron wastes will save at least 10 times more when used instead of Portland cement.

Eyyüboğlu (2013) [15] produced 13 different cements by adding boron wastes with different B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios up to 10% by weight to clinker and gypsum. Different B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios did not reveal significant differences in the experimental results. The compressive strengths of cements with boron waste added and samples produced with CEM I cement in the high temperature test (at 900 °C) are approximately 17 MPa and 6.5 MPa, respectively. The reason for the decrease in strength of concrete at high temperatures was considered to be the deterioration of adherence, the deterioration of the structure of calcium silica hydrate gels in the cement paste and the thermal expansion differences in the aggregate.

Murathan et al. (2013) [16] aimed to produce a building material by using some environmental wastes together with boron waste. Due to the high content of calcium oxide in the boron waste, the water absorption values were high. As a result, it was determined that the produced composite material should not be used in construction materials in contact with water.

Kılıçarslan et al. (2013) [17] researched the effect of adding boron waste in the range of 5-20% on brick production by physical, mechanical and durability experiments. It has been concluded that the use of 20% boron waste improves the properties of red brick and it can be used in this industry.

Binici et al. (2014) [18] examined the mechanical and radiation impermeability properties of mortars produced by using colemanite waste. They stated that all samples with 0.75% colemanite additives had higher compressive strengths than that of the reference group. It was determined that the use of higher colemanite disrupted the concrete setting. According to their findings, barite, colemanite and blast furnace slag wastes have been appeared to be effective in preventing radiation transmission and promising materials for gamma ray shielding in mortars.

Mutuk and Mesci (2014) [1] investigated the use of up to 5% boron waste and up to 15% rice husk ash separately and together. The compressive strength of the samples containing 10% rice husk ash increased to 56.48 MPa, while that of the samples containing 5% boron waste increased to 46.10 MPa. Despite this, both results meet the Turkish

Standard (42.5-62.5 MPa). According to the results, boron waste could be used up to 5% in cement.

Kunt et al. (2015) [19] investigated the properties of cement mortar by adding up to 7% calcined/uncalcined borogypsum to the clinker. The usage of 3% calcined/uncalcined borogypsum was determined as the optimum value, and the compressive strengths are 48.00 MPa and 45.70 MPa, respectively. According to another research, the evaluation of this waste material with high boron content was determined that borogypsum could be used as an alternative material in cement bodies instead of other gypsum [20].

Koumpouri and Angelopoulos (2016) [21] investigated the effects of boron waste and boron oxide addition on low-energy belite cements by preparing three types of clinker. The usage of 6.5% boron waste by weight boron waste has been reduced the clinker temperature. As a result, it shows that the use of boron oxide, pure or produced from boron wastes, in certain amounts could be beneficial in the production of belite cement.

Erdoğan (2016) [22] aimed to produce two different insulation materials from carpet and boron wastes that are low in cost, have high heat and sound insulation values, and comply with the standards with their physical and mechanical properties. Comparisons were made with other insulation materials used in the industry. It has been determined that the produced HALIBOR-1 has a density of 185 kg/m<sup>3</sup>, a thermal conductivity of 0.035 IW/(mK), and the obtained product is resistant to burning (B1-Difficult burning) due to the mineralogical advantages of boron.

Öztürk and Sevim (2016) [23] added up to 20% colemanite concentrator waste (borogypsum) to cement clinker in order to decrease the energy costs of cement production and improve the mechanical properties of cement. It was determined that the mechanical properties of the samples containing 5% borogypsum were similar to the reference sample.

Över Kaman et al. (2017) [24] researched the effects of up to 25% boron waste heat-treated at 600°C on cement mortar. 90-day compressive strength was found to be 52 MPa in the use of 5% boron waste while the reference mortar was 51 MPa. As the boron waste increased, the compressive strength decreased. However, according to the test results, up to 25% boron waste could be used in the production of cement mortar.

Çiçek et al. (2018) [25] investigated the properties of ceramic wall and floor tiles containing 1–6% boron waste (1–33% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). As a result of the study, a product that encourages production at lower temperatures, environmentally friendly and zero waste economy was obtained. The floor tile containing approximately 5.65% boron waste showed 65 °C lower sintering temperature, while the sintering temperature of the wall tile has been reduced by 70 °C.

Yıldırım and Derun (2018) [26] examined the mechanical and thermal properties of mortars using two different boron wastes up to 3% and CuO (copper oxide) nanoparticles up to 4%. The addition of borogypsum to the mortar composition improved its mechanical properties and

resistance to water absorption compared with borax waste. It has been stated that 0.5–1% and 2% nano-CuO could be used optimally for mortars containing borax waste and borogypsum, respectively.

Mancı and Sarıışık (2019) [27] carried out a study to determine the effect of 1% tincal waste on early strength in lightweight concrete with pumice aggregate. In accordance with the obtained results, it was designated that the early strength increased in concretes with tincal waste added with the use of 176 kg/m<sup>3</sup> cement amount.

Çelik et al. (2019) [28] determined the physical, mechanical and chemical properties of pumice bricks produced using up to 8% colemanite and tincal, and up to 20% boron waste. The best results were obtained from bricks using 6-8% boron waste, according to the thermal conductivity coefficient (0.1504-0.1739W/mK), water absorption (32%), porosity (37.1%) and strength values (3.63-3.33 Mpa).

Evcin et al. (2019) [29] investigated the use of boron wastes up to 90% and marble wastes up to 20% in brick production. The flexural strength of the bricks using 85% boron waste and 5% marble waste, sintered for 4 hours at 1050 °C, was determined approximately 25 MPa.

Tokgöz et al. (2019) [30] researched the effects of the use of colemanite powder, a boron waste, in the range of 1-5%, on the acid resistance of mortars. In the case of using 1%, it was determined that a reduction of up to 36.73% in weight losses was achieved, and an increase of 15.50% and 18.10% occurred in compressive and flexural strengths, respectively. When the mechanical properties and acid effect of the mortars were examined, it was seen that the optimum use was 1%.

Çelen et al. (2019) [31] examined the physical properties and usability of barite as a radiation shielding material with the addition of up to 50% boron waste. According to the experimental results, as the amount of borogypsum increased the porosity percentage and water absorption percentage decreased. Additionally, the attenuation coefficients decreased and showed less efficient gamma ray shielding.

Sevim et al. (2019) [32] researched the usability of borogypsum up to 15% as a mineral additive in mortars by physical and mechanical experiments. It has been determined that as the amount of waste used increases, the workability is adversely affected, the use of 3% reduces capillarity and shrinkage, the use of 5% reduces the depth of carbonation and increases the compressive and flexural strength.

Aldakshe et al. (2020) [33] studied the use of boron wastes as aggregate in lightweight concrete production. Boron waste was used as aggregate at 1-9% ratios of pumice. It was found that the properties of the material improved with the enhance in the use of waste, the capillary water absorption amount decreased, and the compressive strength of 19.3 MPa was obtained with 9% boron waste substitution.

Öztürk et al. (2020) [34] researched the mechanical properties, electromagnetic and shielding performances of concrete samples containing boron wastes. While the mechanical properties of concretes containing boron mineral/waste were adversely affected, shielding

performance was 3.16 to 100 times better than the reference sample.

Christogerou et al. (2021) [35] aimed to determine the mechanical and frost resistance properties of 8% boron waste in clay roof tiles. Boron-containing samples fired at 1000 °C were able to successfully withstand extreme freezing conditions (>400 freeze/thaw cycles). These samples fired at 1030 °C had a higher flexural strength of approximately 9.3%.

### 3.2 The use of boron waste in asphalt and road construction

In recent years, due to the expansion of the usage areas of boron minerals, significant boron waste piles are formed. In addition, the warehouses built for the generated wastes occupy an important place. Significant amounts of aggregate are also needed in road construction. The literature on the availability of boron waste in asphalt and road construction are examined in this section.

Kütük-Sert and Kütük (2013) [36] investigated the utilizability of boron wastes as filler material in asphalt concrete mixtures. Two groups produced hot mix asphalt for the experiments. They used limestone aggregate as filler material in asphalt concrete in the first group, and boron waste as mineral filler material in the second group. It has been concluded that the use of boron wastes as an alternative filler in asphalt pavements may be suitable for the binding layer of pavements exposed to hot climate regions and/or heavy traffic potential.

Terzi et al. (2013) [37] researched the effect of using colemanite waste as filler on the physical and mechanical properties of asphalt mixtures. Asphalt concrete with colemanite filler was prepared by using five different filler ratios according to the optimum bitumen value determined. As a result, it has been stated that colemanite waste is included in the specification where it gives values close to limestone and could be used as an alternative filler material instead of limestone in areas close to the areas where colemanite is extracted.

Gürer and Selman (2016) [38] carried out a Marshall design using boron waste fillers in the range of 4-8% by weight, and the conclusions were compared with the results of the limestone-based sample. The best values were obtained as a result of the use of boron waste filler at the rate of 5.7%. It has been determined that boron waste could be used as a filler in medium and low traffic asphalt concrete pavements in wear layers.

Oruç et al. (2016) [39] examined the rheological properties of 4 different boron minerals and boron modified bitumen and it was stated that the minerals formed electrostatic chemical bonds with the bitumen. Bitumen modification with boron; penetration values decreased, softening point and flash point values increased. As a result, an improvement was observed in the stiffness values.

Keskin and Karacasu (2019) [40] examined the use of boron wastes in asphalt concrete production and its sustainability performance. Marshall Design and creep tests were carried out on the samples produced by adding up to 15% of Crushed Boron Waste, and up to 10% of Borax

pentahydrate and Anhydrous Borax. Borax pentahydrate and Anhydrous Borax added samples had the lowest stability values, but the highest deformations were observed in these samples. As a result, the samples with the longest service life and more resistant to rutting are the samples with crushed boron waste.

Kara (2021) [41] aimed to expand the use of boron wastes in road construction. In his study, stone mastic asphalt and concrete pavement were produced with [0,1–1.0] mm, [0–4] mm, [4–8] mm and [8–16] mm boron wastes, relevant tests were carried out and the current standard compared with samples. It has been found that boron waste is not suitable for use as aggregate in stone mastic asphalt. For concrete pavements, in order to obtain high strength, steel fibre should be used in the mixture and the concrete should be subjected to combined curing (3 Days Water + 2 Days 200 °C Oven Cure).

### 3.3 The use of boron waste in soil stabilization

Civil engineers are studying to find safe and economical solutions in design and construction steps. The soil conditions of the project site have a great effect on the design and construction methods in civil engineering applications. Problematic soil conditions can cause important problems therefore; soil conditions should be improved. The two main methods of soil stabilization are mechanical and chemical stabilization used depending on the construction process. The main objectives are reducing the compressibility, and maximizing its strength [42]. Waste materials used in soil stabilization are beneficial because they are much more economical than that of other materials and contribute to waste management. The literature on the usability of boron waste in soil stabilization are examined in this section.

Çoruh et al. (2013) [43] examined the availability of borogypsum waste as a stabilization material in the subbase layer of the road pavement. In addition, a cost calculation has also been made. It was determined that the most optimum use was the mixture containing 50% borogypsum. It was found that the layer thickness decreased from 35 cm to 30 cm as a result of sub-base construction with the optimum mixture, and the road construction cost was reduced by 12% for the whole road and 50% for subbase due to the 43% reduction in the amount of aggregate used.

Zhang et al. (2016) [44] aimed to reuse boron waste as an additive in road base material. The performances of lime and lime-cement stabilized boron waste mixtures were investigated by various experimental methods. Lime-cement and stabilized boron waste mixture had the highest compressive and tensile strengths. Due to the low frost resistance of the boron waste mixture stabilized with lime, it is recommended to be used in frost-free regions.

Zorluer and Gücek (2017) [45] tried to provide soil stabilization with 3 different mixtures using fly ash and slime waste boron. The mixture containing 10% boron waste and 20% fly ash was determined as an optimum mixing ratio.

Okur and Akıncı (2018) [46] investigated the dynamic behaviour of the use of 2-8% powdered boron wastes in soft soils. It was observed that the dynamic properties of kaolinite and montmorillonite clays treated with boron

waste, which were subjected to resonance column and dynamic torsional shear tests, were improved. Montmorillonite clay behaved almost three times more rigid from the point of initial shear modulus. It has been observed that the effect of boron waste on kaolinite was less compared to montmorillonite.

Zorluer and Gücek (2020) [47] conducted an experimental study by mixing boron wastes with different industrial wastes such as marble dust at different rates. While the highest strength was observed in the 5GD–10FA sample in granite dust (GD) – fly ash (FA) mixtures, the highest strength was observed in the 10BR–20FA sample in the boron waste dust (BR) – fly ash (FA) mixtures. CBR values slightly increased in BR-FA mixtures. At the end of the freeze-thaw cycles, minimal weight loss was determined in the marble dust (MD)-FA mixture and the BR-FA mixtures. Additionally, they stated that boron waste can be used for soil stabilization but is not very influential.

#### 4 Conclusion and recommendation

In order to expand the usage of boron products, several researches have been carried out. Further research is planned to increase the use of boron products in space and aircraft, nuclear electronic and communication, automotive, energy, metallurgy and construction industries. Some of that research is about using boron in development of military vehicles, as additive to fuels, production of polymeric materials and nanotechnologies. The more boron is used during production; the more boron waste will be produced.

In recent years, the use of boron added products has become widespread in the civil engineering sector with innovative approaches. Use of boron in building materials; it increases strength, provides resistance to high temperatures, ensures that boron wastes are brought into production, prevents the formation of bacteria and fungi, reduces harmful gas emissions to the environment during the production phase, and provides energy savings. Due to these properties, boron is used in the building materials industry in civil engineering; cement, brick, plaster, wood, insulation material, glass, ceramic etc. used in the fields. It has been stated that which types of boron wastes are used in the field of civil engineering according to the years in Table 2.

The construction sector is one of the most favourable sectors that can be used to decrease the environmental impressions of large amounts of boron wastes and to bring them into the economy. It is one of the sectors with the highest need for raw materials. The results of the studies in the literature encourage the use of boron minerals in the construction industry. It is seen that a significant part of the studies on boron waste is related to its use in cement or building materials. In the literature, there are limited studies on the use of boron waste in asphalt modifications and soil stabilization.

When the studies are evaluated, the utilize of boron/boron waste as an additive in cement production can provide properties such as superior fire resistance and radiation impermeability to cementitious composites. However, since the cost arising from transportation will also be reflected in cement production, it would be more

beneficial to evaluate each waste in the region where it is located. The absence of any harmful component in boron's structure that may adversely affect the cement properties provides a great advantage for use of boron wastes in cement production. Using boron wastes in new production areas will decrease environmental damage and will provide additional income to the country's economy.

Utilization of boron/boron waste in the civil engineering applications;

- It prevents the deformation of the material.
- It protects the material against the colour problem that occurs over time.
- It increases resistance to water and fire, radioactivity shielding performances.
- It provides features such as heat and sound insulation.
- Artificial lightweight aggregate can be produced by applying heat treatment to boron waste.
- When colemanite is added to the clinker at a rate of 8% in cement production, it reduces the firing temperature and this improves both the properties of the cement and saves energy.
- The addition of boron oxide compound to cement clinker prolongs the setting time.
- Boron added cements reduce the cooling requirement of mass concretes.
- It can be used as roofing, building coverings and cellulosic insulation.
- It can be used as aggregate in lightweight concrete production.
- It contains clay, which is the primary commodity of brick production, and the boron compounds in it provide fluidity.
- It can be used in asphalt concrete. Asphalt pavements prepared with 10% boron waste can recycle 86 tons of waste material for 1 km of road.
- It can be used for soil stabilization and road base materials.

Elements such as Lithium (Li) found in Kırka and Emet boron wastes can be reused. The most appropriate way to evaluate boron wastes is to evaluate the remaining clay contents after the recovery of valuable elements in the wastes in appropriate sectors. Furthermore, it is recommended that detailed chemical analysis should be made for the use of waste boron mixtures in soil stabilization and the effects of these wastes on soil and groundwater should be investigated. It is hoped that this study will shed light on the researches to be carried out by evaluating the boron minerals and wastes in civil engineering applications.

#### Acknowledgements

The author Asena KARSLIOĞLU would like to thank those concerned for their support with Tübitak Bideb 2211-A General Domestic Doctoral Scholarship and YÖK 100/2000 Doctoral Scholarship.

#### Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

**Similarity rate (Turnitin):** %20

**Table 2.** Usage of boron waste in civil engineering applications by years

Applications	Boron Waste Type	Years	Reference	
Production of cement	Boric acid wastes including reactor waste Borogypsum and sludges as well as colemanite concentrator waste Tincal concentrator waste Borax pentahydrate waste	2003	[5]	
Bricks	Concentrator waste	2005	[8]	
Bricks	Clay and fine waste from concentrator waste	2006	[9]	
Production of gamma ray shielding material	Borogypsum Colemanite concentrator waste		[10]	
Plaster material	Calcined borax waste	2009	[11]	
Artificial lightweight aggregates	Sieve boron-containing waste Dewatering boron-containing waste	2011	[13]	
Pozzolanic material in concrete	Boron waste found in Kırka	2012	[14]	
Production of cement	Colemanite concentrator waste	2013	[15]	
Building materials	Boron waste found in Emet		[16]	
Bricks	Boron pond waste found in Kırka		[17]	
Filler material in asphalt concrete	Borogypsum		[36]	
Asphalt mixtures	Colemanite waste		[37]	
Subbase layer of the road pavement	Borogypsum		[43]	
Production of cement	Boron waste found in Kırka		2014	[1]
Radiation impermeability properties of mortars	Colemanite waste			[18]
Cement mortars	Calcined borogypsum Uncalcined borogypsum		2015	[19]
Production of belite cement	Boron waste found in Kırka		2016	[21]
Insulation materials	Colemanite waste	[22]		
Production of cement	Colemanite concentrator waste	[23]		
Asphalt concrete pavements	Boron waste found in Kırka	[38]		
Road base material	Borax waste	[44]		
Cement mortars	Boron derivative waste	2017		[24]
Soil stabilization	Slime waste			[45]
Ceramic wall and floor tiles	Boron-rich mining wastes	2018		[25]
Cement mortars	Borogypsum Borax waste			[26]
Dynamic properties of kaolinite and montmorillonite clays	Pulverized boron waste found in Kırka			[46]
Early strength of lightweight concrete	Tincal waste	2019	[27]	
Pumice bricks	Boron waste found in Kırka		[28]	
Bricks	Boron waste found in Emet		[29]	
Cement mortars	Colemanite waste powder		[30]	
Radiation shielding material	Borogypsum		[31]	
Cement mortars	Borogypsum		[32]	
Asphalt concrete production	Crushed boron waste found in Kırka		[40]	
Lightweight concrete	Boron waste found in Kırka		2020	[33]
Shielding performance of concrete	Borogypsum Colemanite waste			[34]
Soil stabilization	Slime waste			[47]
Clay roof tiles	Boron waste found in Kırka	2021	[35]	
Stone mastic asphalt and concrete pavement	Boron waste found in Bigadiç		[41]	

## References

- [1] T. Mutuk and B. Mesci, Analysis of mechanical properties of cement containing boron waste and rice husk ash using full factorial design. *Journal of cleaner production*, 69, 128-132, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.051>
- [2] A. Karşoğlu, E. Balaban and M.İ. Onur, Insulation properties of bricks with waste rubber and plastic: A Review. *Journal of Nature*, 1, 20-27, 2021. <https://doi.org/10.36937/janset.2021.001.004>
- [3] R. Bütüner, Emet bölgesi düşük tenörlü kolemanit stoklarının değerlendirilebilirliğinin araştırılması. Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2011.
- [4] Etimaden, <https://www.etimaden.gov.tr>, Accessed 3 March 2022.
- [5] M. Özdemir and N.U. Öztürk, Utilization of clay wastes containing boron as cement additives. *Cement and Concrete Research*, 33(10), 1659-1661, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00138-8)
- [6] S. Durak, Eti maden müdürlüğü kırka bor işletmesi bor endüstri atıklarında eser elementlerin tayini ve lityumun kazanılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kütahya, 2011.
- [7] Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, TÇMB, <https://www.turkcimento.org.tr/>, Accessed 3 March 2022.
- [8] Kavas ve Emrulloğlu, seydişehir kırmızı çamur ve kırka bor atıklarının endüstriyel hammadde olarak kullanımı. I. Batı Hammadde Kaynakları Sempozyumu, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, 216-225, İzmir, 2005.
- [9] T. Kavas, Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. *Building and Environment*, 41(12), 1779-1783, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.019>
- [10] D. Demir and G. Keleş, Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 245(2), 501-504, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.11.139>
- [11] T. Batar and N. S. Köksal, Atık bor, atık kâğıt ve perlit katkılı sıva malzemesinin üretimi ve karakterizasyonu. *Ekoloji Dergisi*, 18(72), 2009.
- [12] M. Davraz, The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 17(1), 1-18, 2010. <https://doi.org/10.1515/SECM.2010.17.1.1>
- [13] T. Kavas, A. Christogerou, Y. Pontikes, and G. N. Angelopoulos, Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 1381-1389, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.059>
- [14] A. Akyıldız, Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [15] S. Eyyüboğlu. Kolemanit konsantratör atıklarının çimento üretiminde değerlendirilmesi. Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [16] A. Murathan, A.S.A.N. Abdurrahman and T.A. Abdulkarem, Çevresel atıkların yapı malzemesinde değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 2013.
- [17] A. Kilicarslan, Y. Kurttepelı and M. N. Saridede, Using of Boron Wastes in Red Brick Production. In *Advanced Materials Research*, 699, 223-227, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.699.223>
- [18] H. Binici, O. Aksogan, A.H. Sevinc, and A. Kucukonder, Mechanical and radioactivity shielding performances of mortars made with colemanite, barite, ground basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 50, 177-183, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.033>
- [19] K. Kunt, F. Dur, B. Ertınmaz, M. Yıldırım, E. M. Derun and S. Pişkin, Utilization of boron waste as an additive for cement production. *CBU J Sci*, 11(3), 383-389, 2015. <https://doi.org/10.18466/cbujos.72356>
- [20] F. Oruç, E. Sabah and Z. E. Erkan, Türkiye’de Bor Atıklarının Sektörel Bazda Değerlendirme Stratejileri. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, 23-25, 2004.
- [21] D. Koumpouri and G. N. Angelopoulos, Effect of boron waste and boric acid addition on the production of low energy belite cement. *Cement and Concrete Composites*, 68, 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.009>
- [22] Y. Erdoğan, Halı ve Bor atıklarından izolasyon malzemesi üretimi, *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 2016. <http://dx.doi.org/10.19076/mta.57122>
- [23] M. Ozturk and U. K. Sevim, Utilization of boron waste borogypsum with silica fume as a supplementary cementitious material in mortar. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), 236978, 2016. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers/3.12.45>
- [24] D. Ö. Kaman, L. Köroğlu, E. Ayas, and Y. Güney, The effect of heat-treated boron derivative waste at 600 C on the mechanical and microstructural properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 154, 743-751, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.209>
- [25] B. Cicek, E. Karadagli and F. Duman, Valorisation of boron mining wastes in the production of wall and floor tiles. *Construction and Building Materials*, 179, 232-244, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.182>
- [26] M. Yildirim and E. M. Derun, The influence of CuO nanoparticles and boron wastes on the properties of cement mortar. *Materiales de Construcción*, 68(331),

- e161-e161,  
2018. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.03617>
- [27] A. Mancı and A. Sarıışık, Investigation of the Effect of Cement Amount and Boron Waste on Early Strength of Pumice Aggregate Lightweight Concrete. I CIVILTECH 2019, 124, 2019.
- [28] A. G. Çelik, A. Yörükoğlu, S. Sürdem, A. Türker and Y. Erdoğan, Bor katkılı pomza tuğla üretimi, fizikomekanik ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi. Journal of Boron, 4(2), 107-118, 2019. <https://doi.org/10.30728/boron.756254>
- [29] A. Evcin, B. Ersoy and H. Çiftçi, Utilization of marble and boron waste in brick products. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering (IJCESEN), 5(1), 19-22, 2019.
- [30] H. Tokgöz, B. Dünder and E. Çınar, Investigation of the Effect of Sulfuric Acid on Colemanite Additive Mortars, I CIVILTECH 2019, 126, 2019.
- [31] Y.Y. Çelen, A. Evcin, I. Akkurt, N.Ç. Bezir, K. Günoğlu and N. Kutu, Evaluation of boron waste and barite against radiation. International Journal of Environmental Science and Technology, 16(9), 5267-5274, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02333-3>
- [32] U.K. Sevim, M. Ozturk, S. Onturk and M. B. Bankir, Utilization of boron waste borogypsum in mortar. Journal of Building Engineering, 22, 496-503, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.015>
- [33] A. Aldakshe, H. Çağlar, A. Çağlar and Ç. Avan, The investigation of use as aggregate in lightweight concrete production of boron wastes. Civil Engineering Journal, 6(7), 1328-1335, 2020. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091551>
- [34] M. Ozturk, U.K. Sevim, O. Akgol, E. Unal and M. Karaaslan, Investigation of the mechanic, electromagnetic characteristics and shielding effectiveness of concrete with boron ores and boron containing wastes. Construction and Building Materials, 252, 119058, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119058>
- [35] A. Christogerou, P. Lampropoulou and E. Panagiotopoulos, Increase of frost resistance capacity of clay roofing tiles with boron waste addition. Construction and Building Materials, 280, 122493, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122493>
- [36] T. Kütük-Sert, T. and S. Kütük, Physical and marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2), 266-273, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000580)
- [37] S. Terzi, N. Morova, N. Çolak, S. Serin and M. Saltan, Kolemanit Atıklarının Asfalt Beton Karışımlarda Filler Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. 10. Ulaştırma Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İzmir, 25-27 Eylül, 449-457, 2013.
- [38] C. Gürer and G. Ş. Selman, Investigation of properties of asphalt concrete containing boron waste as mineral filler. Materials Science, 22(1), 118-125, 2016. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.12596>
- [39] Ş. Oruç, B. Yılmaz, K. Sancak, Effect of boron-containing additives on rheological properties of asphalt binder. Road Materials and Pavement Design, 17(4), 810-824, 2016. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1120228>
- [40] M. Keskin, M. Karacasu, Effect of boron containing additives on asphalt performance and sustainability perspective. Construction and Building Materials, 218, 434-447, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.133>
- [41] H. Kara, Taş mastik asfalt ve beton yol kaplama inşasında bor atıklarının kullanılabilirliği, Master's thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021.
- [42] A. Karşioğlu and M. İ. Onur, Geopolymers in Soil Stabilization from Past to Present. International Conference on Advances in Engineering, Architecture, Science and Technology (ICA-EAST 2021). Etkinlik Tarihi: 15 – 17 Aralık 2021.
- [43] E. Çoruh, S. Hınıslioğlu, M. Kocakerim, S. Arasan, and M. Oltulu, Borojipsin alttemel tabakasinda stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasının araştırılması. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(2), 221-231, 2013.
- [44] Y. Zhang, Q. Guo, L. Li, P. Jiang, Y. Jiao and Y. Cheng, Reuse of boron waste as an additive in road base material. Materials, 9(6), 416, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9060416>
- [45] İ. Zorluer and S. Gucek, Usage of fly ash and waste slime boron for soil stabilization. Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN), 5(1), 2017. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v5i1.74>
- [46] V. Okur and K. Akinci, Dynamic behavior of soft subgrade soils treated with boron waste. Advances in Materials Science and Engineering, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2390481>
- [47] İ. Zorluer and S. Gucek, The usability of industrial wastes on soil stabilization. Revista de la construcción, 19(1), 80-89, 2020. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.19.1.80-89>













## CFRP lif takviyesi ile onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi

### Experimental investigation of behaviour of reinforced concrete beam with openings repaired using CFRP sheets

Yasin Mohammady<sup>1</sup> , Sıla Yaman<sup>2</sup> , Abdullah Gündoğay<sup>3</sup> , Ceyhun Yüksel<sup>4</sup> ,  
Nebyi Asmerom Negash<sup>5</sup> , Hamide Tekeli Kabaş<sup>6,\*</sup> 

<sup>1,2,3,6</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

<sup>4,5</sup> Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, karbon lif takviyeli polimerler (CFRP) kullanılarak onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Boşluklu ve boşluksuz referans kirişler literatürden seçilmiştir. Çalışma kapsamında, boşluklu referans kirişe eşdeğer özelliklerde üç adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numune üretilmiştir. Kirişler, boşluk etrafında CFRP kumaş kullanılarak U şeklinde sargı, FRP çapraz ve ankraj uygulamasının farklı kombinasyonlarıyla onarılmıştır. Düşey yük etkisindeki kirişlerin yük taşıma kapasitesi, rijitliği, sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve göçme modu durumlarını değerlendirmek için dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CFRP kumaş kullanılarak yapılan onarım uygulamalarının betonarme kiriş davranışı üzerinde önemli katkıların olduğunu göstermiştir. Çalışmanın değerlendirme parametreleri için en büyük artışlar üç uygulamanın bir arada yapıldığı (U şeklinde sargı, üzerine çapraz FRP ve ankraj) numunede görülmüştür. Bu numune sonuçları boşluklu referans kiriş ile kıyaslandığında yük taşıma kapasitesi, enerji tüketme kapasitesi ve sünekliğinin sırasıyla %4, %51 ve %47 oranlarında arttığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme kiriş, Boşluk, FRP, Onarım

#### 1 Giriş

Betonarme kiriş elemanlar, üzerine etkiyen düşey ve yatay yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek şekilde tasarlanırlar. Ancak, bazen bina kullanımında iken tesisat borusu, telefon ve elektrik hatlarının geçirilmesi gibi gereklere betonarme kirişlerin gövdesine hasar verilerek boşluklar oluşturulabilmektedir (Şekil 1). Mevcut bir kirişin gövdesinde boşluk açılması, tasarım aşamasında dikkate alınmadığı için yük etkisi altında zayıflıklar oluşturarak elemanın bu bölgelerden hasar görmesine sebep olmaktadır.

Birçok araştırmacı tarafından, imalat aşamasında ya da imalattan sonra gövde boşluğu açılan betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalarda; dairesel

#### Abstract

In this study, the behavior of reinforced concrete (RC) beam with openings repaired using carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) was experimentally investigated. The reference beams with and without opening were selected from literature. Three rectangular RC beams specimens were casted as similar to beam with opening. The beams were repaired by using CFRP sheets around the beam opening with different details. The CFRP details in specimens were applied as different combination of U-shaped, FRP cross and anchors. The tests of four-point bending in beams carried out to evaluate load capacity, stiffness, ductility, energy assumption capacity and failure mode under vertical load. The obtained results showed that the use of CFRP sheets has a significant effect on behavior of RC beams. The greatest increase was seen in specimen which are applied U-shaped, FRP cross and anchors. The beam was improved the load capacity, energy assumption and ductility to approximately 4%, 51% and 47%, respectively, compared to the reference beam with opening.

**Keywords:** Reinforced concrete Beam, Opening, FRP, Repair

boşluklu kirişlerin kare ve dikdörtgen boşluğa sahip kirişlere göre daha büyük yük taşıma kapasitelerinin olduğu [2] ve boşluğun mesnete yaklaşması ile eleman yük taşıma kapasitesinin azaldığı [1, 3-5] görülmüştür. Ayrıca kirişin kesme kırılmasına neden olan bu boşlukların, eleman yük taşıma kapasitesini de önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır [6,7]. Bu nedenle, farklı amaçlarla sonradan oluşturulan boşluklara sahip kiriş elemanların onarımının mutlaka sağlanması gerekir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [8]’nde betonarme kiriş elemanların kesme dayanımlarının ve süneklik kapasitelerinin artırılması için, dıştan etriye eklenmesi ve lifli polimerler ile sarılması önerilmektedir. Son yıllarda onarım ve güçlendirme uygulamalarında lif

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hamidetekeli@sdu.edu.tr (H. Tekeli Kabaş)  
Geliş / Received: 28.02.2022 Kabul / Accepted: 16.05.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1080586

takviyeli polimerler (FRP), yüksek korozyon dayanımına, yüksek çekme dayanımına ve hafif bir malzeme olma özelliklerine sahip olması nedeniyle tercih sebebi olmuştur [9-12]. Dolayısıyla boşluklu kirişlerin onarımında da kullanılabilir. [1].



Şekil 1. Kirişte sonradan açılan boşluklar [1]

Abdalla vd. [13], kesme bölgesinde boşluk bulunan betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP miktarının davranış üzerindeki etkinliğini inceleyerek yaklaşık yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi için analitik yöntem geliştirmişlerdir. Bu amaçla 10 adet kiriş test edilmiştir. Deney sonuçları; güçlendirme tekniğinin, yük taşıma kapasitesini artırdığını ve hasarın kontrol edilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Pimanmas [14], kesme bölgesinde dairesel ve kare boşluk bulunan 13 adet kirişi FRP ile güçlendirerek, FRP' nin eleman davranışına etkisini analitik ve deneysel olarak incelemiştir. FRP çubukların kiriş derinliği boyunca çapraz şekilde yerleştirildiği numunede, elemanın dayanım ve sünekliği önemli derecede artmıştır. Osman vd. [15], boşluklu betonarme kirişleri, yüzeylerinde aramid elyaf takviye polimerleri (AFRP) kullanarak onarmıştır. Bu amaçla bir adedi boşluksuz ve bir adedi boşluklu referans numune olmak üzere toplam 7 adet kiriş numunesi üretilmiş ve 5 numunede boşluğun etrafı AFRP malzeme ile düşey ve diyagonal olarak sarılmıştır. Sonuçlarda, diyagonal uygulamanın elemanın kesme dayanımını artırmada daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Nie vd. [16] tarafından yapılan çalışmada; iki tanesi boşluksuz, diğerleri boşluklu olarak üretilen 8 adet tam ölçekli betonarme kiriş üç noktalı eğilme yükü altında test edilmiştir. Boşluksuz numunelerden biri dikdörtgen kesitli, diğer tüm kirişler ise T-kesitli olarak üretilmiştir. Boşluklu kirişler, CFRP kumaşlar ile güçlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; büyük boşlukların eğilme dayanımını düşürebileceğini, gevrek kırılmanın oluşmasını engellemek ve elemanın sünek davranışını sağlamak için CFRP güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Elsanadedy vd. [17], boşluğun elemanın davranışına olan etkisini incelemiştir. Kesme bölgesinde büyük dikdörtgen boşluk bulunan kirişler, FRP uygulaması ile onarılmıştır. Önerilen yöntemin büyük boşluğa sahip kirişlerde etkili olduğu, ancak çok büyük boşluklu kirişlerde etkili olmayabileceği vurgulanmıştır. Salih vd. [18] yaptıkları deneysel çalışmada, CFRP ile onarılan boşluklu betonarme kirişin davranışını incelemiştir. Rijitlik, süneklik, maksimum yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesini değerlendirmek amacıyla 7 adet dikdörtgen

kesitli kesme ya da eğilme bölgesinde boşluk bulunan deney numunesi üretilmiştir. Boşluğun konumu, kirişin performansını büyük oranda etkilemiş ve onarım uygulaması ile kiriş kapasite değerlerinin arttığı görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak incelendiğinde, boşluklu kirişlerin onarılması için FRP sargılama uygulamasının sıklıkla tercih edildiği ve böylelikle eleman davranışının iyileştirildiği görülebilir. Ancak, FRP malzemesinin eleman yüzeyinden erken ayrılması durumunda etkinliği azalmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında, tasarım hesaplarında dikkate alınmayan ve betonarme kiriş elemanın mesnet bölgesinde sonradan oluşturulan boşlukların davranış üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirmek ve FRP ile onarımın etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bunun için Qaderi vd. [1] çalışmasındaki numune özelliklerine eşdeğer toplam üç adet boşluklu betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişler CFRP kumaş kullanılarak farklı detaylarla onarılmış ve etkinliği incelenmiştir.

## 2 Deneysel çalışma

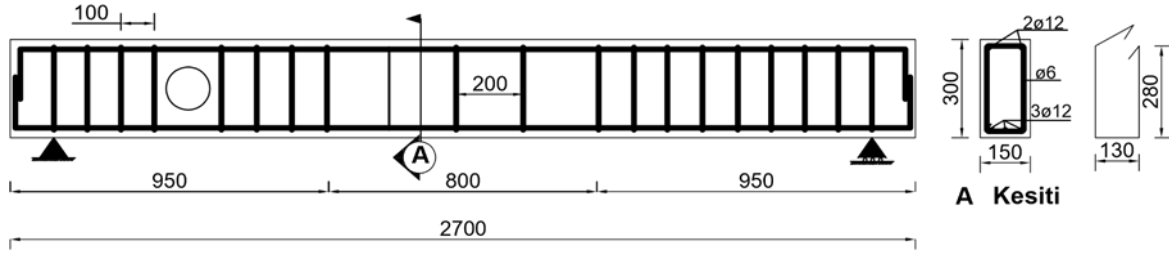
Çalışma kapsamında, Qaderi vd. [1] çalışması ile özdeş olarak kesit boyutları 150 mm×300 mm ve uzunluğu 2700 mm olan üç adet 1/2 ölçekli betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerin çekme ve basınç donatıları sırasıyla 3Ø12 ve 2Ø12 olarak seçilmiştir. Enine donatılar Ø6/200/100 aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 2).

Çalışma kapsamında üç adet kiriş onarılmak üzere boşluklu olarak üretilmiştir. Boşluklar, tüm kirişlerde standart olarak kirişin sol ucundan 525 mm mesafede 150 mm çapında dairesel olarak bırakılmış ve boşluğun hizasında bulunan bir etriye kesilmiştir.

Beton dayanımının belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×150 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Numunelerin, 28 gün kür işlemi sonundaki eksenel basınç deneylerinden elde edilen ortalama basınç dayanımı 36 MPa'dır. Kiriş üretiminde kullanılan Ø6 ve Ø12 donatıların çekme deneylerinden ortalama akma dayanımları sırasıyla 330 MPa ve 450 MPa olarak elde edilmiştir. Onarım için Spintex SPN U 300 türü CFRP kumaşlar kullanılmıştır. FRP malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. FRP uygulamasında; astar, epoksi ve tamir harcı için sırasıyla; Master Brace P3500, Master Brace P4500 SAT ve Master Brace ADH 1406 olmak üzere üç farklı kimyasal malzeme kullanılmıştır. Üç malzeme de iki bileşenli olup kutu üzerinde belirtilen oranlarda karışımları sağlanmıştır.

Tablo 1. FRP malzemenin mekanik özellikleri [19]

Kesit Kalınlığı $t_f$	0.18 mm	
Çekme Dayanımı $f_f$	4200 MPa	
Kopma Uzaması $\epsilon_f$	%1.8 = 0.018	
Elastisite Modülü $E_f$	240 GPa	



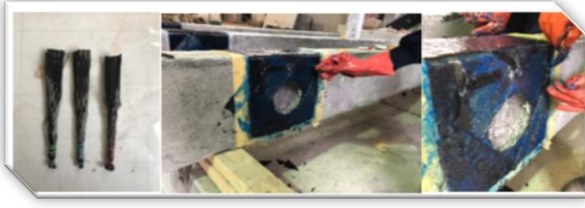
Şekil 2. Donatı krokisi

Tablo 2. Deney numunelerinin detayları

Kiriş İsmi	Onarım Tekniği	Görünümü	Uygulama Detayı
K1-BZR K2-BLR		Boşluksuz referans [1] Boşluklu referans [1]	
K3-OU	U şeklinde FRP sargı		
K4-OUÇ	U şeklinde FRP sargı + FRP çapraz		
5-OUÇA	U şeklinde FRP sargı + FRP çapraz + FRP ankraj		

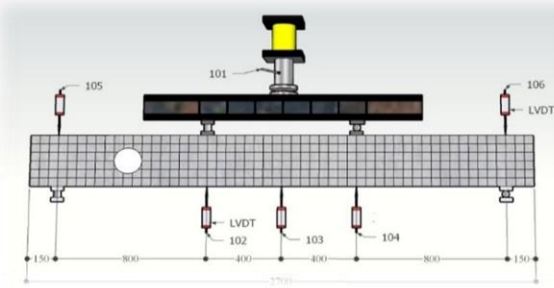
Çalışma kapsamında üretilen boşluklu kirişler FRP kumaş kullanılarak farklı detaylarla onarılmıştır. Tablo 2’de K kısaltması kiriş ifadesini; bu harften sonraki rakam, numune numarasını; BZ, boşluksuz; BL, boşluklu; R, referans; O, onarılan kiriş numunelerini ifade etmektedir. Onarılan tüm numunelerde FRP uygulama detayları, boşluk etrafında U şeklinde sarılarak (U), boşluk etrafında çapraz (Ç) ve FRP ankraj uygulaması (A) şeklinde tanımlanmıştır. Bu üç tanımlama (U, Ç, A) kirişlerde farklı kombinasyonlarla uygulanmıştır. Onarım işlemi, kat döşemesinin varlığı düşünülerek kiriş üstünden 60 mm mesafeye kadar devam ettirilmiştir.

Onarım uygulamasında ilk olarak FRP yapıştırılacak yüzeylerin sivri köşelerinde yuvarlatma yapılmış ve yüzeyi pürüzlendirilmiştir. Daha sonra yüzeye sırasıyla astar, tamir harcı ve epoksi uygulanarak CFRP kumaş yüzeye yapıştırılmıştır. K5-OUÇA numunesinde uygulanacak sekiz adet ankraj için 10 mm çapında ve 65 mm derinliğinde delikler oluşturulmuş ve hava kompresörü yardımıyla toz ve kirden temizlenmiştir. Uygulanacak ankraj için kesilen CFRP kumaş 6 mm çaplı donatı etrafına sarılarak ucu ipe bağlanmıştır. Numune yüzeyinde açılan ankraj delikleri şırınga aracılığıyla epoksi ile doldurulmuştur. Hazırlanan ankraj elemanları bu deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. FRP ankrajın uygulanması

Üretimleri tamamlanan kiriş numuneleri dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Düşey yük, hidrolik silindir ve yük hücresi yardımıyla uygulanmıştır. Deney sırasında oluşturulan yükleme düzeneği ve yerdeğiştirme ölçümü için kullanılan LVDT cihazlarının konumları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Yükleme sistemi ve yerdeğiştirme ölçerlerin konumları

### 3 Deney sonuçları

Deney numunelerinin onarım işlemi tamamlanarak dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney yerdeğiştirme kontrollü ve hasarın farklı aşamalarda kontrol edilebilmesi için tekrarlı olarak uygulanmıştır. Deney numunelerinde gözlenen ve işaretlenen hasarlar Şekil 5’te sunulmuştur. Qaderi vd. [1] çalışmasında, hasarsız numunenin (K1-BZR) eğilme hasarı ve çok sayıda kılcal çatlama sonra beton

ezilmesi ile güç tükenmesine ulaştığı belirtilmiştir. Aynı çalışma sonuçlarına göre, boşluklu numunede (K2-BLR) ilk kılcal çatlama hasarı eğilme çatlama şeklinde ortaya çıkmış ve ilerleyen yükleme adımlarında boşluk kenarında ani olarak gelişen kesme hasarı ile güç tükenmesi görülmüştür. Yapılan çalışmada boşluklu kiriş elemanda meydana gelen bu ani kesme kırılmasının önlenmesi ve davranışın iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

CFRP kumaş yardımıyla onarılan numunelerin tümünde yine ilk kılcal çatlama eğilme hasarı şeklinde ortaya çıkmıştır. U şeklinde sargılama yapılan K3-OU numunesinde kiriş açıklık ortasında 75 mm yerdeğiştirmeye ulaşıldığında FRP’ de betondan ayrılma ve yırtılmanın meydana gelmesi (Şekil 6.a) ile birlikte boşluk tarafında ani olarak kesme hasarı ortaya çıkmış ve numune güç tükenmesine ulaşmıştır. Dolayısıyla numunenin sadece U şeklinde FRP ile onarılması, istenen davranışın sağlanmasında tam olarak etkili olamamıştır. Boşluk etrafında U-FRP üzerine çapraz şekilde FRP yapıştırılan K4-OUÇ numunesinde ise, yerdeğiştirmenin 27 mm’ye ulaşması ile U şeklindeki FRP’ nin köşesinde ayrılma hasarı ortaya çıkmıştır (Şekil 6.b). Ancak U şeklindeki sargının üzerine çapraz şekilde yerleştirilen FRP ayrılma hasarının ilerlemesini engellediği için bir önceki numunede meydana gelen ani kesme kırılması bu kiriş elemanda gözlenmemiştir. Numune beton basınç bölgesinin ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır. U ve çapraz FRP’ nin üzerine ankraj uygulanan son onarım numunesinde (K5-OUÇA) ise deney boyunca herhangi bir FRP ayrılması veya yırtılması gözlenmemiştir. Dolayısıyla kiriş eleman eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve genişlemesi neticesinde basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır.

Deneyler sırasında tüm numuneler için elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri ve oluşturulan zarf eğrileri Şekil 7’de verilmiştir.

Tüm numuneler için elde edilen yük-yerdeğiştirme grafiklerinin zarf eğrileri kıyaslamalı olarak Şekil 8’de verilmiştir.



(a) K1-BZR [1]



(b) K2-BLR [1]



(c) K3-OU

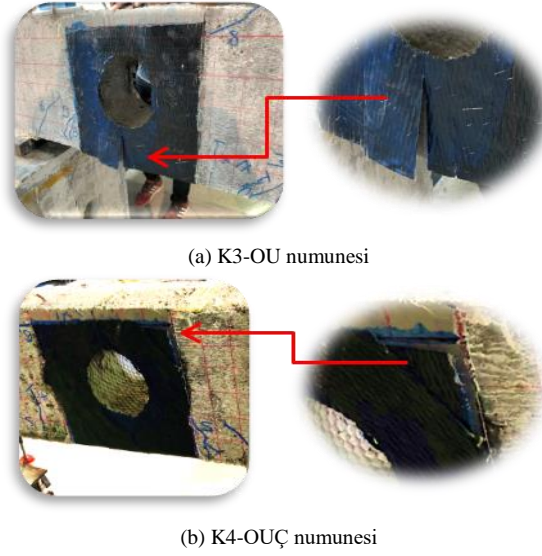


(d) K4-OUÇ

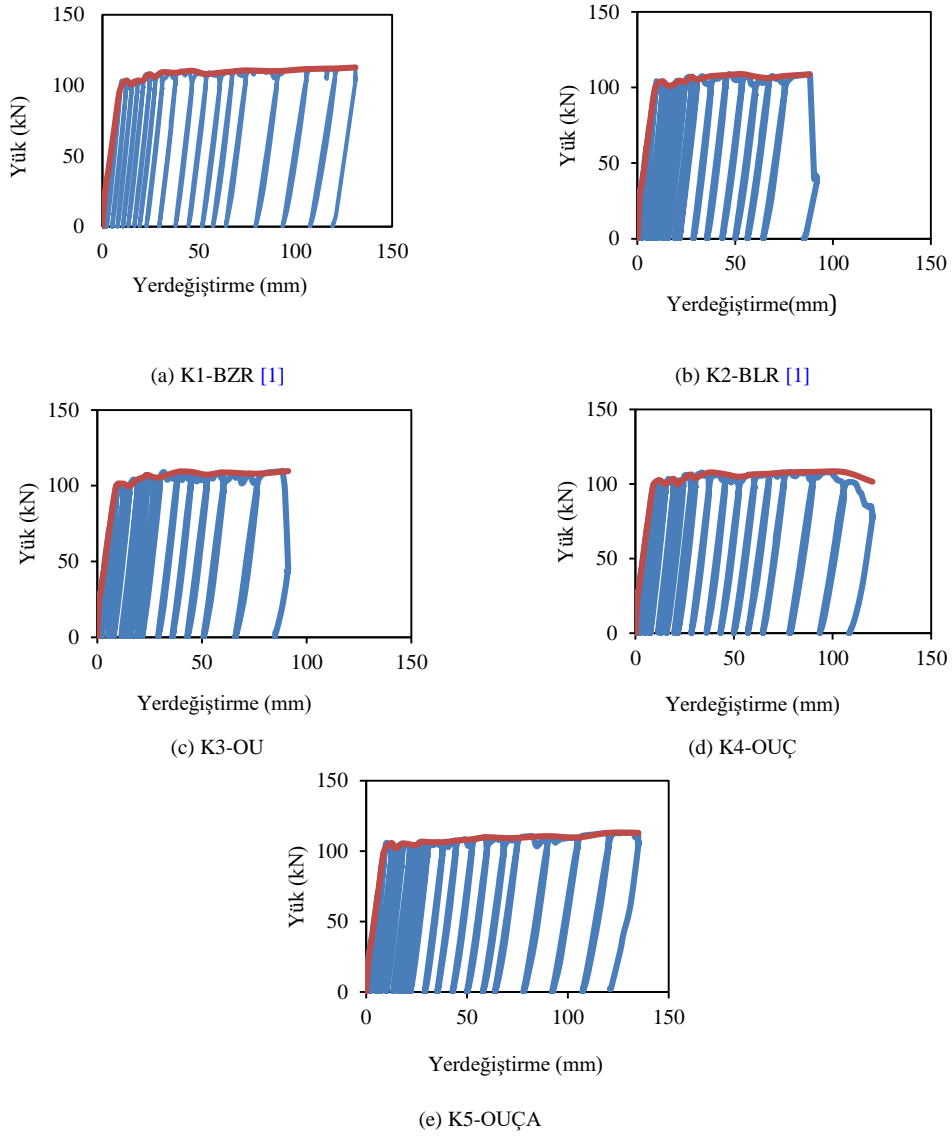


(e) K5-OUÇA

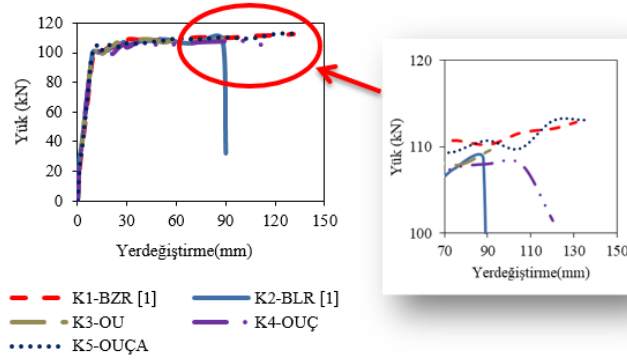
Şekil 5. Numunelerin güç tükenme seviyesindeki hasar durumları



Şekil 6. Numunelerde meydana gelen FRP ayrılma ve yırtılmaları



Şekil 7. Numunelere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri



Şekil 8. Tüm numunelere ait yük-yerdeğiştirme grafiklerinin zarf eğrileri

Deney numunelerine ait yük taşıma kapasiteleri (P), kümülatif enerji tüketme kapasiteleri (E), başlangıç rijitlikleri (K), akma anındaki yerdeğiştirmeleri ( $\Delta y$ ), güç tükenmesi durumundaki yerdeğiştirmeleri ( $\Delta u$ ) ve bu yerdeğiştirmelere bağlı olarak hesaplanan sünekliklerine ( $\mu$ ) ait elde edilen sonuçlar Tablo 3' te verilmiştir. Ayrıca kıyaslamaların daha rahat yapılabilmesi için onarılan numuneler için elde edilen değerler, sırasıyla boşluksuz (K1-BZR) ve boşluklu (K2-BLR) referans numune değerleri ile kıyaslanarak artış ve azalış yüzdeleri elde edilmiştir (Tablo 4). Tablo 4' te; pozitif değerler artışı, negatif değerler ise azalışı göstermektedir. Taşıma kapasitesi ile deney sırasında ulaşılan en büyük yük değeri ifade edilmektedir. Deney numunelerinin tamamı eğilme kapasitesine ulaştığı için numuneler arasında elde edilen yük taşıma kapasiteleri açısından önemli bir farklılık görülmemekle birlikte en büyük yük taşıma kapasitesine K5-OUÇA numunesi ulaşmıştır.

Numunelere ait enerji tüketimi hesabında, her bir çevrimin içinde kalan alan hesaplanmış ve bu değerler toplanarak kümülatif enerji tüketimi değeri elde edilmiştir. Onarılan numuneler arasında en düşük enerji tüketimi K3-OU numunesinde, en yüksek değer ise K5-OUÇA numunesinde ortaya çıkmaktadır. Boşluksuz ve boşluklu referans numuneler ile kıyaslama yapıldığında K5-OUÇA numunesinde sırasıyla %3 ve %51 artış gözlenmiştir. Bu numune için enerji tüketimi değerlerinin boşluksuz referans

numunedeki değere ulaştığı ve boşluklu numuneye göre en büyük artışın ortaya çıktığı söylenebilir. K3-OU numunesinde ise boşluksuz numuneye göre %31 azalma görülürken, boşluklu numuneye göre %1 artış görülmüştür. Dolayısıyla enerji tüketimi açısından K3-OU numunesi neredeyse boşluklu numunenin değerlerine sahiptir. Dolayısıyla enerji tüketimi açısından diğer onarım yöntemlerine kıyasla yetersiz kalmaktadır.

Rijitlik değerleri numunenin açıklık ortasında 1,5 mm yerdeğiştirme seviyesindeki değerler hesaplanarak dikkate alınmıştır. Referans numunelere göre tüm numunelerin rijitliklerinde azalma görülmekte ve boşluksuz referans numunenin değeri karşılanamamaktadır. Elde edilen sonuçlardan uygulanan onarım yönteminin numune rijitliğini etkilemediği görülmüştür. Onarılan numuneler arasında davranış olarak en belirgin farklılık, enerji tüketimi ve süneklik açısından meydana gelmiştir.

Numunelerin sünekliği, nihai seviyedeki yerdeğiştirme değerinin akma anındaki yerdeğiştirme değerine oranlanması ile elde edilmiştir. Boşluklu numuneye göre tüm numunelerde artış meydana gelmiştir. Onarılan numuneler arasındaki en büyük süneklik K5-OUÇA numunesinde, en düşük süneklik ise K3-OU numunesinde elde edilmiştir. Sonuçlardan, K4-OUÇ ve K5-OUÇA numunelerinde elde edilen süneklik değerinin boşluksuz referans numune değerine ulaştığı görülebilir.

Tablo 3. Deney numunelerinin sonuçları

Numune ismi	P (kN)	E (kNmm)	K (kN/mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	$\mu$
K1-BZR [1]	112.83	13 978.00	41.15	10.20	131.00	12.84
K2-BLR [1]	108.84	9 524.00	37.54	9.20	88.00	9.57
K3-OU	109.60	9 643.60	36.35	9.18	91.13	9.93
K4-OUÇ	108.00	12 576.56	33.12	9.16	120.15	13.12
K5-OUÇA	113.08	14 393.10	34.59	9.80	138.02	14.08

Tablo 4. Deney sonuçlarının referans numunelerle kıyaslanması

Numune ismi	Referans	P (%)	E (%)	K (%)	$\mu$ (%)
K3-OU	K1-BZR	-3	-31	-12	-23
	K2-BLR	1	1	-3	4
K4-OUÇ	K1-BZR	-4	-10	-20	2
	K2-BLR	-1	32	-12	37
K5-OUÇA	K1-BZR	0	3	-16	10
	K2-BLR	4	51	-8	47

#### 4 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada; tasarım esnasında dikkate alınmayan boşluklara sahip kirişlerin CFRP kumaş ile onarılması ve FRP onarımının etkinliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, Qaderi vd. [1] çalışmasındaki numune özelliklerinde üç adet boşluklu betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Boşluğun etrafı CFRP kumaş ile U, U+çapraz ve U+çapraz+ankraj olacak şekilde onarılmış ve uygulanan yöntemin davranış üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Boşluk etrafında sadece U şeklinde sargılama yapılan K3-OU numunesi, FRP ayrılması ile ani kesme hasarı oluşarak güç tükenmesine ulaşmıştır. Benzer şekilde U-FRP üzerine çapraz olarak FRP uygulanan K4-OUÇ numunesinde de FRP kenarında ayrılma hasarı başlamış ancak üzerinde bulunan çapraz şeklindeki FRP, ayrılmanın devam etmesini önlemiştir. Dolayısıyla numune beton basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır. U-FRP ve çapraz FRP'nin üzerine ankraj uygulanan son onarım numunesinde (K5-OUÇA) ise herhangi bir FRP hasarı ya da ayrılması meydana gelmemiştir. Bu numune, çok sayıda eğilme hasarının oluşması ve basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır.

2. Onarılan tüm numunelerin yük taşıma kapasitesi birbirine oldukça yakındır. En büyük yük taşıma kapasitesine ulaşan K5-OUÇA numunesinde boşluklu referans numune ile kıyaslandığında %4 kapasite artışı görülmüştür.

3. Onarılan numunelerin enerji tüketimi değerleri, boşluklu referans kirişin değerleri ile kıyaslandığında tüm numunelerde artış olduğu görülebilir. En büyük artış %51 ile K5-OUÇA numunesinde, en küçük artış ise %1 ile K3-OU numunesinde görülmüştür. Enerji tüketimi için K3-OU numunesi neredeyse boşluklu numunenin değerlerine sahiptir. Dolayısıyla bu numunedeki onarım tekniği enerji tüketimi açısından diğer onarım uygulamalarına kıyasla yetersiz kalmaktadır. Aynı zamanda elde edilen sonuçlardan boşluksuz referans numunenin değerine sadece K5-OUÇA numunesinin ulaştığı görülebilir. Dolayısıyla onarım için en etkili uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır.

4. Referans numunelere göre tüm numunelerin rijitliklerinde azalma görülmüş ve boşluksuz referans numunenin değeri karşılanamamıştır. Dolayısıyla uygulanan onarım yönteminin numune rijitliğini fazla etkilemediği söylenebilir.

5. Numunelerdeki onarım uygulamasının en etkili olduğu parametrelerden biri de süneklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Numunelerin sünekliği açısından boşluklu numuneye göre tüm numunelerde artış meydana gelmiştir. K4-OUÇ ve K5-OUÇA numunelerinde elde edilen süneklik değeri boşluksuz referans numune değerine ulaşmıştır. Boşluksuz ve boşluklu referans numuneler ile kıyaslandığında K3-OU numunesinde sırasıyla %23 azalma ve %4 artma meydana gelirken, K5-OUÇA numunesinde %10 ve %47 artma meydana gelmiştir.

6. Tüm numuneler genel olarak değerlendirildiğinde, yük taşıma kapasitesi, enerji tüketimi ve süneklik açısından U, çapraz ve ankrajın birlikte uygulandığı K5-OUÇA numunesinin en iyi sonuçları verdiği ve boşluksuz referans kirişin değerlerine ulaştığı için seçilen yöntemler arasında en etkili onarım yöntemi olduğu söylenebilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %7

#### Kaynaklar

- [1] A. Qaderi, M. B. Saoud, V. Eren, A. Gündoğay, S. Yaman ve H. Tekeli Kabaş, Eğilme etkisindeki büyük dairesel boşluklu kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Basım Aşamasında, 2022.
- [2] F. M. Özkal, Betonarme yüksek kirişlerde boşluk konumu ve şeklinin yapısal davranış üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22 (2), 149-160, 2017 <https://doi.org/10.17482/uumfd.338788>.
- [3] M. A. Mansur, K.H. Tan, and W. Wei, Effects of creating an opening in existing beams. ACI Structural Journal, 96(6), 899-905, 1999.
- [4] K. H. Tan and M. A. Mansur, Design procedure for reinforced concrete beams with large web openings. ACI Structural Journal, 404, 1996.
- [5] A. Qaderi, Eğilme etkisindeki büyük dairesel boşluklu kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [6] İ. Kalkan, Düzenli boşluklu betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 155-163, 2014. <https://doi.org/10.17341/gummfd.94985>.
- [7] Y. Mohammady, Büyük dairesel boşluklu betonarme kirişlerin güçlendirilmesinin deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [8] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar. Türkiye Cumhuriyeti Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [9] W. Aldhabir, A. Sarıbyık ve E. Aydın, CFRP ile güçlendirilmiş eğilme yükü etkisindeki betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. 6. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, sayfa 1062-1071, Alanya-Antalya, Türkiye, 9-11 Kasım 2018.
- [10] S. Alshlash, C. Aksoylu, İ. H. Erkan ve M. H. Arslan, Ön hasarlı kesme kirişlerinin CFRP ile onarım ve güçlendirilmesi. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik, sayfa 172-177, Ankara, Türkiye 7-10 Kasım 2019.
- [11] İ. H. Erkan, C. Aksoylu, S. Alshlash ve M. H. Arslan, Eğilmeye çalışan betonarme kirişlerde CFRP ile

- onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik, sayfa 163-171, Ankara, Türkiye 7-10 Kasım 2019.
- [12] M. M. Maraş, Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozitin yapısal performansa etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 108-119, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.797437>.
- [13] H. A. Abdalla, A. M. Torkey, H. A. Haggag and A. F. Abu-Amira, Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets. Composite Structures, 60, 197–204, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00305-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00305-7).
- [14] A. Pimannas, Strengthening R/C beams with opening by externally installed FRP rods: behavior and analysis. Composite Structures, 92 , 1957–1976, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.031>.
- [15] B. H. Osman, E. Wu and S. S. Abdulhameed, Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. International Journal of Concrete Structures and Materials, 11(1), 171–183, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0182-3>.
- [16] X. F. Nie, S. S. Zhang, J. G. Teng and G. M. Ghen, Experimental study on RC T-section beams with an FRP-strengthened web opening. Composite Structures, 185, 273–285, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.018>.
- [17] H. M. Elsanadedy, Y. A. Al-solloum, T. H. Almusallam, A. O. Alshenawy and H. Abbas, Experimental and numerical study on FRP-upgraded RC beams with large rectangular web openings in shear zones. Construction and Building Materials, 194, 322–343, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.238>.
- [18] R. Salih, F. Zhou, N. Abbas and A. K. Mostoi, Experimental investigation of reinforced concrete beam with openings strengthened using FRP sheets under cyclic load. Materials, 13 (14), 3127, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143127>.
- [19] Cvc, 2022. FRP Ürün Kataloğu. <http://www.cvc.com.tr/pdf/755cvc-spn-u-300-frp-6db350a6-e.pdf> , Erişim Tarihi: 25 Ocak 2022.







# Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama

## Performance evaluation of artificial intelligence and heuristic regression methods for rainfall-runoff modelling: An application in Aksu Stream

Hasan Törehan Babacan<sup>1,\*</sup>, Ömer Yüksek<sup>2</sup>, Fatih Saka<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Amasya Üniversitesi, Taşova Yüksel Akın MYO, 05800, Amasya, Türkiye

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>3</sup> Karabük Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 78000, Karabük, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, Aksu Deresi üzerinde, günlük toplam yağış (P) ve günlük ortalama debi (Q) değerleri kullanılarak Yağış-Akış Modelleri geliştirilmiş ve gelecek debi tahmini yapılmıştır. Yağış-Akış modellerinde kullanılan sayısal yöntemlerin Yağış-Akış sürecini açıklayabilme performansları kıyaslanmıştır. Yağış-Akış sürecini açıklamada, Yapay Zeka (AI) yöntemlerinden, Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Ayrıca Sezgisel Regresyon (HR) yöntemi olarak Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) kullanılmıştır. Yöntemlerin performansı Hata Ortalamalarının Karesinin Karekökü (RMSE), Korelasyon Katsayısı (R) ve Mutlak Hataların Ortalaması (MAE) katsayıları ile belirlenmiş ve kıyaslanmıştır. Denenen AI yöntemlerinin performansları çok yakın olsa da ANFIS yöntemi ile oluşturulan Yağış-Akış modelinde en düşük hata değeri elde edilmiştir. Denenen diğer yöntemlerde ise en yüksek performans değeri MARS ile oluşturulan Yağış-Akış modelinde gözlenmiştir. AI, HR ve diğer yöntemlerde yapılan performans değerlendirmesinde, MARS yönteminin AI yöntemlerine göre Yağış-Akış sürecini açıklayabilme performansının daha yüksek olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Yağış-Akış modellemesi, Yapay zeka, Sezgisel regresyon, Aksu Deresi

### 1 Giriş

Yağışa bağlı olarak gelecek debinin tahmin edilmesi taşkın olayları başta olmak üzere kurulacak su yapılarının projelendirmesi, optimum yerin belirlenmesi ve projede bütçenin optimum şekilde kullanılabilmesi için büyük öneme sahiptir [1]. Hızla artan nüfus yoğunluğu, sanayileşme, akarsu yakınlarında şehirleşme ve doğal yağış-akış dengesinin beşeri etkenler ile bozulması taşkın riskini önemli derecede artırmaktadır.

Yağış-Akış Modellemesi (YAM), yağış rejiminin sürekli değişkenlik göstermesi, çok geniş alanlarda gerçekleşmesi, sürekli gözlenebilir olmaması, havza içerisinde bulunan farklı topografik koşullardan etkilenmesi ve çok fazla

### Abstract

Rainfall-Runoff Models were developed by using the daily total precipitation (P) and daily mean discharge (Q) values on Aksu Stream and future discharges were predicted. The performances of numerical methods to explain the Rainfall-Runoff process were compared. Two kinds of Artificial Intelligence (AI) methods, including, Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS); as well as Heuristic Regression (HR) method, including Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) and Support Vector Machine (SVM), were used to describe the process. The performance of the methods was determined by using the Root Mean Square Error (RMSE), Correlation Coefficient (R) and Mean Absolute Error (MAE) coefficients. Although the performance of AI methods was very close, the lowest error value was obtained by ANFIS method. For the other methods, the highest performance was observed with MARS. It has been concluded that MARS method, which is HR method have higher performance than AI methods.

**Keywords:** Rainfall-Runoff modelling, Artificial intelligence, Heuristic regression, Aksu Stream

değişkenin etki etmesi gibi sebepler dolayısıyla hidrolojik araştırmaların en karmaşık problemlerinden birisidir [2]. Blöschl ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı çalışmada hidrolojide çözülmemiş 260 problem ortaya koyulmuş ve bu problemlerden en önemli olan 23 tanesi belirlenmiştir. Belirlenen bu 23 problemde büyük çoğunluğu yağış-akış prosesi ile direkt olarak, geri kalanları ise yağış-akış prosesi ile dolaylı olarak ilişkilidir [3]. Hidroloji alanında büyük önemi olan bu karmaşık problemin çözülmesi için pek çok araştırmacı YAM konusunda çalışmalar yapmıştır [4]. Havzaya giren suyun, yüzeyde toplanarak çıkışa geçene kadar olan sürede pek çok dış faktörden etkilendiği ve bu faktörlerin tümünün yapılacak fiziki gözlem ve modelleme ile ifade edilmesinin mümkün olmadığı bilinmektedir [5].

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail:hasan.babacan@amasya.edu.tr (H. T. Babacan)

Geliş / Received: 26.02.2022 Kabul / Accepted: 14.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1079616

YAM oluşturulması sırasında yüzey akışını etkileyen çok fazla parametre bulunduğundan modele karar vermek sınırlı bir amaç doğrultusunda yapılabilir ayrıca modelleri çözümlenmek için karmaşık eşitlikler kullanılmalıdır [6].

YAM karmaşık ve uzun zaman serileri arasındaki ilişkinin ortaya koyulması esasına dayanmaktadır. Bu nedenle geçmiş çalışmalarda pek çok YAM geliştirildiği görülmektedir [4, 7, 8]. Geliştirilen YAM yapıları gelişen bilgisayar teknolojileriyle birlikte geliştirilen yeni algoritmalarla denenmektedir ve optimum ilişkinin bulunması amaçlanmaktadır [5]. Makine öğrenmesi gerçekleştiren Yapay Zeka (YZ) ve Sezgisel Regresyon (SR) yöntemleri YAM çalışmalarında ampirik ve fiziksel modellere göre daha başarılı sonuçlar üretmektedir [9].

Literatürde makine öğrenmesi ile geliştirilen YAM yapıları incelendiğinde farklı girdi parametrelerinin kullanıldığı görülmekte olup, bu parametrelerden yüzeysel akış miktarının tahmin edilmeye çalışıldığı görülmektedir. YAM yapılarında esas girdi parametreleri olarak yağış ve geçmiş yüzeysel akış verileri kullanılmıştır [10]. YAM konusunda YSA, ANFIS sayısal yöntemleri literatürde daha geniş yer bulmuş ancak çalışmada kullanılan MARS ve SVM daha sınırlı bir kullanım alanı bulmuştur. Yapılan çalışma bulguları incelendiğinde kullanılan modellerin, yağış ve yüzeysel akış parametreleri kullanarak gelecek yüzeysel akış tahmini konusunda başarılı sonuçlar ürettiği görülmektedir [10-13].

Aksu Deresi havzasında yağış-akış modelleme çalışmaları incelendiğinde, bölgedeki akış karakteristiğini tanımlamak için yağış ve geçmiş akış verilerinin tahminleyici parametre olarak kullanıldığı, gelecek akış değerlerini tahmin edecek YAM modelinin farklı YSA mimarileri ile araştırıldığı görülmüştür. Yapılan çalışmalarda alt havzada bulunan istasyonda akış tahmini yapılmış olup, YSA ile başarılı akış tahmini yapıldığı görülmüştür [8]. Bu çalışma bölgedeki mevcut çalışmadan farklı olarak, havzanın daha yüksek bir kesiminde gerçekleştirilmiştir ve YSA'ya alternatif farklı sayısal metotlar kullanılarak en uygun YAM elde edilmesini amaçlanmaktadır.

Yakın bir tarihte, büyük bir hasara ve can kayıplarına neden olan taşkın felaketinin yaşandığı Aksu Deresi üzerinde bulunan D22A090 numaralı akım gözlem istasyonu verileri kullanılarak bölgede optimum çözüm için YAM çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile literatürde en sık kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerine ek olarak, yağış-akış modellemesi konusunda daha az kullanım alanı bulmuş yöntemlerin bölge için uygulaması gerçekleştirilmiş olup, bölge ve benzer akış karakteristiğine sahip bölgelerde gelecek debinin kesinlik oranı yüksek şekilde tahmin edilmesine katkı sağlaması amaçlanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Çalışma bölgesi: Aksu Deresi alt havzası

Doğu Karadeniz Havzası Türkiye'nin 25 havzası arasında yağış alanına göre ortalama yıllık yüzeysel akış potansiyeli en yüksek havzasıdır. Doğu Karadeniz Havzası'nın potansiyel iştirak oranı %8,9 olup havza Türkiye için en önemli havzalar arasındadır [14]. Çalışma

bölgesi olarak yoğun engebeli yapısı nedeniyle taşkın riskinin en fazla olduğu havzaların başında gelen Doğu Karadeniz Havzası seçilmiş olup, havza içerisinde 2020 yılının ikinci yarısında büyük bir taşkın yaşanmış olan Aksu Deresi alt havzası belirlenmiştir (Şekil 1). Çalışmada kullanılan D22A090 istasyonu Aksu Deresi üzerinde bulunmakta olup, istasyon Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü tarafından işletilmiştir. İstasyona ait bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

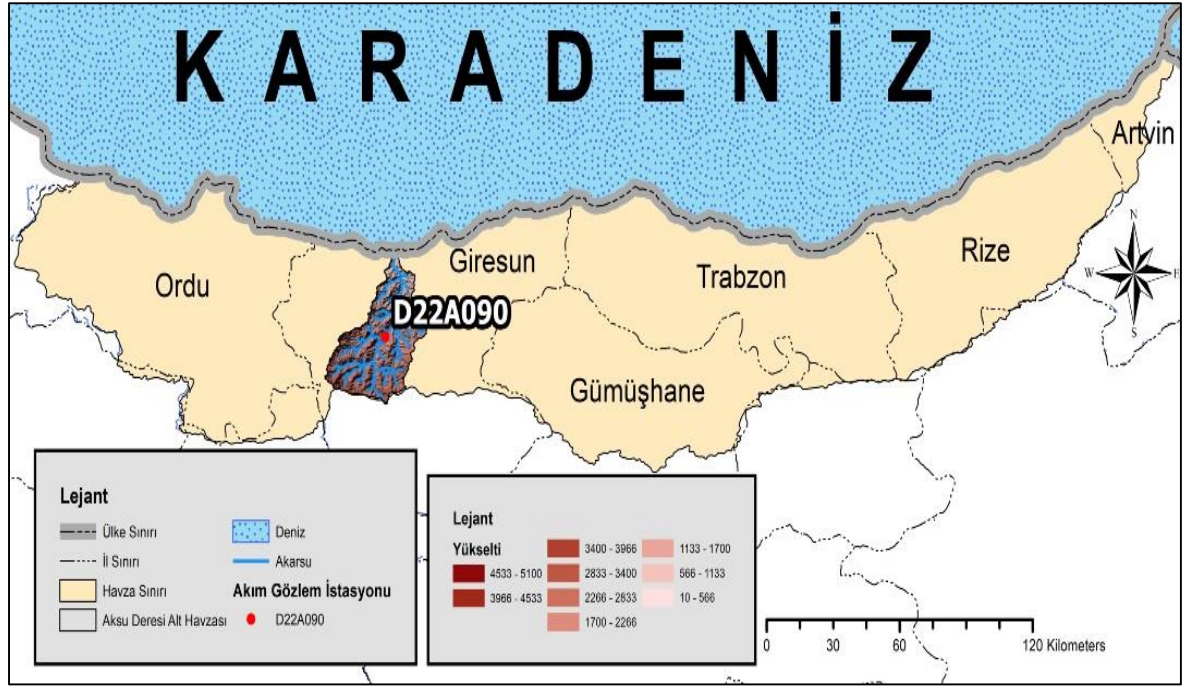
### 2.2 Çalışmada kullanılan yöntemler

#### 2.2.1 Yapay sinir ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağları (YSA) insan beyninin öğrenme, uyum sağlama, karar verme ve tahmin etme becerilerinin taklit edildiği bilgisayar sistemleridir. YSA makine öğrenmesi gerçekleştiren kapalı bir modeldir. YSA en genel durumda üç farklı katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar veri girişinden çıkışına doğru sırasıyla; girdi, ara (gizli) ve çıktı katmanlarıdır. Girdi katmanı verilerin dış dünyadan ağa girdiği kısım olup, ara katman verilerin belirlenen transfer fonksiyonları ile toplandığı ve çıktı katmanına aktarıldığı kısımdır ve çıktı katmanı da verilerin dış dünyaya aktarıldığı kısımdır [15]. YSA'da dış dünyadan gelen girdiler ağa biyolojik sinir hücrelerine benzeyen yapay nöronlar aracılığı ile alınır. YSA'nın temelini oluşturan nöronların gizli katmandaki sayısının belirlenmesi, öğrenme algoritmasının seçilmesi ve transfer fonksiyonlarının seçilmesi YSA'nın performansını etkileyen en önemli kriterleri olarak sayılabilmektedir [8, 16]. Çalışmada ileri adımlı geri beslemeli, çıktı katmanında üretilen veriyi hedeflenen veri ile kıyaslayarak ağı tersinir çalıştırmak üzere hata oranını azaltan ağ yapısı kullanılmıştır. YSA'da akış tahmini konusunda iyi sonuçlar üreten öğrenme algoritması Levenberg-Marquardt ve transfer fonksiyonu Hiperbolik Tanjant Sigmoid seçilmiştir [8, 15]. Optimum çözümün belirlenmesi için YSA gizli katmanında 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 nöron denenmiştir.

#### 2.2.2 Adaptif sinirsel bulanık çıkarım sistemi (ANFIS)

Bulanık Mantık işleminde kullanılan sözel kuralların YSA'ya uyarlanması sonucunda oluşturulmuş bir sistemdir [17]. Bu yönüyle Adaptif Sinirsel Bulanık Mantık (ANFIS) yöntemi, bulanık mantık ile YSA'nın hibriti olarak çalışmaktadır. Bu durum YSA'nın kesin değerler ile çalışan yapısına ara değerler ile tahmin üretebilme esnekliği kazandırmıştır. ANFIS yönteminde girdiler seçilen bir fonksiyon kullanılarak bulanıklaştırılır ve elde edilen bulanık veri seti ile ağın tahminleme işlemi başlatılır. Bulanık veriler YSA yapısında çıktılara dönüştürülür ve elde edilen bulanık çıktılar durulaştırma denilen, bulanık verilerin tekrar gerçek verilere dönüştürüldüğü işlem ile ağdan çıktı olarak alınır [18]. Çalışmada hidrolojik zaman serilerinin modellemesinde başarılı şekilde kullanılan Takagi-Sugeno tipi ANFIS yapısı oluşturulmuştur [19]. Ağın efektif için önemli parametrelerden olan Üyelik Fonksiyonu (ÜF) tipine karar vermek üzere literatürde yaygın şekilde kullanılan Genelleştirilmiş Çan, Gauss ve Üçgen tip fonksiyonlar denenmiştir [20]



Şekil 1. Doğu Karadeniz Havzası ve D22A090 AGİ konumu

Tablo 1. D22A090 (DSİ) numaralı akım gözlem istasyonuna ait bilgiler

İstasyon No	Yeri	Yağış Alanı (km <sup>2</sup> )	Yaklaşık Kot (m)	Bulunduğu Akarsu	Ortalama Akım (m <sup>3</sup> /s)
D22A090	40° 39' 10" K 38° 24' 20" D	470.2	700	Aksu Deresi	9.59

### 2.2.3 Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (MARS)

Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) yöntemi 1991 yılında Friedman tarafından geliştirilmiştir [21]. MARS modeli makine öğrenmesi gerçekleştirebilen regresyon tabanlı bir modeldir. Modelde girdi verileri kullanılarak Temel Fonksiyonlar (TF) oluşturulur. Oluşturulacak maksimum TF sayısı (maxTF) tasarımcı tarafından belirlenmesi gereken ve ağı performansı etkileyen önemli bir parametredir. maxTF değeriyle birlikte ağda ceza değeri de bulunmaktadır. Ağda bulunan ceza değeri girdi verilerinin tamamının oluşturulan TF'ler içerisinde bulunmasını ifade etmektedir. Yüksek ceza değeri atanması durumunda ağ tüm değişkenleri kullanarak TF oluşturmak için çalışacağından ağı performansının olumsuz etkilenmesi durumu ortaya çıkacaktır. maxTF değeri ve ceza değeri MARS modelleri için tasarımı etkileyen en önemli hususlar arasında sayılabilir. MARS modelinde oluşturulan bu TF'lerden eğriler elde edilerek birbiri ile kesiştirilir. Kesişimin en fazla kaç noktadan yapılacağı da tasarımcı tarafından belirlenen diğer bir parametredir. Belirlenen kesişim noktası sayısı kadar noktadan fonksiyon eğrileri ağ tarafından kesiştirilir ve bu kesişim Genelleştirilmiş Çapraz Budama (GÇB) prensibi ile budanarak seriden tek bir eğri elde edilir. Elde edilen eğri

Tahmin Fonksiyonu (PF) olarak adlandırılır ve MARS modeli bu fonksiyonu kullanarak tahmin işlemini gerçekleştirir. Çalışmada maxTF, ceza değeri ve kesişim değeri deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Sırasıyla maxTF, ceza değeri ve kesişim değeri, 35, 1 ve 1 olarak belirlenmiştir.

### 2.2.4 Destek vektör makineleri (SVM)

Destek Vektör Makineleri (SVM) Cortes ve Vapnik (1995) tarafından geliştirilen regresyon tabanlı bir modeldir [22]. SVM makine öğrenmesi gerçekleştiren bir model olduğundan sınıflandırma ve tahminleme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Model temel olarak iki farklı veri grubu arasında optimum ayırım sınırlarını veya hiper düzlemlerini belirlemektedir. Hidrolojik zaman serileri gibi doğrusal olmayan zaman serilerinde ayırım için doğrusal bir hiper düzlem çizmenin mümkün olmayacağı durumlarda SVM kernel çekirdek kullanılmaktadır. Kernel çekirdek yöntemi doğrusal olmayan verilerdeki makine öğrenmesini önemli bir şekilde arttırmaktadır [23]. SVM modeli eşitlikleri, Vapnik teorisinin bir parçası olarak ifade edilebilmektedir. SVM modeli çözüm eşitliği Eşitlik (1)'de görülmektedir.

Burada, N veri sayısı, X<sub>k</sub> girdi parametreleri, T<sub>k</sub> hedef değerleri, w ağırlık değerlerini, b sabit değeri, C düzenleme

sabitini,  $\varepsilon$  fonksiyon hata toleransını ve  $\xi$  ise esneklik sabitlerini ifade etmektedir [24].

$$\text{Minimum } \frac{1}{2} \|W\|^2 + C \sum_{k=0}^N (\varepsilon + \varepsilon^*)$$

Sınır durumlar; (1)

$$\begin{aligned} T_k - \langle w_i, X_k \rangle - b &\leq \varepsilon_k - \xi \\ \langle w_i, X_k \rangle + b - T_k &\leq \varepsilon_k + \xi^* \\ \varepsilon_k, \varepsilon_k^* &\geq 0, k = 1, \dots, N \end{aligned}$$

Ağda çalışacak bu çekirdek fonksiyonunun seçilmesi ağın performansını etkileyen önemli bir parametredir. Çalışmada çekirdek fonksiyonu olarak, literatürde başarılı sonuçlar ürettiği görülen Radyal Tabanlı Fonksiyon (RTF) olarak seçilmiştir [25]. Ayrıca RTF hidrolojik örüntülerin modellenmesi ve tahmin edilmesi için kullanımı önerilmiştir [26]. Kernel fonksiyonu olarak kullanılan RTF Eşitlik (2)'de görülmektedir.

$$k(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Burada,  $x$  destek vektörü,  $k(x, x_i)$  çekirdek fonksiyonu,  $\sigma$  RTF sabitini ifade etmektedir [24]. SVM modellemesinde çekirdek fonksiyonu olarak RTF seçildiğinde eğitim işlemleri için tasarımcı tarafından belirlenmesi gereken temel parametreler mevcuttur.  $C$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  olan bu parametreler ağın eğitim aşamasında katsayıların optimizasyonu konusunda önemli parametrelerdir. Ağın optimum ağırlık değerleri kazanması ağın üreteceği çıktı performansını doğrudan etkilemektedir [27]. Çalışmada  $C$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  değerleri deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiş olup, en yüksek performansa erişilen değerler sunulmuştur.

### 2.2.5 Veri setlerinin ve girdi kombinasyonlarının hazırlanması

Çalışmada gelecek akış tahmini yapmak üzere oluşturulan yağış-akış modelinde girdi verileri günlük ortalama akış ve günlük toplam yağış olarak seçilmiştir. Kullanılan akış verileri D22A090 numaralı AGİ'den alınmıştır. Analiz bölgesi olan AGİ konumundaki yağış verileri, analiz bölgesindeki AGİ'de direkt yağış ölçümü yapılmadığından, havza genelindeki Meteoroloji İstasyonları (Mİ) kullanılarak oluşturulan Thiessen Çokgenlerine uygun biçimde elde edilmiştir. Havzada kullanılan Mİ'ler ve Thiessen Çokgenleri Şekil 2'de görülmektedir. Çizilen Thiessen Çokgenlerine göre; 17034 numaralı Giresun istasyonu, Doğu Karadeniz Havzası'nda seçilen Mİ'lerden, analiz bölgesini etkin olan tek istasyon olarak belirlenmiş olup, günlük toplam yağış verileri 17034 numaralı Mİ'den alınmıştır. En uzun süre kesintisiz veri setinin sağlanması amacıyla AGİ verilerinin aralığı olan 1996-2004 yılları aralığı seçilmiştir. Veri seti %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test grubu olarak ayrılmıştır. YAM çıktısı olan gelecek akış tahmin etmek üzere hazırlanan girdi setleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Burada Q günlük ortalama akışı, P günlük toplam yağış ve t gün cinsinden zamanı ifade

etmektedir. Tahmin yapılacak gün t olarak, daha önceki günler (t-1, t-2, ..., t-n) olarak gösterilmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

Gelecek akışı tahmin etmek üzere Aksu Deresi üzerinde bulunan D22A090 numaralı AGİ konumunda yapılan optimum YAM araştırmasında kullanılan ANFIS, YSA, MARS ve SVM yöntemlerinde 8 adet girdi kombinasyonu denenmiştir. Modellerin tümünde veri sayısına bağlı olarak korelasyon katsayısı için yapılan değerlendirmede tüm modellerin hedeflenen verilere yüksek korelasyonda yakınsayan tahmin verileri ürettiği gözlemlenmiştir.

ANFIS yöntemi ile geliştirilen YAM performans verileri girdi modellerine göre Tablo 3'te görülmektedir. ANFIS-YAM modelinde denenilen farklı ÜF'ler arasından, kullanılan verilere en uygun olan fonksiyonun üçgen tip olduğu görülmektedir. Üçgen tip ÜF kullanılarak bulanıklaştırılan verilerin tüm girdi modellerinde diğer ÜF tiplerine göre daha yüksek performans elde ettiği belirlenmiştir. ANFIS-YAM'da girdi modellerine göre yapılan değerlendirmede, girdi modelindeki parametre sayısının artışı model performansını olumsuz etkilemiştir. Girdi modelindeki parametrelerin ANFIS yönteminde bulanık kural tabanındaki kural sayısındaki artışa neden olması bu durumun esas kaynağı olarak belirlenebilir. ANFIS-YAM'da en yüksek performans değerine ulaşan üçgen tip ÜF sayısının girdi modelleri için artırılması da kural sayısını arttırdığından ANFIS yöntemi ile oluşturulan YAM için optimum çözüm 2 ÜF kullanılan ve geçmiş akış verilerinden gelecek akışı tahmin eden ANFIS-YAM-M2-2Ü olduğu görülmektedir.

YSA yöntemi ile oluşturulan YAM için optimum çözüm araştırması için gizli katmanda farklı sayılarda nöron denenmiş olup nöron sayısına bağlı olarak performans çıktılarına değıştiği gözlenmiştir. YSA-YAM tüm girdi modellerine karşılık ürettiği tahmin çıktıları, hedef veri setine yüksek korelasyonla yakınsamaktadır. Yüksek korelasyon ile tahminleme performansı YSA-YAM'ı gelecek debinin trendleri hakkında kullanılabilir duruma getirmektedir. YSA-YAM'da girdi modellerindeki parametre artışının belirli bir düzeye kadar olan artışının ağ performansını olumlu etkilediği görülmüştür. YSA-YAM'da performansı en yüksek girdi modeli M5 olmuştur. M5 girdi modelinde akış verileri 3 güne kadar, yağış verileri ise 1 güne kadar gecikmeli olarak verilmiştir. Performansı en yüksek olan YSA-YAM-M5-6 için performans verileri Tablo 4'te görülmektedir.

MARS yönteminin kullanıldığı YAM kullanılarak yapılan gelecek akış tahminlerinde girdi parametrelerindeki artışın belirli bir düzeyden sonra sabit değer üretme eğiliminde olduğu görülmüştür. MARS modeli belirlenen maksimum sayıda TF'yi üretmek bunlar arasından en uygun PF'yi elde etmektedir. Girdi parametrelerinin PF'ye katılma durumu çalışmada tasarlanan yapıda ceza değerinin düşük veya 0 düzeyinde tutulması ile sınırlandırılmış ve bu sayede ağın bütün girdi parametrelerini PF'ye katma zorunluluğu engellenmiştir. Tablo 5'te yer alan MARS-YAM performans verileri incelendiğinde M1 girdi modelinden M5'e kadar girdi parametrelerindeki artışın PF tahmin performansını

olumlu etkilediği ancak girdi modeline M5 parametresinden farklı olarak katılan P(t-2), P(t-3), P(t-4) parametrelerinin PF'ye katılma durumunun olmadığı belirlenmiştir. Bu durumda M5, M6, M7 ve M8 girdi modelleri için MARS-YAM tarafından seçilen PF'de M5 ile aynı girdi parametreleri etkin olduğundan aynı performans değeri elde edilmiştir. Ceza değerinin artırılarak PF'ye tüm girdi parametrelerinin katılması durumunda MARS-YAM'ın doğru tahmin üretme düzeyinin düşeceği görülmüştür. MARS-YAM M5, M6, M7 ve M8 girdi parametrelerinden oluşturulan TF ile PF'ye katılma düzeyi Tablo 6'da görülmektedir. Tablo 6'ya göre yapılan değerlendirmede Q(t) değerlerinin tahmin edilmesi için oluşturulan PF'de en etkin parametrenin P(t) olduğu görülmüştür. Q(t-3), P(t-2), P(t-3) ve P(t-4)'ün PF'ye katılmadığı, P(t-1)'in ise önem düzeyinin düşük olduğu görülmektedir.

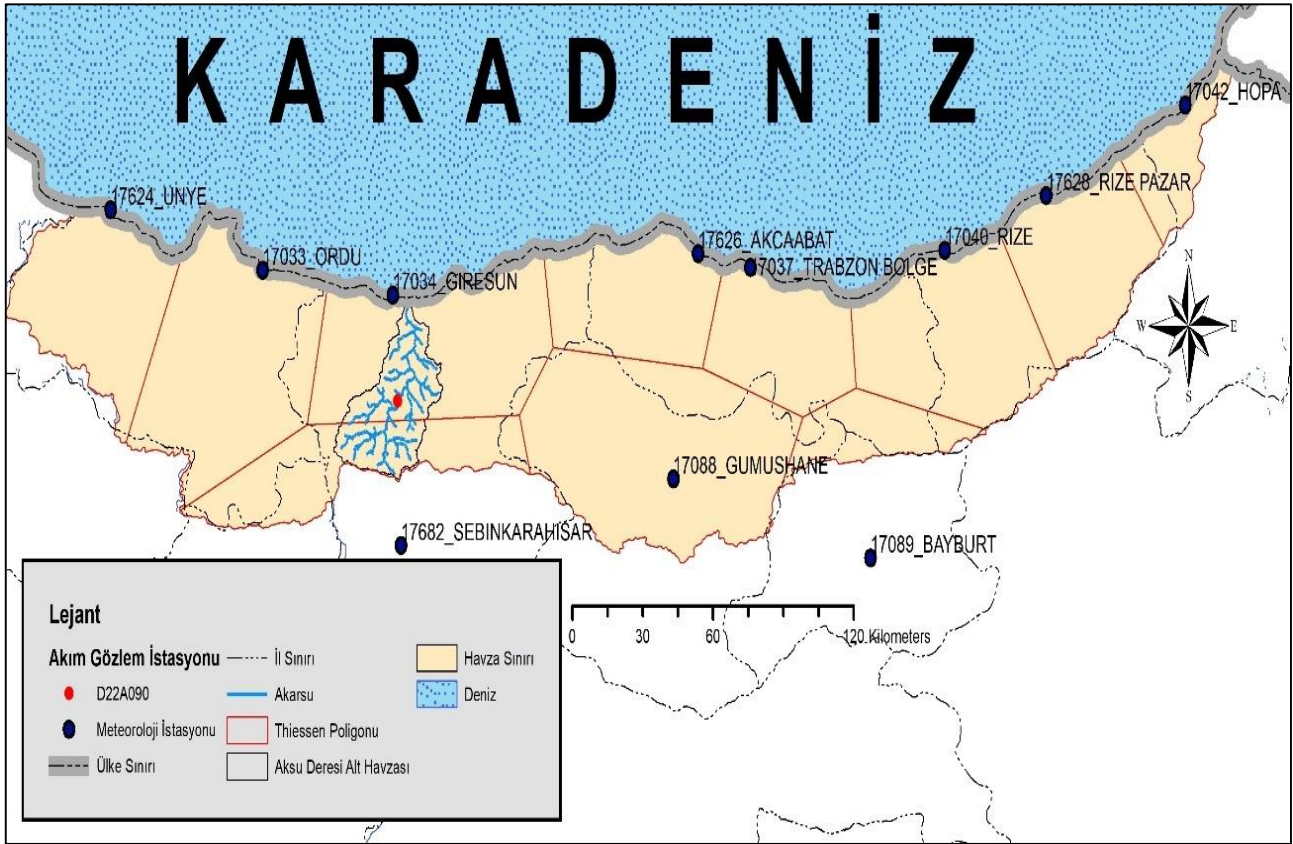
SVM yöntemi ile geliştirilen YAM'da çekirdek fonksiyonu olarak RTF seçilmiştir. RTF parametreleri olan C,  $\epsilon$  ve  $\gamma$  her girdi modeli için deneme-yanılma yöntemiyle geniş bir aralıkta denenmiştir. Eğitim aşamasında girdi modellerinde elde edilen en yüksek performans değerine göre tahminleme yapılmıştır. SVM-YAM'da eğitim aşamasında modellere göre en yüksek performans değerine ulaşan RTF parametre değerleri ile girdi modellerine göre elde edilen en yüksek performans verileri Tablo 7'de verilmiştir. SVM-YAM'da girdi modelindeki parametre sayısında yaşanan artışın ağırlık tahminleme performansını olumlu etkilediği görülmüştür. M8 modelinde akış verileri 3 güne, yağış verileri ise 4 güne

kadar geciktirilmiş düzeyde ayrı parametreler halinde ağ girdi olarak tanımlanmıştır. SVM-YAM-M8 modeli SVM yöntemiyle geliştirilen YAM'lar içerisinde en yüksek performans değerine ulaşan model olmuştur.

#### 4 Sonuçlar

Aksu Deresi üzerinde 4 farklı yöntem kullanılarak YAM geliştirilmiştir. Geliştirilen tüm modellerin performans verileri, uzun yıllar kesintisiz olan veri setini tahmin etme konusunda başarılı olmuştur. Literatürde hidrolojik parametrelerin tahmin edilmesi konusunda sıklıkla kullanılan AI yöntemleri, daha az kullanım alanı bulan sezgisel regresyon modeli MARS ve diğer bir regresyon tabanlı model olan SVM ile YAM oluşturma performansı kıyaslanmıştır.

Literatürde yaygın kullanım alanı bulan AI yöntemleri ile oluşturulan YAM'lar donanım bağımlılığı yüksek modellerdir ancak daha az girdi parametresi ile korelasyonu yüksek tahminleme yapabilmektedir. AI modellerinin arkaplanda çok fazla denklem çalıştırması ve kolay açıklanabilir olmaması bu modellerin esneklik düzeyini azaltmaktadır. HR yöntemi MARS ve regresyon tabanlı olan SVM ile geliştirilen YAM'lar daha fazla girdi parametresi kullanarak daha yüksek performans verileri elde etmiştir. Bu modellerin AI yöntemlerine göre daha az donanım bağımlı olması ve kolay açıklanabilir olması yöntemlerin esnekliğini arttırmaktadır.



Şekil 2. Doğu Karadeniz Havzası Thiessen Poligonu çalışması

**Tablo 3.** ANFIS-YAM performans verileri

Ü.F Sayısı	Ü.F.	Performans	ANFIS Girdi Kombinasyonu							
			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
2	Gen. Çan	RMSE	3.970	3.749	4.960	10.25	16.78	14.09	14.59	14.11
		R	0.922	0.931	0.888	0.754	0.578	0.641	0.644	0.647
		MAE	1.202	1.088	1.220	1.696	1.917	2.086	2.187	2.101
2	Gauss	RMSE	3.974	3.772	3.968	6.293	10.18	11.88	11.47	9.280
		R	0.922	0.930	0.922	0.838	0.674	0.651	0.693	0.744
		MAE	1.208	1.105	1.180	1.368	1.744	1.986	1.903	1.762
2	Üçgen	RMSE	3.946	<b>3.682</b>	3.707	3.690	5.669	5.764	6.915	5.758
		R	0.923	<b>0.934</b>	0.931	0.932	0.853	0.849	0.801	0.851
		MAE	1.210	<b>1.103</b>	1.147	1.172	1.442	1.564	1.727	1.738
3	Üçgen	RMSE	3.964	3.726	4.707	7.028	7.900	9.503	15.44	17.50
		R	0.922	0.931	0.901	0.845	0.822	0.723	0.621	0.580
		MAE	1.198	1.087	1.317	1.519	1.740	1.913	2.754	3.099

Koyu sembol ile yazılan değerler en yüksek performans değerinin elde edildiği modeli ifade etmektedir.

Ü.F. : Üyelik fonksiyonu

Gen. Çan: Genelleştirilmiş Çan Eğrisi

**Tablo 4.** YSA-YAM performans verileri

Nöron Sayısı	Performans	YSA Girdi Kombinasyonu							
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
3	RMSE	4.266	4.071	4.048	4.039	4.015	4.055	3.988	4.125
	R	0.922	0.930	0.930	0.930	0.931	0.930	0.933	0.927
	MAE	1.534	1.482	1.458	1.523	1.503	1.524	1.461	1.549
6	RMSE	4.186	4.136	4.204	4.176	<b>3.875</b>	3.984	4.091	4.064
	R	0.925	0.928	0.926	0.925	<b>0.936</b>	0.932	0.929	0.929
	MAE	1.564	1.691	1.588	1.538	<b>1.477</b>	1.593	1.616	1.630
9	RMSE	4.286	4.147	4.319	4.302	5.725	4.004	4.062	3.979
	R	0.922	0.927	0.923	0.920	0.886	0.932	0.930	0.932
	MAE	1.613	1.455	1.557	1.662	1.743	1.650	1.824	1.577
12	RMSE	4.247	4.146	4.090	4.412	4.649	5.932	4.759	4.094
	R	0.923	0.927	0.928	0.917	0.909	0.858	0.905	0.928
	MAE	1.623	1.684	1.558	1.719	1.874	1.989	1.794	1.666
15	RMSE	5.307	4.108	4.660	4.206	4.143	4.086	4.158	4.984
	R	0.876	0.930	0.913	0.926	0.927	0.929	0.927	0.894
	MAE	1.729	1.585	1.585	1.741	1.909	1.727	1.744	1.802
18	RMSE	5.584	4.106	4.270	4.507	4.103	4.121	4.528	4.167
	R	0.884	0.930	0.924	0.912	0.929	0.927	0.912	0.926
	MAE	1.731	1.433	1.539	1.659	1.629	1.577	1.682	1.662
21	RMSE	5.490	4.167	4.175	4.126	4.035	4.321	4.305	4.524
	R	0.867	0.926	0.926	0.927	0.930	0.921	0.921	0.912
	MAE	1.795	1.856	1.760	1.486	1.624	1.666	1.662	1.817

Koyu sembol ile yazılan değerler en yüksek performans değerinin elde edildiği modeli ifade etmektedir.

**Tablo 5.** MARS-YAM performans verileri

MARS Girdi Kombinasyonu	Performans		
	RMSE	R	MAE
M1	3.845	0.926	1.229
M2	3.382	0.943	1.280
M3	3.382	0.943	1.280
M4	3.172	0.950	1.311
<b>M5</b>	<b>3.101</b>	<b>0.952</b>	<b>1.302</b>
M6	3.101	0.952	1.302
M7	3.101	0.952	1.302
M8	3.101	0.952	1.302

Koyu semboller performansı en yüksek modeli göstermektedir.

**Tablo 6.** MARS-YAM M5, M6, M7 ve M8 girdi parametrelerinin PF'ye katılma durumu

Girdi Kombinasyonu	Parametrelerin PF'ye Katılma Sayısı							
	Q <sub>(t-1)</sub>	Q <sub>(t-2)</sub>	Q <sub>(t-3)</sub>	P <sub>(t)</sub>	P <sub>(t-1)</sub>	P <sub>(t-2)</sub>	P <sub>(t-3)</sub>	P <sub>(t-4)</sub>
<b>M5</b>	5	3	0	6	1	x	x	x
<b>M6</b>	5	3	0	6	1	0	x	x
<b>M7</b>	5	3	0	6	1	0	0	x
<b>M8</b>	5	3	0	6	1	0	0	0

x: Parametre bu modelde bulunmuyor

**Tablo 7.** SVM-YAM performans verileri

Model Parametreleri (C, ε, γ)	SVM-RBF Kombinasyonu	Girdi	RMSE	Performans	
				R	MAE
(5, 0.001, 0.500)	M1		3.958	0.922	1.095
(10, 0.0001, 0.125)	M2		3.730	0.932	0.987
(10, 0.001, 0.330)	M3		3.639	0.934	0.977
(10, 0.001, 0.250)	M4		4.041	0.936	2.460
(10, 0.001, 0.125)	M5		3.641	0.934	0.967
(10, 0.001, 0.167)	M6		3.627	0.935	0.963
(5, 0.001, 0.200)	M7		3.618	0.935	0.959
(10, 0.001, 0.125)	<b>M8</b>		<b>3.616</b>	<b>0.935</b>	<b>0.956</b>

Koyu semboller performansı en yüksek modeli göstermektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgulara göre AI, HR ve regresyon tabanlı yöntemler ile geliştirilen YAM'ların tamamı yüksek performans verileri elde ederek tahminleme yapmıştır, bu durum geliştirilen YAM'ların bölgede gelecek taşkınlar hakkında fikir verebilecek günlük ortalama debi tahmini yapmak ve tahmin edilecek gelecek debi verilerinin altyapı tesislerini boyutlandırmak için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Literatürde bölgede geçmiş yıllarda gerçekleştirilen çok fazla YAM çalışması bulunmamakla birlikte, yapılan çalışma [8] incelendiğinde, YSA ile geliştirilen modellerin performans verilerinin, bu çalışma bulgularına paralel olarak MARS ile geliştirilen modele kıyasla daha düşük performans değerine ulaştığı görülmüştür. Bu nedenle bölgede yağış-akış arasındaki ilişkinin sezgisel regresyon teknikleri ile daha iyi açıklanabildiği sonucuna ulaşabilmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular kullanılarak D22A090 numaralı AGİ'nin en yakın memba ve mansabındaki AGİ konumlarında, benzer sayısal yöntemler kullanılarak, yağış-akış analizlerin yapılması, çalışmada geliştirilen modellerin bölge için kalibrasyonunu sağlayacaktır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %8

#### Kaynaklar

[1] D. Hughes, P. Greenwood, G. Coulson and G. Blair, Gridstix: Supporting flood prediction using embedded hardware and next generation grid middleware. International Symposium on a World of Wireless,

Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM'06), pp. 6-12, New York, 2006.

- [2] A. S. Tokar and P. A. Johnson, Rainfall-runoff modeling using artificial neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4, 232-239, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:3\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:3(232)).
- [3] G. Blöschl, M. F. Bierkens, A. Chambel, C. Cudennec, G. Destouni, A. Fiori and M. Renner. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64(10), 1141-1158, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>.
- [4] P. K. T. Mishra and S. Karmakar, Performance of optimum neural network in rainfall-runoff modeling over a river basin. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1289-1302, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1726-7>.
- [5] M. Peel and T. A. McMahon, Historical development of rainfall-runoff modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(5), 1471-1486, 2020. <https://doi.org/10.1002/wat2.1471>.
- [6] J. Sitterson, C. Knightes, R. Parmar, K. Wolfe and M. Muiche, An overview of rainfall-runoff model types. 9th International Congress on Environmental Modelling and Software, pp. 41-50, Colorado, USA, 24-28 Jun 2018.
- [7] M. Ashrafi, L. H. Chua and C. Quek, The applicability of Generic Self-Evolving Takagi-Sugeno-Kang neuro-fuzzy model in modeling rainfall-runoff and river

- routing. *Hydrology Research*, 50(4), 991-1001, 2019. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.146>.
- [8] Ö. Yüksek, H. T. Babacan ve F. Saka, Yağış-akış modellemesinde optimum yapay sinir ağı yapısının araştırılması. *Türk Hidrolik Dergisi*, 2(1), 31-37, 2018.
- [9] R. M. Adnan, A. Petroselli, S. Heddami, C. A. Santos and O. Kisi, Comparison of different methodologies for rainfall-runoff modeling: machine learning vs conceptual approach. *Natural Hazards*, 105(3), 2987-3011, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04438-2>.
- [10] M. Jahandideh-Tehrani, G. Jenkins and F. A. Helfer, Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for daily rainfall-runoff modelling: a case study for Southeast Queensland, Australia. *Optimization and Engineering*, 22(1), 29-50, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09538-3>.
- [11] A. Talei, L. H. C. Chua and T. S., Wong, Evaluation of rainfall and discharge inputs used by Adaptive Network-based Fuzzy Inference Systems (ANFIS) in rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 391(3-4), 248-262, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.023>.
- [12] M. Kwon, H. H. Kwon and D. A. Han, hybrid approach combining conceptual hydrological models, support vector machines and remote sensing data for rainfall-runoff modeling. *Remote Sensing*, 12(11), 1801-1822, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12111801>.
- [13] J. Adamowski, H. F. Chan, S. O. Prasher and V. N. Sharda, Comparison of multivariate adaptive regression splines with coupled wavelet transform artificial neural networks for runoff forecasting in Himalayan micro-watersheds with limited data. *Journal of Hydroinformatics*, 14(3), 731-744, 2012. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.044>.
- [14] DSİ 2020 yılı resmi su kaynakları istatistikleri, <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1499> Erişim: 13.02.2022
- [15] P. Hosseinzadeh Talaei, Multilayer perceptron with different training algorithms for streamflow forecasting. *Neural Computing and Applications*, 24(3), 695-703, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1287-5>.
- [16] W. Wang, P. H. Van Gelder, J. Vrijling and J. Ma, Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 383-399, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.032>.
- [17] H. T. Babacan, İklim değişikliğinin akarsu akışları üzerindeki etkisinin araştırılması: Doğu Karadeniz Havzası Örneği, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [18] J. S. Jang, ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 23(3), pp. 665-685, 1993. <https://doi.org/10.1109/21.256541>.
- [19] N. N. Ozyurt and E. A. Sezer, Daily streamflow prediction by ANFIS modeling: Application to lower zamanti karst basin, Turkey. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 23(6), 305-311, 2012.
- [20] M. Kabir and M. M. J. Kabir, "Fuzzy membership function design: An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) based approach, 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), pp. 1-5, Narashino, Japan, 27-29 Jan 2021. <https://doi.org/10.1109/ICCCI50826.2021.9402633>.
- [21] J. H. Friedman, Multivariate adaptive regression splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1-67, 1991. <https://doi.org/10.1214/aos/1176347963>.
- [22] C. Cortes and V. Vapnik, Support-vector networks, *Machine Learning*, 20(3), 273-297, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>.
- [23] H. Arslan, F. Üneş, M. Demirci, B. Taşar, ve A. Yılmaz, Keban baraj gölü seviye değişiminin ANFIS ve destek vektör makineleri ile tahmini. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 71-77, 2020. <https://doi.org/10.47495/okufbed.748018>.
- [24] S. K. Himanshu, A. Pandey and B. Yadav, Assessing the applicability of TMPA-3B42V7 precipitation dataset in wavelet-support vector machine approach for suspended sediment load prediction. *Journal of Hydrology*, 550, 103-117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.051>.
- [25] S. Ayhan ve Ş. Erdoğan, Destek vektör makineleriyle sınıflandırma problemlerinin çözümü için çekirdek fonksiyonu seçimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 9(1), 175-201, 2014.
- [26] M. A. Ghorbani, R. Khatibi, A. Goel, M. H. FazeliFard and A. Azani, Modeling river discharge time series using support vector machine and artificial neural networks. *Environmental Earth Sciences*, 75(8), 1-13, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5435-6>.
- [27] A. Lal and B. Datta, Development and implementation of support vector machine regression surrogate models for predicting groundwater pumping-induced saltwater intrusion into coastal aquifers. *Water Resources Management*, 32(7), 2405-2419, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1936-2>.







# The effect of different viscosity modifying additives on the mechanical and flow properties of self-compacting mortars

## Farklı viskozite düzenleyici katkı maddelerinin kendiliğinden yerleşen harçların mekanik ve akış özelliklerine etkisi

Furkan Türk<sup>1,\*</sup> , Murat Saydan<sup>2</sup> , Ülkü Sultan Keskin<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup>Konya Technical University, Civil Engineering Department, 42250, Konya, Turkey

<sup>1</sup>Yalova University, Civil Engineering Department, 77200, Yalova, Turkey

### Abstract

Some requirements are needed in the rheology design of special concretes such as self-compacting concrete, underwater concrete, shotcrete. For example, in the design of the desired concrete flow, some viscosity modifying agents (VMA) are used with various plasticizer additives. However, studies are needed to determine which of these additives used to design flow parameters is more appropriate. Herein, the mechanical and rheological effects of two commercially used VMAs on self-compacting mortars were investigated. For this purpose, compressive-flexural strength tests and mini-slump, mini-V funnel tests were conducted to determine the effects of welan gum (WG), and xanthan gum (XG) included in the mixtures at various ratios (0.01-0.1%) by weight of cement. The study supported by FE-SEM analysis concluded that WS had a positive effect on mechanical behavior, while XG had a negative effect, but XG was more effective on flow properties than WG.

**Keywords:** Welan gum, Xanthan gum, Self-compacting mortar, Viscosity modifying agent

### 1 Introduction

In order to obtain suitable rheology that will not allow segregation in concrete mixtures, a balanced plastic viscosity is required. Additives that cause viscosity reduction (such as superplasticizer) can be used to increase fluidity in special concretes such as self-compacting concrete (SCC). However, it is necessary to take various precautions to prevent the risk of reduction in the segregation resistance of concrete with the use of these additives. It is known that fine materials such as silica fume, fly ash, metakaolin are included in the mixture to prevent segregation and increase the viscosity of the mixture [1-4]. However, while these materials provide advantages such as reducing the amount of superplasticizer and increasing workability, they reduce early strength, cause shrinkage and slow down the settling time [5]. Apart from powder materials, polymeric-based viscosity modifying additives (VMA), which are used commercially to increase concrete viscosity, can also be used

### Özet

Kendiliğinden yerleşen beton, su altı betonu, püskürtme beton gibi özel betonların reoloji tasarımında bazı gereksinimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin istenilen beton akışının tasarımında çeşitli akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile birlikte bazı viskozite düzenleyici katkıları (VDK) kullanılmaktadır. Ancak akış parametrelerini tasarlamak için kullanılan bu katkı maddelerinden hangisinin daha uygun olduğunu belirlemek için çalışmalara ihtiyaç vardır. Burada, ticari olarak kullanılan iki VDK'nın kendiliğinden yerleşen harçlar üzerindeki mekanik ve reolojik etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, karışımlara çeşitli oranlarda çimento ağırlığına göre (%0.01-0.1) katılan welan sakızı (WS) ve ksantan sakızı (KS)'nin etkilerini belirlemek için basınç-eğilme mukavemeti testleri ve mini-slump, mini-V huni testleri yapılmıştır. FE-SEM görüntüleri ile desteklenen çalışmada, WS'nin mekanik davranış üzerinde olumlu bir etkiye, KS'nin ise olumsuz bir etkiye sahip olduğu, ancak KS'nin akış özellikleri üzerinde WS'ye göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Welan sakızı, Ksatan sakızı, Kendiliğinden yerleşen harç, Viskozite düzenleyici katkı

in mixtures. VMAs are generally used to provide the desired viscous flow by increasing the washing resistance in underwater concretes and increasing the segregation resistance in SCCs [6]. Kawai (1987) grouped VMAs under three headings: a) natural polymers containing starch, natural gums and plant proteins, b) semi-synthetic polymers containing decomposed starch and its derivatives, and c) ethylene-based polymers such as polyethylene oxide and vinyl-based polymers such as polyvinyl alcohol [7].

Welan gum (WG), a fermentation product of *Alcaligenes* bacteria, is a long-chain biopolymer with sugar backbones [8]. It effectively maintains viscosity in alkaline solution with a high concentration of calcium ions even at high temperatures [9,10]. Additives with long-chain polymer molecules, such as WG and cellulose derivatives, adhere around the water molecules, absorbing and fixing some of the mixing water. Moreover, molecules in adjacent polymer chains become intertwined, developing attractive forces,

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fturk@ktun.edu.tr (F. Türk)

Geliş / Recieved: 27.12.2021 Kabul / Accepted: 22.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1048632

thus further inhibiting the movement of free water, causing the mixture to gel and the concrete to exhibit higher viscosity [11]. The molecular structure of the saccharide units of WG, which is a microbial polysaccharide that can be used as a stabilizer in concrete and mortar mixtures to prevent water leaching and segregation, is given in Figure 1 [5,12].

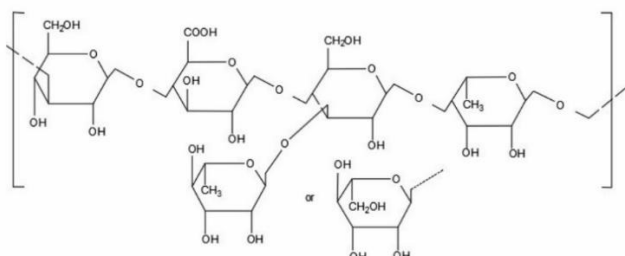


Figure 1. Molecular structure of WG [13]

Xanthan gum (XG), the fermentation product of *Xanthomonas campestris* bacteria, is a natural polysaccharide [14]. XG, which has high viscosity stability over a wide temperature and pH range, is an anionic polymer and dissolves rapidly in cold water [15]. XG, which is generally used in the food and cosmetics industry, is used as a viscosity modifying agent in soil stabilization works and SCCs in the field of building materials [16,17]. The molecular structure of XG, which shows a decrease in viscosity with the increase of shear stress in its solutions, is shown in Figure 2 [15,18,19].

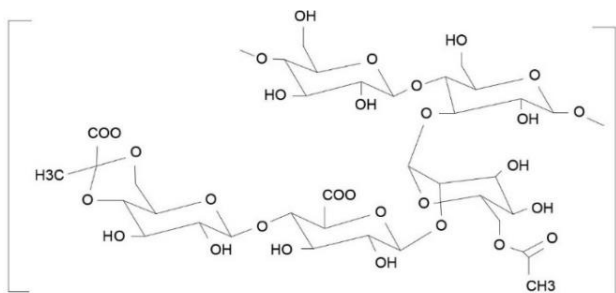


Figure 2. Molecular structure of Xanthan gum [15]

This study investigated the rheological and mechanical effects of two different additives in the same classification, currently used as VMA, on self-compacting mortars. For this purpose, the mini-slump flow diameters, flow time of fresh SCM mixtures with additives at various rates were compared by determining the compressive and flexural strengths of the 28-day hardened specimens.

## 2 Materials and experimental program

### 2.1 Mortar constituents

CEN standard sand with a specific gravity of 2.58 g/cm<sup>3</sup> and a water absorption rate of 0.3% and PC 42.5N Portland cement were used to prepare SCM mixes. The chemical composition of cement used is presented in Table 1. Sika Viscocrete PC-15 superplasticizer was used to provide fluidity. In addition, WG and XG were used as VMA in mortars

Table 1. Chemical composition of the cement

Component	Quantity (%)
SiO <sub>2</sub>	18.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.27
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.59
CaO	62.67
MgO	1.06
SO <sub>3</sub>	3.42
K <sub>2</sub> O	0.75
Na <sub>2</sub> O	0.29
C <sub>3</sub> S	42
C <sub>2</sub> S	40
C <sub>4</sub> AF	11

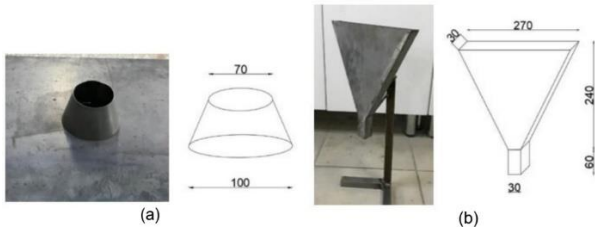
For the gum particles used for VMA to perform well, uniformly dispersed solutions must be obtained [15]. In order to obtain a uniform distribution in the solution and to ensure standardization, the additives weighed in the amount to be used mixed with the mixing water for 5 minutes in the ultrasonic sonicator given in Figure 3.



Figure 3. Ultrasonic sonicator

### 2.2 Preparation of mixtures and experimental program

Within the scope of the study, SCMs containing different ratios of XG and WG were produced. Due to the high risk of segregation in SCC-SCM mixtures, SCMs were produced at a dosage of 600 kg/m<sup>3</sup>, with a water/binder ratio of 0.4, considering the need to keep the binder amount of the designed mixture high [20-22]. EFNARC (2005) [23] recommends the mini-slump and mini-V funnel tests that can be used in laboratory-based mixes to evaluate the mortar components of the SCC. The results of the mini-slump test recommended to decide whether the prepared mixture is SCM or not are 24-26 cm mini-slump flow and 7-11 seconds flow time for the mini-V funnel test. Therefore, to measure the mini-slump flow values of SCMs, a 60 mm high mini-slump test apparatus with 100 mm opening at the bottom and 70 mm opening at the top was used (Figure 4a), and to measure the flow time of the mortars, a 240 mm high, 270 mm wide and 30x30x60 mm narrowing section mini-V funnel was used (Figure 4b).



**Figure 4.** Mini-slump (a), mini-V funnel (b), dimensions are in mm.

The ratios that can be produced without additives at a dosage of 600 kg/m<sup>3</sup> (providing 24-26 cm mini-slump flow and providing 7-11 seconds flow time) have been determined as the optimum mixing ratios. VMAs (XG and WG) in the range of 0.01% and 0.1% by weight of cement were added to these mixing ratios. In order to determine the fluidity properties of the produced mortars, mini-slump and mini-V funnel tests were carried out. After the fresh state experiments, the mixtures were taken into molds of 40x40x160 mm and subjected to flexural and compressive strength tests according to EN 196-1 [24] to determine the mechanical behavior. The prepared mixtures are presented in Table 2.

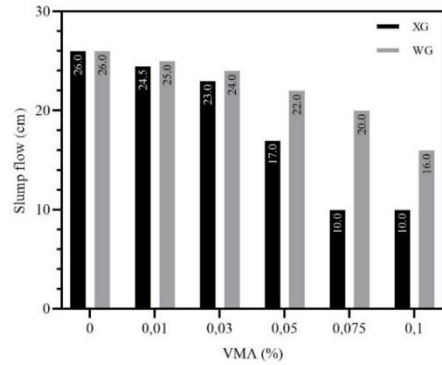
### 3 Result and discussion

#### 3.1 Mini-slump flow diameter and flow time

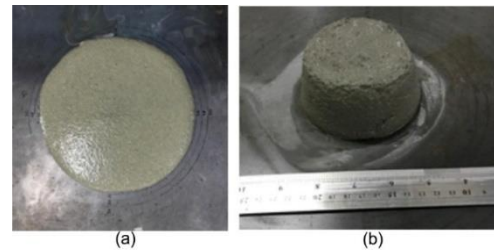
The mini-slump flow diameter of fresh mortars with WG and XG additives measured by the mini-slump test is shown in Figure 5. When the results of the mini-slump flow test were examined, the control mixture (without additives) showed a mini-slump flow diameter of 26 cm (Figure 6a) and was located within the limits of EFNARC (2005), while the mixture containing 0.05% WG additive by cement weight out of the conditions of being SCM with 22 cm mini-slump flow diameter. After 0.05%, the mini-slump flow diameter continued to decrease due to the increase in the amount of additive and 16 cm mini-slump flow diameter at the maximum usage rate of 0.1%. In the case of using 0.03% XG in the mixture, the mortar spread 23 cm and could not meet the condition of being SCM. Moreover, in the case of using 0.075% and 0.1% XG, the viscosity of the mixture increased so much that [25] did not show any mini-slump flow values, unlike WG. (Figure 6b). Viscosity increase occurs since long-chain polymers such as cellulose derivatives retain the mixing water, and the molecules in the polymer chains are intertwined [11]. WG and XG included in SCM mixtures also showed this behavior.

The flow time of fresh mortars with WG and XG additives measured by the mini-V test is shown in Figure 7. When the flow times of the mixtures measured with the mini V funnel were evaluated, the WG additive increased the flow time between 8% and 193% compared to the reference mixture. In the case of using 0.05% WG additive in the mixture, the mixture has shown a flow time of 12.2 seconds and has been out of the condition of being SCM. When XG additive was used in the mixture at the rate of 0.05% by weight of the cement, it was out of the condition of being SCM. However, after this ratio was exceeded, the flow time

in the mixtures was found minutes, and measurement could not be taken. As can be clearly seen from the graph given in Figure 7, the XG additive has caused a very high viscosity increase compared to the WG additive.

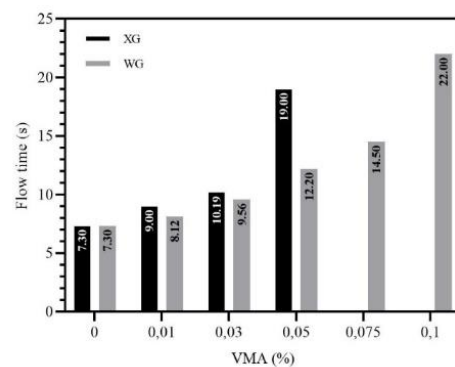


**Figure 5.** The slump flow of SCMs



**Figure 6.** Control mix spread (a), XG0075 mix spread (b)

Considering all the results, it can be said that XG shows high efficacy even at much lower rates than WG.



**Figure 7.** The flow time of SCMs

#### 3.2 Compressive and flexural strength

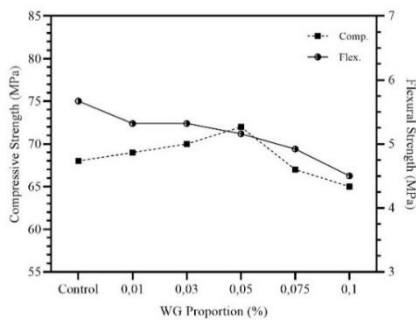
The results of flexural and compressive strength tests carried out on hardened specimens results are given in Figure 8 and Figure 9. When the compressive strength results of the WG added specimens were examined, it was determined that there was a stable increase until the use of 0.05% additive. WG additive at the rate of 0.05% increased the compressive strength by approximately 6% compared to the reference specimen. It is known that there is an increase in compressive strength with the decrease of micro-voids (porosity) in concrete [26].

**Table 2.** SCM mixing proportions

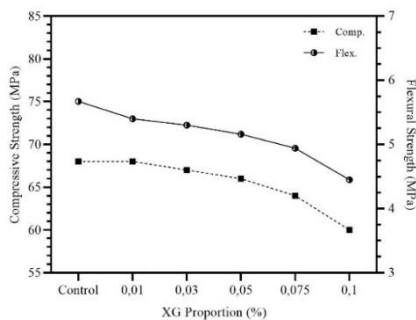
Mix.	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Cen sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	VMA* (%)
Reference	600	1437	240	60	-
XG001	600	1437	240	60	0.01
XG003	600	1437	240	60	0.03
XG005	600	1437	240	60	0.05
XG0075	600	1437	240	60	0.075
XG01	600	1437	240	60	0.1
WG001	600	1437	240	60	0.01
WG003	600	1437	240	60	0.03
WG005	600	1437	240	60	0.05
WG0075	600	1437	240	60	0.075
WG01	600	1437	240	60	0.1

\* by weight of cement

Zhang et al. (2018) [27] reported that the porosity decreased and the compressive strength increased in the case of using up to 0.05% WG additives in the mixtures. The results found in this study also confirm this literature knowledge. However, when the WG additive was used at the maximum rate (0.1%) selected for this study, it was determined that the compressive strength decreased by approximately 4% compared to the reference specimen. The WG, which is used at high rates (>0.05%), is located on the C-S-H structures and causes a decrease in strength by increasing the porosity of the mixture [27]. Moreover, Isik and Ozkul (2014) [28] used three different VMAs in SCC mixtures and found that VMAs had no significant effect on strength up to 0.02% usage rate.



**Figure 8.** The results of flexural and compressive strength tests of WG added mortars



**Figure 9.** The results of flexural and compressive strength tests of XG added mortars

FE-SEM and EDX analyzes of WG added cement pastes are given in Figure 10. In these analyzes, it is seen that the amount of carbon in the electron pulses (spectrum 1) thrown on structures similar to wheat grains is relatively high. Typically, carbon is not expected in hydration products. Therefore, these structures are estimated to be WG. In the images, it is seen that the gum particles become a ball, surrounded by an ettringite-like reticulate structure, which is a kind of hydration product. In the light of these images, it is understood that the use of additives in low proportions creates a filling effect and causes an increase in compressive strength; however, it causes a decrease in strength since it can replace hydration products at high rates.

On the other hand, according to the flexural strength results, the WG additive caused the flexural strength of the mortars to decrease between 6% and 20%. A loss of flexural strength of about 9% was observed in the specimen, where the increase in compressive strength was maximum (6%). It is debatable whether a 9% loss of flexural strength versus a 6% gain in compressive strength is advantageous or not.

When the strengths of the XG added specimens are examined, it is clearly seen that the XG additive reduces both the compressive strength and the flexural strength of the mortars. Up to 12% decreases in compressive strength and up to 20% decreases in flexural strength were observed up to the highest usage rate.

The effect of VMAs on compressive strengths is examined; another essential issue is the adsorption of polysaccharides by cement particles. Bessais-Bey et al. [29] that microbial polysaccharides such as WG can be adsorbed by cement. As a result of absorption, it is clear that the dissolution rate of cement and the kinetics of hydration can change. This situation explains the decrease in strength at increasing VMA ratios. Both this study and Zhang et al.'s (2018) [27] study demonstrated that WG's use of up to 0.05% of the binder weight could increase the compressive strength with the filling effect. Up to 0.05%, the filling effect created by WG can be responsible for the increase in compressive strength, and the effect of WG on the hydration kinetics can be responsible for the decrease in flexural strength.

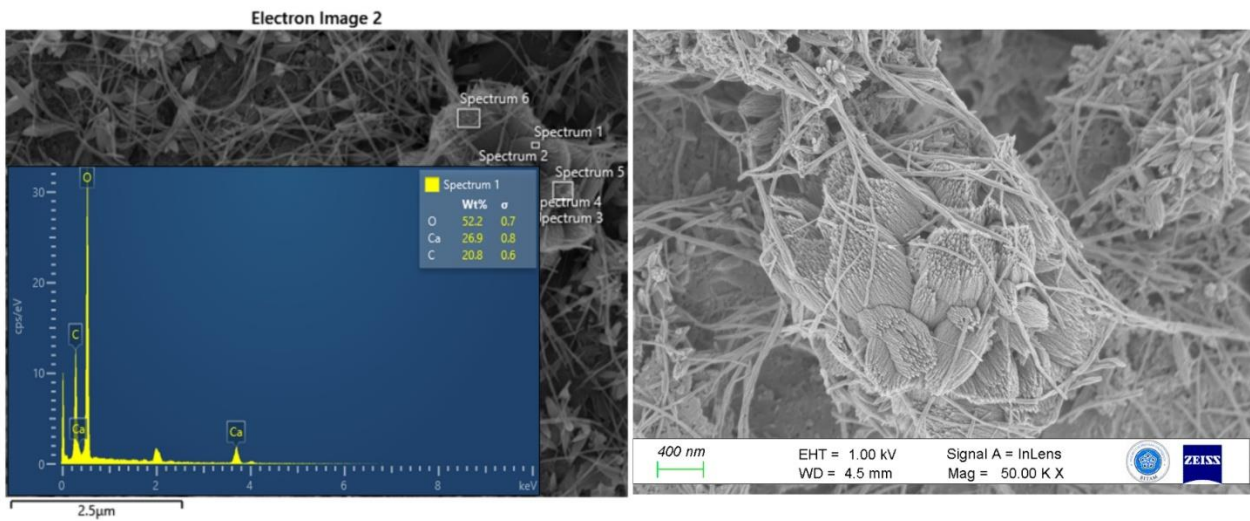


Figure 10. FE-SEM images of WG added cement paste

However, after 0.05%, the tendency of WG, which is a polysaccharide, to reduce the hydration of cement and its replacement by hydration products became more dominant, causing a decrease in both compressive strength and flexural strength.

When the two additives are compared, it is understood that WG is more advantageous in terms of mechanical behavior than XG. However, it was determined that the XG additive was more effective than the WG additive in the fresh state experiments of the mortars. Therefore, where the strength loss is not very important, it is concluded that sufficient fresh behavior could be obtained by using fewer XG amounts than WG.

#### 4 Conclusions

The following conclusions were reached in this study which includes the mechanical and rheological comparison of two different VMA types that can be included in the mixtures for purposes such as increasing the segregation resistance, improving the washing resistance, and increasing the sag resistance in special types of concrete;

- It was concluded that XG was more effective than WG at the same rates in terms of fresh state behavior activity.
- While WG caused an increase in compressive strength up to 0.05% in terms of mechanical behavior, it caused a decrease after this rate. According to the FE-SEM images, it was understood that WG caused an increase in strength by making a filling effect at low rates, and it could replace hydration products at high rates.
- XG reduced the compressive strength in all ratios.
- Both types of additives negatively affect flexural strength.
- It was concluded that in cases where such additives must be used, care should be taken, and the effects of strength should be investigated after the mixture design is made.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (Turnitin): %15

#### References

- [1] M. Jalal, M. Fathi, and M. Farzad, Effects of fly ash and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. *Mechanics of Materials*, 61, 11–27, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010>
- [2] M. Benaicha, X. Roguiez, O. Jalbaud, Y. Burtschell, and A. H. Alaoui, Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, 103–110, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.061>
- [3] E. Güneçyisi, M. Gesoglu, A. Al-Goody, and S. İpek, Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 95, 29–44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.142>
- [4] L. O. Larsen and V. V. Naruts, Self-compacting concrete with limestone powder for transport infrastructure. *Magazine of Civil Engineering*, 8, 2016. <https://doi.org/10.5862/MCE.68.8>
- [5] M. Sonebi, Rheological properties of grouts with viscosity modifying agents as diutan gum and welan gum incorporating pulverised fly ash. *Cement and Concrete Research*, 36, 1609–1618, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.016>
- [6] O. A. Hisseine, A. F. Omran, and A. Tagnit-Hamou, Influence of cellulose filaments on cement paste and concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 30, 4018109, 2018.
- [7] T. Kawai, Non-dispersible underwater concrete using polymers. *Marine Concrete*, 6, 1987.
- [8] F. L. Allen, G. H. Best, and T. A. Lindroth, Welan gum in cement compositions. US5004506A, 1990.

- [9] N. Sakata, S. Yanai, M. Yoshizaki, A. Phyfferoen, and H. Monty, Evaluation of S-657 Biopolymer as a new viscosity-modifying admixture for self-compacting concrete, Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 229-236, Tokyo, Japan, 2001.
- [10] A. Phyfferoen, H. Monty, B. Skaggs, N. Sakata, S. Yanai, and M. Yoshizaki, Evaluation of the biopolymer, diutan gum, for use in self-compacting concrete, First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 141-146, 2002.
- [11] T. Izumi, Special Underwater Concrete Admixtures. Concrete Engineering, 28, 23, 1990.
- [12] F. M. León-Martínez, P. F. de J. Cano-Barrita, L. Lagunez-Rivera, and L. Medina-Torres, Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. Construction and Building Materials, 53, 190–202, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.068>
- [13] J. Plank, Applications of biopolymers in construction engineering. Biopolymers Online: Biology• Chemistry• Biotechnology• Applications, 10, 2005. <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpola002>
- [14] V. T. Phan, Evaluation of Some Rheological Properties of Xanthan Gum. Eng. Engineering, Technology & Applied Science Research, 10, 6172–6175, 2020. <https://doi.org/10.48084/etasr.3696>
- [15] G. Sworn, Xanthan gum. Woodhead Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820104-6.00004-8>
- [16] S. Lee, M. Chung, H. M. Park, K.-I. Song, and I. Chang, Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. Journal of Materials in Civil Engineering, 31, 6019012, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909)
- [17] B. G. Ma, H. X. Wang, J. Xiao, L. X. Li, and Z. Bin Cheng, Effects of Viscosity Modifying Admixtures on the Workability of Self-Compacting Concrete. Advanced Materials Research, 306, 946-950, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.306-307.946>
- [18] P. Erik Jansson, L. Kenne, and B. Lindberg, Structure of the extracellular polysaccharide from xanthomonas campestris. Carbohydrate Research, 45, 275–282, 1975. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)85885-1](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)85885-1)
- [19] L. D. Melton, L. Mindt, and D. A. Rees, Covalent structure of the extracellular polysaccharide from Xanthomonas campestris: evidence from partial hydrolysis studies. Carbohydrate Research, 46, 245–257, 1976. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)84296-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)84296-2)
- [20] B. Benabed, E. H. Kadri, L. Azzouz, and S. Kenai, Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. Cement and Concrete Composites, 34, 1167–1173, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.007>
- [21] M. M. Khotbehsara, E. Mohseni, M. A. Yazdi, P. Sarker, and M. M. Ranjbar, Effect of nano-CuO and fly ash on the properties of self-compacting mortar. Construction and Building Materials, 94, 758–766, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.063>
- [22] B. Safi, M. Saidi, A. Daoui, A. Bellal, A. Mechekak, and K. Toumi, The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM). Construction and Building Materials, 78, 430–438, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.009>
- [23] EFNARC, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org), Accessed: Mar. 06, 2021.
- [24] TS-EN 196-1, Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. Turkish Standards Institution, Ankara, 2016.
- [25] T. Bouziani and A. Benmounah, Correlation between v-funnel and mini-slump test results with viscosity. KSCE Journal of Civil Engineering, 17, 173–178, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-1569-1>
- [26] A. M. Ramezani-pour and R. D. Hooton, A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs. Cement and Concrete Composites, 51, 1–13, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.006>
- [27] Y. Zhang, Z. Zhang, X. Li, W. Li, X. Shen, and H. Wang, Effect of welan gum on the hydration and hardening of Portland cement. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 131, 1277–1286, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6589-5>
- [28] I. E. Isik, M. H. Ozkul, Utilization of polysaccharides as viscosity modifying agent in self-compacting concrete. Construction and Building Materials, 72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.017>
- [29] H. Bessaies-Bey, K. H. Khayat, M. Palacios, W. Schmidt, N. Roussel, Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology. Cement and Concrete Research, 152, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106646>





# Mikrodalga ısıtma işlemi uygulanan kaolinin puzolanik aktivitesinin incelenmesi

## Investigation of the pozzolanic activity of microwave heat-treated kaolin

Adil Gültekin<sup>1,\*</sup> , Kambiz Ramyar<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35040, İzmir, Türkiye

### Öz

Kiln puzolanik aktivitesinin artırılması amacıyla farklı yöntemler kullanılmaktadır. Kül fırını ve döner fırınlarda yapılan kalsinasyon hem kayda değer miktarda enerji harcamakta hem de uzun süre almaktadır. Mikrodalga teknolojisi, killerin kalsinasyonu için alternatif olma potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada kısa süreli mikrodalga ısıtma işlemi, kaolinin puzolanik aktivitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda ev tipi mikrodalga fırın kullanılarak 10 dakika boyunca 300, 450, 600 ve 800 watt güç seviyesinde ısıtma işlemine maruz bırakılan kaolinlerin dayanım aktivite indeksi belirlenmiştir. Sonuçlar yüksek sıcaklık fırınında 600, 700 ve 800°C'de 1, 3 ve 5 saat kalsine edilen kaolinler ile kıyaslanmıştır. Sonuçta, yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilen kaolinin 28 günlük dayanım aktivite indeksinin %82.5-107.9 aralığında olduğu, mikrodalga ısıtma işlemi uygulanan kaolinde ise bu değerlerin %74.3-80.5 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Mikrodalga ısıtma işlemine tabi tutulmuş kaolinlerin dayanım aktivite indekslerinin, ham kaoline oranla %4.6-13.3 oranında daha yüksek olması, mikrodalga ısıtma işlemi kalsinasyon için potansiyel taşıdığını göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kaolin, Metakaolin, Kalsinasyon, Mikrodalga, Basınç dayanımı

### 1 Giriş

Çimento dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir [1]. Ancak çimento üretilirken aşırı miktarda enerji tüketilmekte, yüksek miktarda sera gazı salınımı yapılmakta ve doğal yaşam alanları tahrip edilmektedir [2]. Puzolanların klinker ikamesi olarak kullanılması ile çimento üretiminin neden olduğu bu sorunların azaltılması mümkündür [3]. Volkanik kül, uçucu kül ve metakaolin gibi malzemeler, yaygın olarak bulunması, silis içermesi ve puzolanik aktivite göstermesi gibi sebeplerle çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılmaktadır [4]. Bu puzolanik malzemelerden birisi olan metakaolin, kaolinin kalsine edilmesi ile üretilmekte olup dünyadaki farklı bölgelerde bol miktarda bulunması ile dikkat çekmektedir [3].

Puzolan olarak kullanılma potansiyeli bulunan malzemelerin puzolanik aktivitelerini arttırmak amacıyla asit veya alkalin bileşenlerin kullanıldığı kimyasal yöntemler, öğütme ile parçacık boyutunun minimize edilmesini içeren

### Abstract

Different methods are used to increase the pozzolanic activity of clay. Muffle or rotary furnaces consume significant amount of energy and require long time for calcination. Microwave technology has potential to be an alternative for the calcination of clays. In this study, the effect of short-term microwave heat treatment on the pozzolanic activity of kaolin was investigated. For this purpose, the strength activity index of the kaolins, which were heat treated at 300, 450, 600 and 800 watts for 10 minutes in a household type microwave oven, were determined. The results were compared with kaolins calcined in the muffle furnace at 600, 700 and 800°C for 1, 3 and 5 hours. The 28-day strength activity index of the kaolins calcined in the muffle furnace varied between 82.5-107.9%, and this value was in between 74.3-80.5% for the microwave heat-treated kaolins. The strength activity index of microwave heat-treated kaolins, being 4.6-13.3% higher than that of the raw kaolin, showed the potential of the microwave heat treatment for calcination.

**Keywords:** Kaolin, Metakaolin, Calcination, Microwave, Compressive strength

mekanik yöntemler veya malzemenin yüksek sıcaklıkta ısıtma işlemi tabi tutulması gibi termal yöntemler kullanılmaktadır [5].

Kaolinitik killerin uygun sıcaklık aralığında (yaklaşık olarak 600-800°C) kalsine edilmesi ile metakaolin elde edilmektedir. Ancak 900°C ve daha yüksek sıcaklıklarda metakaolinin yapısı, devam eden reaksiyonlar nedeniyle değişmekte, serbest silis ve mullit gibi yeni kristal ürünler ortaya çıkmaktadır [6]. Uygun sıcaklık aralığındaki ısıtma işlemi ile üretilen metakaolin, çimentolu sistemlerde dayanıma iki açıdan fayda sağlamaktadır. Bunlardan birincisi filler olarak görev yapması iken diğeri puzolanik reaksiyon ile sistemdeki kalsiyum hidroksitlerle reaksiyona girmesidir. Buradaki puzolanik reaksiyon; çimento tipi, kür süresi, çimento matrisindeki kalsiyum hidroksit miktarı, S/Ç oranı gibi matris kaynaklı değişkenlerin yanı sıra metakaolinin inceliği, kimyasal ve minerolojik kompozisyonu, amorflik derecesi, reaktif silis ve alümina içeriği [7] ve kalsinasyon koşulları [8] gibi faktörlerden etkilenmektedir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: adigultekin05@gmail.com (A. Gültekin)  
Geliş / Received: 15.05.2022 Kabul / Accepted: 28.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1144737

Kil parçacıkları çok sayıda tetrahedral ve oktahedral tabakadan meydana gelmektedir. Tetrahedral tabakalar 4 oksijen iyonu tarafından çevrelenen  $Si^{4+}$ , oktahedral tabakalar ise koordinasyon sayısı VI olan  $Al^{3+}$ , oksijen ve hidroksil gruplarından oluşmaktadır. Bu tabakaların sıralanması ve sayısı kilin mineral grubunu belirlemektedir. Kaolinit ve halloysit gibi mineraller bir tetrahedral tabaka ile bir oktahedral tabakanın bir araya gelmesinden oluşmaktayken, vermikülit ve illit gibi gruplar bir oktahedral tabakanın iki tetrahedral tabaka ile sarılmasıyla oluşmaktadır. Ham killerin katmanlı yapısı ve kararlı kristal yapıları dolayısıyla puzolanik özellikleri düşüktür. Killerin puzolanik aktivitesinin yükselmesi için düzenli kristal yapılarının bozulması gerekmektedir. Killer, ısıtılma tabi tutulduğunda  $300^{\circ}C$ 'nin altındaki sıcaklıklarda dehidrasyon nedeniyle adsorbe su,  $500-800^{\circ}C$  arasında ise oktahedral tabakada yapısal su olarak yer alan hidroksil grupları uzaklaşmaktadır. Tetrahedral ve oktahedral tabaka arasındaki bağı sağlayan hidroksil gruplarının uzaklaşması, yapının değişmesi ve kristal yapının bozulmasına neden olur. Kilin yeni yapısı kısmi dehidroksilasyonda yarı kristal iken yapının tamamen bozulması amorf bir malzeme elde edilmesini sağlamaktadır [9].

Killerin kalsine edilmesinde, kül fırını gibi statik sistemler veya döner fırınlar gibi hareketli sistemlerin kullanılması mümkündür. Statik sistemlerin laboratuvar çalışmaları için gereken az miktardaki kilin kalsinasyonu için uygun olduğu belirtilmiştir. Büyük ölçekli kalsinasyon işlemlerinde, kilin farklı bölgelerinde ciddi sıcaklık farklarının oluşması homojen kalsine kilin elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Döner fırınlarda daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen yüksek sıcaklıklarda killerin topaklaşması, özgül yüzey alanının küçülmesi, kil taneciklerinin fırın içerisinde ayrışması gibi sorunların ortaya çıkması olasıdır [10].

Kalsinasyonun geleneksel yöntemlerle yapılmasının düşük ısıtılma hızı, yüksek enerji tüketimi ve malzemenin iç ve dış kısımları arasında eşit olmayan ısıtılma etkisi yaratma gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu sebeple araştırmacılar alternatif kalsinasyon yöntemlerinin arayışına başlamıştır [11]. Geleneksel ısıtılma yöntemlerinde ısı iletim, ışınım ve taşınım ile malzemenin yüzeyinden iç kısımlarına transfer olur. Bu durum, sıcaklık gradyanlarının oluşması ve malzemenin farklı bölgelerinde farklı sıcaklıkların ortaya çıkması sorunlarına yol açar. Mikrodalga ısıtılmasında malzeme, elektromanyetik enerjiyi hacimsel olarak absorbe etmekte ve ısı enerjisine dönüştürmektedir. Böylece enerji malzemeye doğrudan iletilmekte ve malzemede homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmektedir [12].

Mikrodalga teknolojisi, geopolimer/alkali aktive malzeme üretimi [13-15], zeolit sentezi [16], analitik kimya uygulamaları [17] gibi farklı alanlarda uzun süredir kullanılmaktadır. Ancak yapı malzemesi sektöründe, puzolanik aktivitenin artırılması için geleneksel kalsinasyon uygulamalarına alternatif olarak mikrodalgaların kullanılması ile ilgili çalışma sayısı sınırlıdır.

Rossignolo vd. [18] şeker kamışı küspesi külünün mikrodalga fırında ısıtılma tabi tutulmasının puzolanik aktivite üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacılar

mikrodalga fırında, nispeten kısa sürelerde ve düşük sıcaklıklarda ısıtılma tabi tutulan küllerin, elektrikli yüksek sıcaklık fırınlarında kalsine edilenlerden daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu ifade etmiştir. Kılıç [19] ise mikrodalgada yapılan ön ısıtılma işleminin, kireçtaşı kalsinasyonuna etkisini incelemiştir. Araştırmacı, yüksek sıcaklık fırınında yapılacak kalsinasyondan önce kireçtaşı numunelerinin mikrodalga fırında ön ısıtılma tabi tutulmasının, fırında kalma süresi ve yakıt tüketimini azaltacağını belirtmiştir. Ancak bu çalışmalarda mikrodalga ısıtılma işleminin kalsinasyon üzerindeki etkileri özgül yüzey alanı, TGA-DTA incelemeleri, ultrases geçiş hızı ölçümleri, XRF, kızdırma kaybı, amorf silis içeriği incelemeleri gibi yöntemlerle belirlenmiştir. Mikrodalga ısıtılma işlemi görmüş killerin, çimento harcı kullanılarak dayanım aktivite indekslerinin incelendiği çalışma konusunda literatürde eksik olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada kısa süreli mikrodalga ısıtılma tabi tutulan kaolinin dayanım aktivite indeksi, harç numuneleri kullanılarak incelenmiştir. Bu kapsamda ev tipi mikrodalga fırında 300, 450, 600 ve 800 watt güç seviyelerinde 10 dakika ısıtılma tabi tutulan kaolinin dayanım aktivite indeksi ASTM C311 [20]'e uygun olarak belirlenmiş ve sonuçlar 1, 3 ve 5 saat boyunca yüksek sıcaklık fırınında  $600$ ,  $700$  ve  $800^{\circ}C$ 'de kalsinasyonla üretilen metakaolin ile kıyaslanmıştır. Ayrıca seçilen killerin kristal yapıları XRD analizi ile incelenmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Malzeme

#### 2.1.1 Çimento

Çalışmada CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Çimentoya ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler.

Bileşen	%	Özellik	
CaO	63.17	Özgül yüzey alanı	3220 cm <sup>2</sup> /g
SiO <sub>2</sub>	18.18	İncelik	90 µm elek bakiyesi %0.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.70		32 µm elek bakiyesi %19.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.41	Priz	Başlangıç 230 dakika
MgO	1.22	süresi	Bitiş 320 dakika
Na <sub>2</sub> O	0.58	Özgül ağırlık	3.14
K <sub>2</sub> O	0.74	Standart kıvam	%28.2
SO <sub>3</sub>	3.57		
Cl <sup>-</sup>	0.006		
Serbest CaO	0.94		
Kızdırma kaybı	3.28		
Çözünmeyen kalıntı	0.03		

#### 2.1.2 Kaolin

Çalışmada Bilecik'te faaliyet gösteren bir firmadan temin edilen kaolin kullanılmıştır. Kullanılan kaoline ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.



**Tablo 2.** Ham kaoline ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler

Bileşim	(%)	Özellik	Değer
CaO	0.38	Özgül ağırlık	2.60
SiO <sub>2</sub>	73.15	32 µm elek bakiyesi	%4.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.55	45 µm elek bakiyesi	%0.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.69	90 µm elek bakiyesi	%0.15
MgO	0.31	Blaine özgül yüzey alanı	8800 cm <sup>2</sup> /g
Na <sub>2</sub> O	0.10		
K <sub>2</sub> O	0.24		
SO <sub>3</sub>	0.82		
TiO <sub>2</sub>	0.32		
Kızdırma kaybı	6.90		

### 2.1.3 Kum

Harç karışımlarının hazırlanmasında standart CEN kumu kullanılmıştır.

### 2.1.4 Su

Çalışma kapsamında İzmir ili, Bornova ilçesi şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

### 2.2 Metot

Çalışmada farklı ısı işlem uygulamalarıyla elde edilen kaolinlerin ASTM C311 [20]'e uygun olarak dayanım aktivite indeksleri belirlenmiş ve kristal yapıları XRD analizi ile incelenmiştir. Kaolin, yüksek sıcaklık fırınında 3 farklı sıcaklıkta (600, 700, 800°C), 3 farklı sürede (1, 3, 5 saat); mikrodalga fırında ise 4 farklı güç seviyesinde (300, 450, 600, 800 watt), tek sürede (10 dakika) ısı işlemine tabi tutulmuştur.

#### 2.2.1 Yüksek sıcaklık fırınında kalsinasyon işlemi

Yüksek sıcaklık fırınında yapılan kalsinasyon için 1175°C sıcaklık kapasitesine sahip yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Kalsine edilecek kaolin (yaklaşık 300 g) metal bir tabağa koyulduktan sonra 600, 700 ve 800°C sıcaklıklarda 1, 3 ve 5 saat boyunca yakılmıştır. Fırının sıcaklık artış hızı 20°C/dk. olarak ayarlanmıştır. Süre sonunda numuneler fırından çıkarılmış ve havada hızlı bir şekilde soğumaları için geniş metal tablolara yayılmıştır. Kaolinin kalsine edilmesine dair bir görsel Şekil 1(a)'da sunulmuştur. Oda sıcaklığına soğuyan metakaolinler Şekil 2'de gösterildiği gibi poşetlenerek depolanmıştır.

#### 2.2.2 Mikrodalga fırında uygulanan ısı işlemi

Mikrodalga ısı işlemi 2450 MHz çalışma frekansına sahip, maksimum çıkış gücü 800 watt olan ev tipi mikrodalga fırın kullanılmıştır. Her seferinde 300 g kaolin, Şekil 1(b)'de gösterildiği gibi fırının döner tablasına yayılmış ve fırın 10 dakika boyunca 300, 450, 600 ve 800 watt güç seviyelerinde çalıştırılmıştır. Süre sonunda döner tabla fırından çıkartılmış ve kaolinin soğutulması işlemine geçilmiştir. Kaolinlerin soğutulmasında, hava soğutması ve su soğutması olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmış, soğutma hızının etkisi incelenmiştir. Hava soğutmasında kaolinler yüksek sıcaklık fırınındakine benzer şekilde geniş bir tablaya yayılmış ve hava etkisi ile soğumaları beklenmiştir. Su soğutmasında ise kaolinler fırından çıkarıldıktan hemen sonra içi su dolu bir kaba boşaltılmış ve topaklaşmaların engellenmesi adına karıştırma işlemi yapılmıştır (Şekil 1(c)). Devamında bu karışım laboratuvar

tipi etüvde 48 saat 105°C'de kurutulmuştur. Kaolinler kurutulduktan sonra Şekil 1(d)'de gösterilen forma geldiği için kaolin taneciklerinin birbirinden ayrılması gerekmiştir. Bu ayırma işlemi için gezegen hareketli bilyalı öğütücü kullanılmıştır (Şekil 1(e)). Ancak parçacık boyut dağılımının değişmemesi adına öğütücü sadece 10 saniye çalıştırılmıştır. Havada soğuyan numuneler ile öğütücüden alınan numuneler Şekil 2'de gösterildiği gibi poşetlenerek depolanmıştır.



Şekil 1. Kaolin üzerinde uygulanan işlemler



Şekil 2. Dayanım aktivite indeksi ve XRD incelemelerinde kullanılan kaolin numuneleri

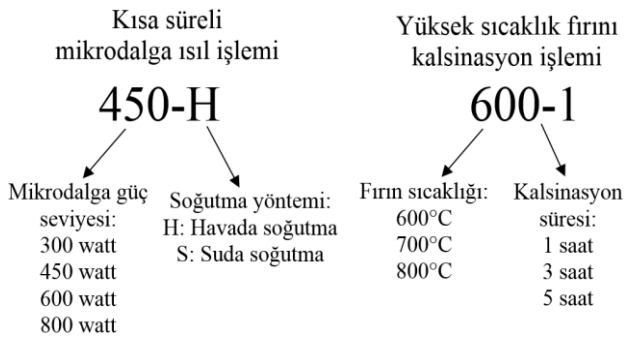
#### 2.2.3 Dayanım aktivite indekslerinin tespit edilmesi

Dayanım aktivite indeksleri, ASTM C 311 [20] standardına uygun olarak tespit edilmiştir. Bu amaçla üretilen harçların karışım oranları Tablo 3'te gösterilmiştir. Üretilen harçlar 50 mm ayrıtlı küp kalıplara yerleştirilmiş, dökümden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılan numuneler kirece doymun suda kürlenmiş ve 7-28 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları kullanılarak dayanım aktivite indeksleri tespit edilmiştir. Çalışmada puzolan ikamesi içermeyen harç

karışımı “Ref”, ısıtılma işlemine maruz bırakılmayan ham kaolin ikamesi ile üretilen harç “Kil” ifadesiyle, farklı ısıtılma işlemler sonucu elde edilen kaolin/metakaolinler ise Şekil 3’te gösterildiği gibi kodlanmıştır. Bu kaolinlerin ikamesi ile üretilen harçlarda da aynı isimlendirme uygulanmıştır.

**Tablo 3.** Harç karışımlarına ait malzeme miktarları

Karışım	Malzeme miktarı (g)			
	Çim.	Kil	Kum	Su
Ref	500	-	1375	242
Kil				246
300-H				247
450-H				247
600-H				248
800-H				249
300-S				247
450-S				247
600-S				248
800-S				248
600-1	400	100	1375	248
600-3				248
600-5				249
700-1				250
700-3				251
700-5				251
800-1				250
800-3				252
800-5				253



**Şekil 3.** Çalışmada kullanılan kodlama.

#### 2.2.4 XRD incelemeleri

Çalışma kapsamında ham kaolin ile mikrodalga ve yüksek sıcaklık fırınında ısıtılma işlemine maruz bırakılan birer kaolin/metakaolin numunesi üzerinde XRD incelemesi gerçekleştirilmiştir. İncelemeler İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde “Panalytical Empyrean” marka ve model cihaz kullanılarak 5-80 °2θ arasında, 0.0130° adım aralığında Cu anot ile yapılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

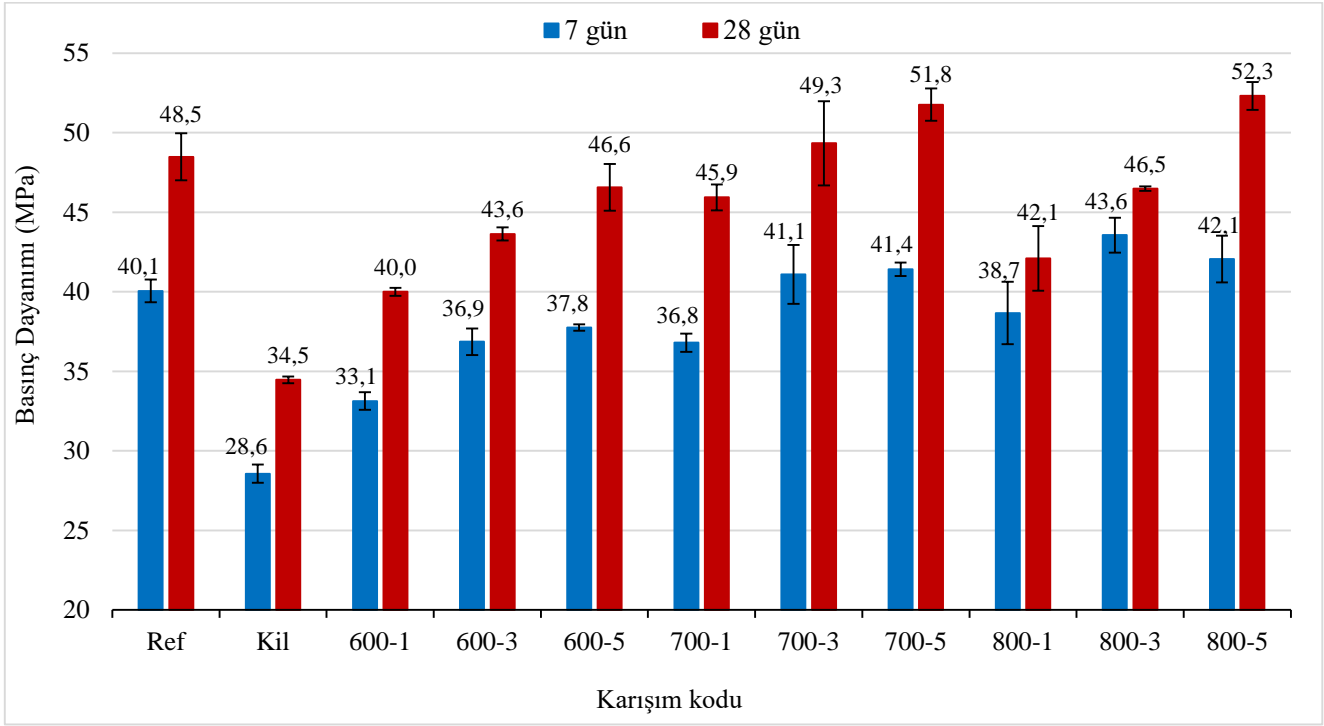
#### 3.1 Basınç dayanımı

Çalışma kapsamında üretilen ve puzolan ikamesi içermeyen referans harç, kalsine edilmemiş ham kaolin içeren puzolanlı harç ve farklı ısıtılma işlemlerine maruz bırakılan kaolin/metakaolinin puzolan olarak kullanıldığı harçlara ait 7 ve 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4 - Şekil 5’te sunulmuştur. Şekil 4 incelendiğinde referans harcın 28 günlük basınç dayanımının 48.5 MPa olduğu, puzolan içeren karışımlarda en düşük basınç dayanımının ham kaolin ikamesiyle üretilen harçta elde edildiği görülmektedir. Yüksek sıcaklık fırınında uygulanan kalsinasyonun basınç dayanımına etkisi incelendiğinde, aynı sıcaklıkta pişirme süresindeki artışla basınç dayanımlarında artış görüldüğü tespit edilmiştir. 600, 700 ve 800°C’de 5 saat kalsinasyon ile elde edilen metakaolinleri içeren harçların basınç dayanımlarının sırasıyla 46.6, 51.8 ve 52.3 MPa olduğu belirlenmiştir. Puzolanik reaksiyonun yavaş seyrinden dolayı mineral katkılı bağlayıcıların çimentolu sistemlerin erken dayanımını azalttığı bilinmektedir. Buna rağmen, 700 ile 800°C’de, 3 ve 5 saat pişirme ile üretilen metakaolin ikameli bağlayıcıların, kontrol karışımından daha yüksek bir 7 günlük dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Bunda puzolanik reaksiyonun yanı sıra metakaolinlerin filler etkisi göstermesinin de payı olduğu düşünülmektedir.

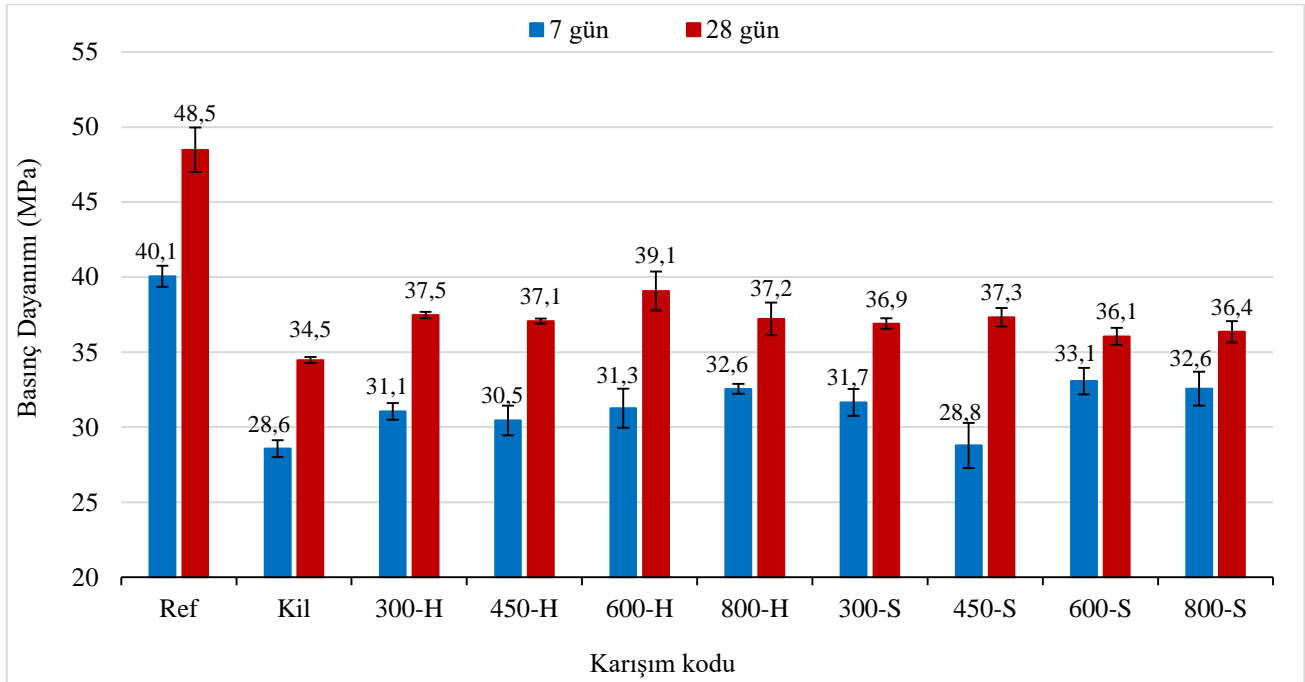
Mikrodalgada kısa süreli ısıtılma işlemi uygulanarak elde edilen kaolinleri içeren harçların basınç dayanımları incelendiğinde bu yöntemin yüksek sıcaklık fırınındaki kalsinasyon kadar etkili olmadığı anlaşılmıştır. Buna rağmen mikrodalga ısıtılma işlemi ile elde edilen kaolinlerin, ham kaolin içeren karışıma kıyasla 28 günlük basınç dayanımlarında %4.6-13.3 oranlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Kaolinin soğutulma yönteminin basınç dayanımına etkisi incelendiğinde ise havada ve suda soğutmanın ciddi bir basınç dayanımı değişikliğine yol açmadığı görülmüştür. Mikrodalga ısıtılma işlemi uygulanmış kaolinlerden, 600 watt güç seviyesine maruz bırakılan ve havada soğutulanın en yüksek 28 günlük basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

#### 3.2 Dayanım aktivite indeksi

Çalışma kapsamında farklı ısıtılma işlemleri kullanılarak elde edilen kaolin/metakaolinlerin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indeksleri Şekil 6 ve Şekil 7’de sunulmuştur. Mikrodalga fırınında ısıtılma işlemi uygulanan kaolinlerin dayanım aktivite indekslerinin 28 günde ham kaolinden %4.6-13.3 oranında daha yüksek olduğu belirlenmişken bu değer yüksek sıcaklık fırınındaki kalsinasyon ile üretilen metakaolinlerde %16.0-51.8 olduğu görülmüştür. 600 watt güç seviyesinde ısıtılma işlemine maruz bırakılan ve havada soğutulan kaolin ile yüksek sıcaklık fırınında 700°C’de 5 saat kalsinasyon ile üretilen metakaolin XRD incelemesi için seçilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınında en uygun kalsinasyon koşulu 800°C-5 saat olmasına rağmen seçilen kalsinasyon şartı ile çok yakın dayanım aktivite indeksine sahip olması, enerji sarfiyatları da düşünülerek optimum olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilen killere üretilen harçların basınç dayanımları

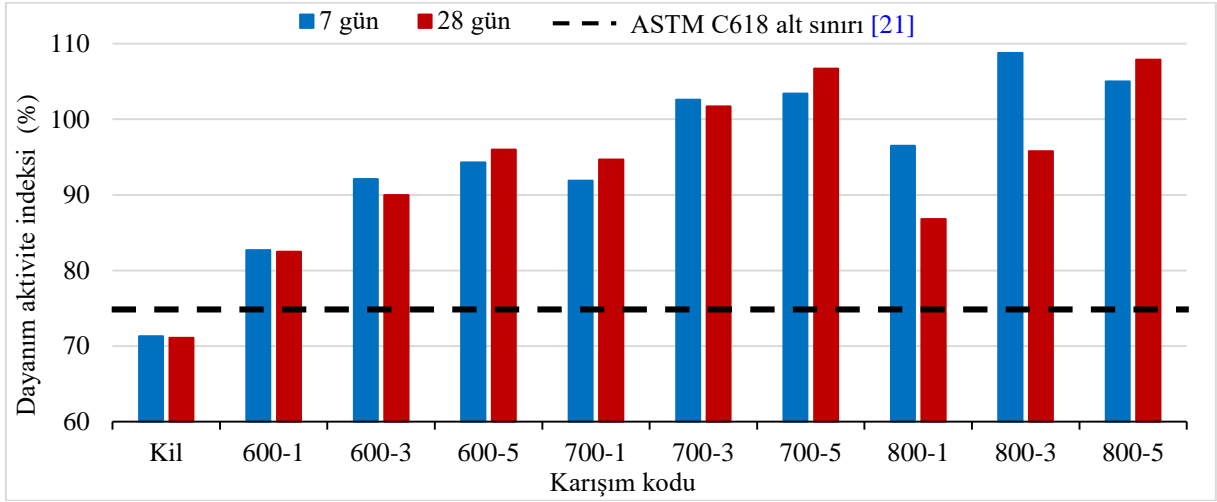


Şekil 5. Mikrodalga fırında ısıl işlem uygulanan killere üretilen harçların basınç dayanımları

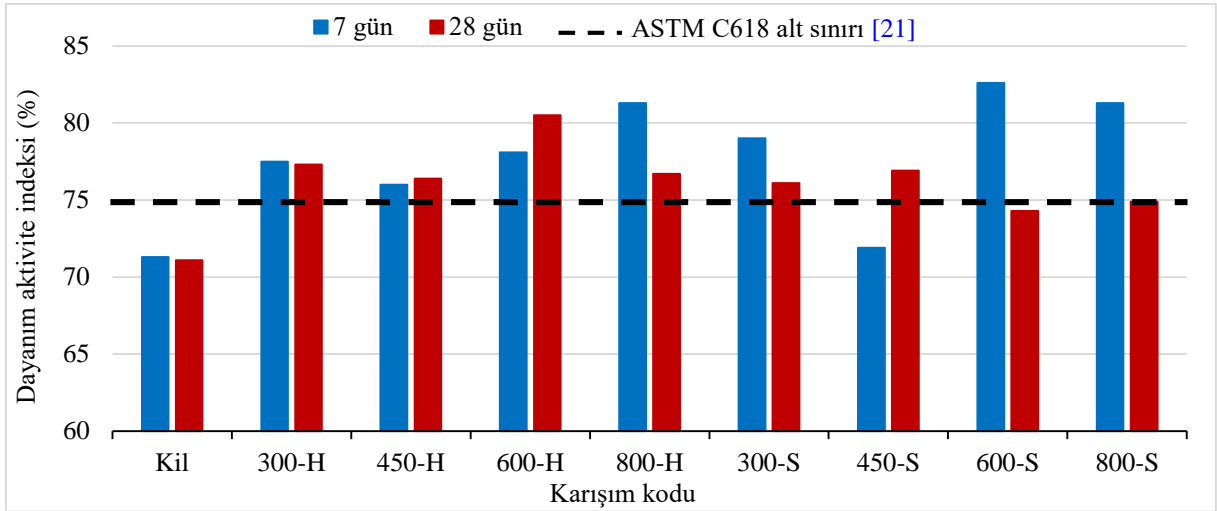
### 3.3 XRD incelemeleri

Ham kaolin ile 600-H ve 700-5 kodlu kaolin/metakaoline ait XRD spektrumları Şekil 8’de sunulmuştur. Ham kaolinde kaolinit, dikit ve kuvars piklerinin bulunduğu tespit edilmiştir. Mikrodalga fırında uygulanan ısıl işlemin pik şiddetlerinde bir miktar azalmaya neden olmasına rağmen

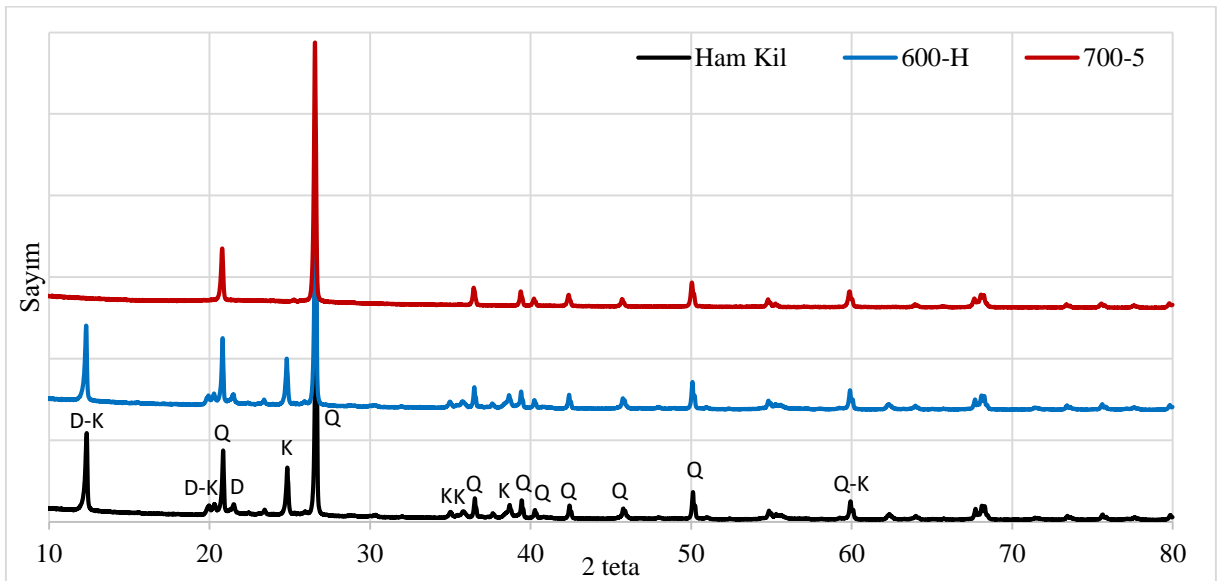
krystal yapıda ciddi bir değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Ancak yüksek sıcaklık fırınında yapılan kalsinasyon ile XRD spektrumunda önemli değişikliklerin ortaya çıktığı, dikit ve kaolinit piklerinin kaybolduğu, kuvars pik şiddetlerinde de azalışların yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisi ile kaolinin krystal yapısında bozulmaların meydana geldiği ve bu sebeple de kaolinin aktivitesinin arttığı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilen killerin dayanım aktivite indeksleri



Şekil 7. Mikrodalga fırında ısı işleme uygulanan killerin dayanım aktivite indeksleri



Şekil 8. Ham ve ısı işleme uygulanan kaolinlere ait XRD spektrumu (D: dikit, K: kaolinit, Q: kuvars)

### 3.4 Enerji sarfiyatları

600 watt enerji seviyesinde mikrodalga ısıtma işlemi ile elde edilen kaolin ve yüksek sıcaklık fırınında 700°C'de 5 saat kalsinasyon ile üretilen metakaolin için enerji sarfiyatı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler portatif bir dijital elektrik sayacı ile gerçekleştirilmiş olup toplam enerji sarfiyatı, ham kile kıyasla ısıtma işlemlerinin sağladığı 28 günlük basınç dayanımı artışı ve bu dayanım artışları için birim dayanım artışına denk gelen enerji sarfiyatları Tablo 4'te sunulmuştur. Ham kil ile kıyaslandığında mikrodalga ısıtma işleminin, kaolinin basınç dayanımını 4.6 MPa arttırdığı, bu değer 700°C'de 5 saat pişirme ile elde edilen metakaolinde 17.3 MPa olduğu görülmektedir. Mikrodalga ısıtma işlemi sırasında harcanan toplam enerji ile birim dayanım artışı başına düşen enerjinin, yüksek sıcaklık fırınında yapılan kalsinasyona göre sırasıyla %97.3 ve %89.8 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak mikrodalga ısıtma işleminin kaolinin dayanım aktivite indeksi üzerindeki etkisinin yüksek sıcaklık fırınına oranla çok daha düşük olduğu dikkate alınmalıdır.

**Tablo 4.** Isıtma işlemlerindeki enerji sarfiyatları

	Cihaz	
	Mikrodalga fırın	Yüksek sıcaklık fırını
Güç seviyesi-sıcaklık	600 W	700°C
Süre	10 dakika	5 saat
Toplam enerji sarfiyatı	0.19 kWsaat	6.95 kWsaat
Sağlanan dayanım artışı	4.6 MPa	17.3 MPa
Birim dayanım artışı için enerji sarfiyatı	0.041 kWsaat	0.402 kWsaat

## 4 Sonuçlar

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve uygulanan deney yöntemleri göz önüne alındığında;

- Kaolinin, mikrodalga ısıtma işlemine tabi tutulması ve yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilmesi ile dayanım aktivite indeksinin arttığı,
- Yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilerek üretilen metakaolinin 28 günlük dayanım aktivite indeksinin %82.5-107.9 aralığında değiştiği, aynı sıcaklıkta kalsinasyon süresinin artmasıyla dayanım aktivite indeksinin de yükseldiği,
- Kısa süreli mikrodalga ısıtma işleminin kaolinin dayanım aktivite indeksini arttırdığı, ancak artışların yüksek sıcaklık fırınında kalsine edilen metakaolinler kadar yüksek olmadığı; 28 günlük dayanım aktivite indekslerinin ham kaoline oranla %4.6-13.3 aralığında artış göstererek %74.3-80.5 aralığına yükseldiği,
- En yüksek dayanım aktivite indekslerinin yüksek sıcaklık fırınında 800°C'de 5 saat kalsinasyon ile üretilen metakaolinde, mikrodalga fırında ise 600 watt güç seviyesinde uygulanan ve havada soğutulan kaolinde görüldüğü sonuçlarına varılmıştır.

Bu konuda yapılacak daha ileri seviye çalışmalarda uzun süreli mikrodalga ısıtma işlemi uygulanmasının ve bu uygulamanın gelişmiş sanayi tipi mikrodalga fırınlar ile

yapılmasının konu hakkında daha detaylı bilgilerin alınmasını sağlayacağı düşünülmektedir.

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

### Benzerlik oranı (iThenticate): %10

### Kaynaklar

- [1] Z. Safari, R. Kurda, B. Al-Hadad, F. Mahmood and M. Tapan, Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. Resources, Conservation and Recycling, 162, 105055, 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105055>.
- [2] C. Patil, M. Manjunath, S. Hosamane, S. Bandekar and R. Athani, Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar. Materials Today: Proceedings, 42, 1456-1461, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.251>.
- [3] A. Tironi, M. A. Trezza, A. N. Scian and E. F. Irassar, Kaolinitic calcined clays: factors affecting its performance as pozzolans. Construction and Building Materials, 28, 276-281, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.064>.
- [4] A. H. Ismail, A. Kusbiantoro, S. C. Chin, K. Muthusamy, M. Islam and K. F. Tee, Pozzolonic reactivity and strength activity index of mortar containing palm oil clinker pretreated with hydrochloric acid. Journal of Cleaner Production, 242, 118565, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118565>.
- [5] C. Vizcayno, R. M. de Gutierrez, R. Castello, E. Rodriguez and C. E. Guerrero, Pozzolan obtained by mechanochemical and thermal treatments of kaolin. Applied Clay Science, 49, 405-413, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.09.008>.
- [6] H. El-Diadamony, A. A. Amer, T. M. Sokkary and S. El-Hoseny, Hydration and characteristics of metakaolin pozzolonic cement pastes. HBRC Journal, 14, 150-158, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2015.05.005>.
- [7] B. Mehsas, M. Siline and L. Zeghichi, Development of supplementary cementitious materials from Algerian kaolin: elaboration of metakaolin and assessment of pozzolonicity. Innovative Infrastructure Solutions, 6 (50), 1-12 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00444-2>.
- [8] S. Roy, A. Chatterjee and H. Aiyer, Effect of mineralogy and temperature treatment on the pozzolonic activity of Indian clays. Materials Research Innovations, 24 (1), 18-27, 2020. <https://doi.org/10.1080/14328917.2018.1546794>.
- [9] S. Hollanders, Mineralogical study of the pozzolonic properties of calcined clays. Ph.D. Thesis, Arenberg Doctoral School Faculty Of Science, KU Leuven, Netherlands, 2017.
- [10] T. Hanein, K-C. Thienel, F. Zunino, A. T. M. Marsh, M. Maier, B. Wang, M. Canut, M. C. G. Juenger, M. B. Haha, F. Avet, A. Parashar, L. A. Al-Jaberi, R. S. Almenares-Reyes, A. Alujas-Diaz, K. L. Scrivener, S.

- A. Bernal, J. L. Provis, T. Sui, S. Bishnoi and F. Martirena-Hernandez, Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*, 55 (3), 1-29, 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>
- [11] L.-j. Zhang, Y. He, P. Lü, J.-h. Peng, S.-w. Li, K.-h. Chen, S.-h. Yin and L.-b. Zhang, Comparison of microwave and conventional heating routes for kaolin thermal activation. *Journal of Central South University*, 27, 2494-2506, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4475-y>.
- [12] J. J. Reinoso, B. Garcia-Banos, J. M. Catala-Civera and J. F. Fernandez, Step ahead on efficient microwave heating for kaolinite. *Applied Clay Science*, 168, 237-243, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.001>.
- [13] J. Somaratna, D. Ravikumar and N. Neithalath, Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing. *Cement and Concrete Research*, 40, 1688-1696, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.08.010>.
- [14] J. Tan, J. Cai, L. Huang, Q. Yang, M. Mao and J. Li, Feasibility of using microwave curing to enhance the compressive strength of mixed recycled aggregate powder based geopolimer. *Construction and Building Materials*, 262, 120897, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120897>.
- [15] A. Graytee, J. G. Sanjayan and A. Nazari, Development of a high strength fly ash-based geopolimer in short time by using microwave curing. *Ceramics International*, 44, 8216-8222, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.001>.
- [16] H. Youssef, D. Ibrahim and S. Komarneni, Microwave-assisted versus conventional synthesis of zeolite A from metakaolinite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 115, 527-534, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2008.02.030>.
- [17] S. Kuşlu ve F. Çavuş, Mikrodalga enerjisinin analitik kimya sahasında ve katalizör hazırlamada kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (3), 267-277, 2008.
- [18] J. A. Rossignolo, M. V. Borrachero, L. Soriano and J. Paya, Influence of microwave oven calcination on the pozzolanicity of sugar cane bagasse ashes (SCBA) from the cogeneration industry. *Construction and Building Materials*, 187, 892-902, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.016>.
- [19] Ö. Kılıç, Mikrodalga ile ön işlem uygulamanın kireçtaşı kalsinasyonuna etkisi. *Madencilik*, 48, 45-53, 2009.
- [20] ASTM C311/C311M-22, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022. [https://doi.org/10.1520/C0311\\_C0311M-22](https://doi.org/10.1520/C0311_C0311M-22).
- [21] ASTM C618-19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>.





# Savunmasız yol kullanıcıları için yaya yolu hizmet düzeyinin belirlenmesi

## Determining the level of service for vulnerable road users' sidewalk

Ayşe Ünal<sup>1,\*</sup> , Meltem Saphoğlu<sup>2</sup> , Furkan Turgut<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 56100, Siirt, Türkiye

<sup>2,3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

### Öz

Kent içi seyahatlerde engellilerin birçok problemle karşılaştığı bilinmektedir. Şimdiye kadar yapılmış bilimsel çalışmaların yaya hizmet düzeyi (YHD) tespiti kısmında engelliler için gerekli olan parametreler göz ardı edilmiş, engelli yayaların ihtiyaçları mevcut YHD modellerine yansıtılmamıştır. Bu eksikliği ortadan kaldırmak için YHD belirlenirken engelli kişilerinde ihtiyaçlarının dikkate alınması uygun olacaktır. Çalışmada, mevcut hizmet düzeyi modeline, engelli bireylerin seyahat ihtiyaçları eklenerek tüm yaya yol kullanıcıları için yeni bir YHD belirlenmiştir. Bunun için daha önceki çalışmalarda engelli bireylere yapılan anket sonuçları incelenmiştir. Çalışmanın özgünlüğünü arttıran kısım ise bugüne kadar yapılmış literatürden elde edilen engelli yaya ihtiyaç parametrelerinin ayrı ayrı kullanılarak hizmet düzeyi hesabına eklenmesi olmuştur. GYHD (Genel Yaya Hizmet Düzeyi Modeli), EYHD (Engelli Yaya Hizmet Düzeyi) ve bunların her ikisini de bünyesinde bulunduran yeni bir YHD modeli oluşturulmuştur. Hizmet düzeyi tespiti Süleyman Demirel Üniversitesi Batı Yerleşkesinde uygulanmıştır fakat, modelin parametre sınır değerlerinin literatürdeki uluslararası standartların sonuçlarına dayanması nedeniyle, bulunan modelin evrensel olarak uygulanabilir olduğu söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Engelli yaya, Yaya hizmet düzeyi, Yaya yolu geometrisi

### 1 Giriş

Motorlu araçlarla ilgili kayda değer sayıda yolun hizmet düzeyinin belirlenmesinde kullanılan çalışmalar bulunmaktadır. Buna karşılık, savunmasız yol kullanıcılarının hizmet düzeylerinin hesaplanmasına yer veren çalışmalara nadir rastlanmaktadır. Bunun nedeni, yaya yürüme koşullarının değerlendirilmesinin taşıt yoluna göre çok daha karmaşık olmasıdır. Çünkü yayalar, taşıtlara göre daha esnek yürüme alanına sahiptir ve araçlar gibi kısıtlı güzergâh uzunlukları ile sınırlandırılmamışlardır [1].

Yayalar için yürüme yollarının kalitesini tahmin etmeye yönelik en yaygın yaklaşım, yaya hizmet düzeyini (YHD) hesaplamaktır. Yaygın olarak kullanılan YHD modellerinde ise yürüme engelli yayaların ihtiyaçlarını göz ardı etmektedir.

Yaya yürüme yollarının değerlendirilmesinde kullanılan modelleri net olarak tespit edebilmek amacıyla ilk etapta

### Abstract

It is well-known that urban travel for people with disabilities is fraught with difficulties. The parameters required for the disabled have been overlooked in the scientific studies so far, and the needs of disabled pedestrians have not been reflected in the existing YHD models. There is a need to consider the needs of people with disabilities when determining YHD in order to eliminate this deficiency. Pedestrians with disabilities were added to the existing service level model in this study to determine a new YHD for all pedestrians. In previous studies, results of questionnaires given to people with disabilities were examined for this purpose. The addition of the disabled pedestrian need parameters obtained from the literature to the service level calculation by using them separately increased the originality of the study. This model, which incorporates both the GYHD (General Pedestrian Service Level Model) and the EYHD (Disabled Pedestrian Service Level), was developed. It was found that the model developed by Süleyman Demirel University West Campus was universally applicable due to the model's parameter limit values being based on results from international standards.

**Keywords:** Disabled pedestrian, Pedestrian service level, Sidewalk geometry

mevcut literatür çalışmalarını gözden geçirmek önemlidir. Bu nedenle, son yıllarda gerçekleştirilen yaya yürüme yollarının hizmet düzeyinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar detaylı olarak araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, mevcut YHD modellerine yürüme engelli yayaların ihtiyaçlarını da göz önüne alıp birlikte değerlendirebilecek bir YHD yöntemi önermek amacıyla kullanılmıştır. Literatürde YHD ile ilgili iki genel bakış açısı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kapasite temelli modeller, ikincisi ise karayolu geometrik özelliklerini dikkate alan modellerdir. İkinci yöntem, yaya-çevre faktörlerine ve tesis özelliklerine dayanmaktadır.

Birinci YHD yöntemi, kaldırım kapasitesi ve hacmine bağlı olarak hesaplanmaktadır [2]. Tanaboriboon ve Guyano [3] çalışmasında, Bangkok şehrinde metrekare başına düşen alan doluluğuna bağlı yaya yürüme yolları tasarlamak için YHD yöntemi önermiştir. Çalışmada kılavuz olarak Fruin'in

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ayseunal@siirt.edu.tr (A. Ünal)

Geliş / Received: 24.05.2022 Kabul / Accepted: 27.06.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1120837

önermiş olduğu YHD tasarım standardını kullanmışlardır. HCM [4] YHD değerlendirmesinde, yapılan çalışmalara ek olarak hacim, kapasite ve hız parametrelerinin etkisini de dikkate almıştır. Gelişmekte olan Asya ülkelerindeki yaya yolları tasarım yönergelerinin çoğu, ABD Otoyol Kapasite El Kitabına [5] dayanmaktadır. HCM'nin önermiş olduğu yöntem ise birçok araştırmacı tarafından eleştirilmiştir. Çünkü yayalar bu modelde araç hareketleri formatında düşünülmüştür. Ayrıca bu yöntem evrensel olmaktan ziyade Amerikan kültür özelliklerini temel alarak oluşturulmuştur [6]. Yürüme yollarının fiziksel özellikleri ve kentsel donatı varlıkları gibi bazı öne çıkan faktörler bu tür modellerde dikkate alınmamış, yürüme ortamının niteliği ve kalitesi önemsiz kabul edilmiştir.

Yaya tesislerini dikkate alan diğer bir çalışma, çevresel unsurların yaya tesisleri üzerindeki etkisini incelemiştir [7]. Bu YHD çalışması daha sonra diğer araştırmacılar tarafından genişletilmiştir. Sarkar [8], A'dan F'ye kadar değişen altı yaya hizmet seviyesi önermiştir. YHD A, yaya dostu yürüme yolunu temsil etmektedir. Buna karşılık, F hizmet düzeyi, yayalar için asgari özellikleri bile sağlayamayan yürüme yollarını temsil etmektedir. Hizmet düzeyi kararında; güvenlik, konfor, rahatlık, süreklilik ve sistem tutarlılığı, kullanılan başlıca faktörlerdir. Khisty [9], Sarkar [8] tarafından önerilen aynı kriterlere dayalı nicel bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada yapılan anketler sonucunda emniyet ve güvenlik parametreleri modelin en önemli değişkenleri olarak bulunmuştur. Seneviratne ve Morrall [10] yapmış oldukları çalışmalarında çevresel faktörlere dayalı bir hizmet düzeyi önermiştir. İlgili çekici mekân varlıklarının (alışveriş merkezleri, restoranlar) yaya yürüme tercihlerinde önemli bir parametre olabileceğini öne sürmüşlerdir. Henson [11] çalışmasında, yürüme mesafesi, yol düzlüğü, eğim, kaldırım rampası ve yön işaretleri gibi uygunluk göstergelerinin yanında konfor faktörlerine de (aydınlatma) dayalı bir YHD modeli önermiştir. Landis vd. [1], mevcut kaldırım genişliği, motorlu araç hacmi, motorlu araç hızı, yayaların motorlu araçlara olan yanal mesafesi ve toplam (geçiş) şerit sayısı için değerlendirilen bir YHD modeli kullanmıştır.

YHD üzerinde etkili parametrelerin seçimine yönelik farklı yaklaşımlar da bulunmaktadır. İlk YHD çalışmaları daha çok yaya akımı ve hacmi ile kaldırım kapasitesi üzerine odaklanmıştır [2,12,13]. Lam vd. [14], çeşitli yaya akım özellikleri önermiş ve bunları hız, akım ve yoğunlukla ilişkilendirmiştir. Bu model, Hong Kong'taki yaya yürüme yolları tasarımına yardımcı olabilecek niteliktedir. Bazı araştırmacılar modellerine yürüme yolları üzerinde bulunan ağaç, bank ve aydınlatma unsuru gibi konfor tesislerini de hesaba katmaktadır [15-18]. Sarkar [17] çalışmasında fiziksel, psikolojik ve fizyolojik faktörlere dayalı bir YHD modeli geliştirmiştir. Sarkar'ın yönteminde, yürüme yolları değerlendirmesi tüm yayaların ihtiyaçlarına göre yapılmaktadır. Ancak bu model, yürüme engelli kullanıcılar için dokunsal kaldırım (uyarı ve yol gösterici) gibi bazı önemli eleman ve tesisleri değerlendirmemektedir. Bu modelin sınırlamaları, finansal ve insan kaynakları gerektirmektedir.

Mevcut tüm YHD modelleri yayaların güvenlik ve rahatlığını değerlendirmek amacıyla sahiptir. Ancak, literatürde yürüme engelli bireylerin özel gereksinimlerini konu olarak YHD modeline dâhil etme çalışmaları eksiktir [19]. Uygulanan YHD analizlerinin çoğu, engelli olmayan yayalar üzerinden yapılmıştır [20]. Tüm yol kullanıcılarını kapsayan ve eksiksiz bir yürüme yolu değerlendirmesi elde etmek için hem engelli yayaları hem de normal yayaları dikkate alan bir YHD modeli oluşturmak önemlidir. Faklı yaya özelliklerini de içine alarak genelleştirilebilecek, yürüme engelli yayalar için de YHD'ni ölçmek için kalibre edilmiş ve uygulanabilir bir yöntem gereklidir.

Birçok çalışma, YHD modelleri için veri toplamak amacıyla doğrudan gözlem, anket ve video tekniklerini kullanmaktadır. YHD modellerinde kullanılan yaygın analitik yöntemler arasında regresyon analizi [1,21], simülasyon [21] ve nokta sistemleri [15,23-24] bulunmaktadır. Dixon [15], yürüme yolunun YHD'ni değerlendirmek için yürüme yol koşullarını derecelendiren bir puan sistemi geliştirmiştir. Bu modelde yer alan göstergelerin ağırlıkları keyfi olarak seçilmiştir. Ayrıca, çeşitli durumlar için ayrı puan kategorileri bulunmamaktadır. Bu nedenle ara koşullara uygun ağırlık verilmemiştir. Bir diğer model, yürüme yolunun YHD'ni değerlendirmek için bir derecelendirme sistemi kullanan Gallin'in [24] modelidir. Gallin'in modelindeki bir göstergenin gücü ve ağırlığı, sonuçların yanlılığını artıran kişisel yargıya dayanmaktadır. Seneviratne ve Morrall [25], çalışmasında, seyahate çıkan kişinin kişisel özellikleri (cinsiyet, yaş), yürüme yolunun fiziksel özellikleri ve seyahat özellikleri (seyahat amacı ve saati) arasında bir ilişki oluşturmuştur. Yayaların rota seçiminde etkili olan birinci faktörün güzergâh mesafesi sonrasında sırasıyla yoğunluk, güvenlik ve yürüme yolu görselliği parametreleri olduğunu tespit etmiştir.

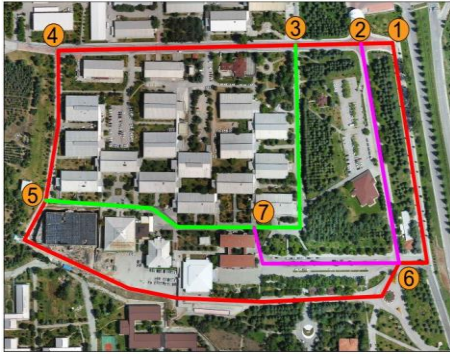
Gerekli literatür taraması sonucunda; kullanılan mevcut YHD modellerinde yürüme engelli bireylerin ihtiyaçlarının yer almadığı tespit edilmiştir. Bu eksiklikten yola çıkarak ilk aşamada; engelli yaya hizmet düzeyini (EYHD) etkileyen temel faktörlerin belirlenmesi amacıyla önceden yapılmış engelli anket sonuçlarından [26] ve bu çalışma için tanınmış detaylı kaynak incelemesi sonuçlarından faydalanılmıştır. Kaynak incelemelerinde özellikle engelli yol kullanıcıları için önem verilen parametreler bulunmuş, bu parametrelerin kullanım sayısına göre ağırlıklar oluşturulmuştur. Yayınarda özellikle uluslararası standartlara dikkat edilmiştir. İncelenen yayınların sonuçları tablo halinde sunulmuştur. Anket ve literatürde yer alan çalışmalar yardımıyla EYHD hesaplanmıştır. İkinci aşamada genel yaya hizmet düzeyi (GYHD) hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda GYHD ve EYHD modellerini birleştiren bir yaya hizmet düzeyi modeli (YHD) elde edilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı planlamacıları, yürüme yollarını engelli kullanıcılar için erişilebilir, konforlu ve kapsayıcı hale getirmeye teşvik etmektir. Bu çalışmada açıklanan engelli bireyler için iyileştirmeler, sağlıklı yayaların güvenliğini, rahatlığını ve hareketliliğini de artırabilir.



## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Materyal

Çalışmanın batı yerleşkesinde gerçekleştirildiği Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, Doğu ve Batı Yerleşkesi olmak üzere 10 bin dekarlık arazisi ile laboratuvarlar, atölyeler, bilgisayar merkezleri, kütüphane, kültür merkezleri, yaşam merkezi, diğer sosyal ve spor tesislerinden oluşmaktadır. 2019 verilerine göre, her iki yerleşkede toplam 81 bin öğrenci ve 7300 personel (personel sayısının 2282'si akademik personeldir) bulunmaktadır. Kampüs alanı, şehir merkezinden 7 km uzaklıktadır. Üniversiteye ulaşım; toplu taşıma aracı otobüs ve şahsi araçlar ile sağlanmaktadır. Üniversitenin Batı Yerleşkesinde, otobüsler kampüs içerisine girmemekte, kampüs giriş durağında yolcularını indirmektedir. Öğrenciler batı kampüsünde yaya olarak yolculuklarını gerçekleştirmektedir. Bu nedenle batı yerleşkesinde bulunan yürüme yollarının engelli yayalar için uygun olup olmadığının araştırılmasının öncelikli olduğu düşünülmüştür. Batı yerleşkesinde yer alan yürüme yolları belirlenmiş ve numaralandırılmıştır. Numaralar referans alınarak olası güzergâhlar (10 tane) gösterilmiştir (Şekil 1). Belirlenen yürüme yollarında gözlem ve fiziki ölçüm (uzunluk, genişlik, eğim, rampa, kaldırım üzeri engel) çalışmaları yapılmıştır (Tablo 1).



Şekil 1. SDÜ Batı Yerleşkesi yaya yürüme yolları

### 2.2 Metot

Engelli yayalar için tasarım gereklilikleri karmaşık olabilmektedir. Çünkü bu yol kullanıcıların seyahat sırasındaki gereksinimleri farklı ve fazladır. Bu nedenle tasarımda engelli yayaların ihtiyaçlarını da göz önünde

bulunduran hizmet seviyesi hesaplama yönteminin bulunması oldukça önemlidir. Bu amaçla çalışmanın metot bölümü iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada; detaylı bir kaynak taraması gerçekleştirilmiş, yapılan çalışmalarda yaya güzergâhlarının değerlendirilmesinde kullanılan fiziki özellikler tespit edilmiştir. Bu özellikler derecelendirilerek genel yaya hizmet düzeyi (GYHD) hesaplanmıştır. İkinci aşamada kampüs içerisinde bulunan yürüme engelli bireylerin ihtiyaçlarını ele almak amacıyla yapılmış anket çalışmasından [26] faydalanılmıştır. Elde edilen çıktılar ile engelli yaya hizmet düzeyi (EYHD) hesaplanmıştır. GYHD ve EYHD birleştirilerek tek bir YHD modeli elde edilmiştir. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

#### 2.2.1 GYHD'nin belirlenmesi

Yaya hizmet düzeyini etkileyen parametreler farklı çalışmalarda belirlenmiştir. Önemli parametreleri değerlendirmek için bilimsel yöntemler kullanan farklı yönergelerle bağlantılı olarak çeşitli yaya göstergeleri sunulmaktadır (Tablo 2). Çalışma, kaynak taramaları sonucu elde edilen değerleri dikkate alarak önemlerine göre derecelendirmektedir. Mevcut çalışma, yaya yürüme yollarının hizmet düzeyini belirlemek amacıyla puan sistemine dayalı GYHD denklemini [19] kullanmaktadır (Denklemler 1).

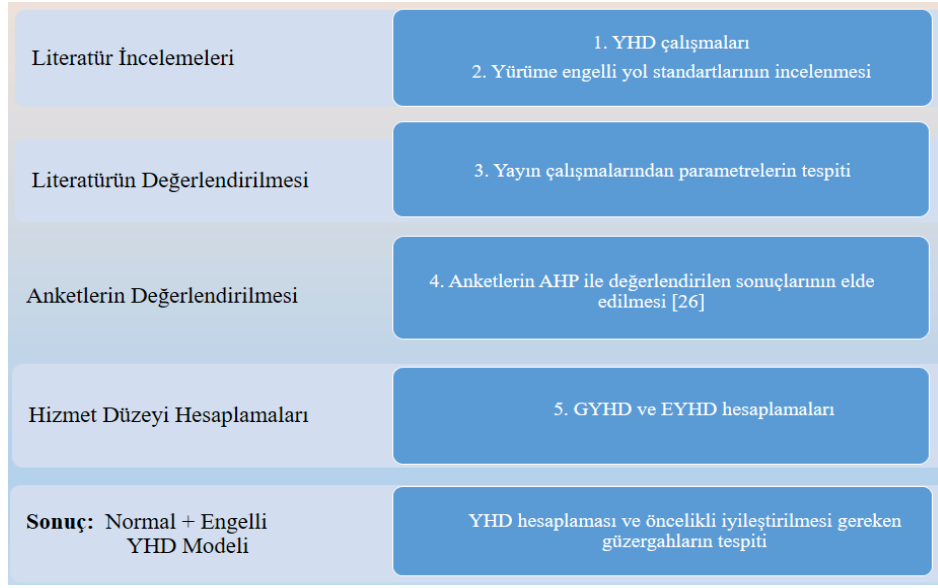
$$GYHD = \sum_{i=1}^7 C_i I_i \quad (1)$$

Burada; GYHD, genel yaya hizmet düzeyi;  $i$ , parametre sayısı;  $C$ , yaya parametre katsayısı;  $I_i$ , yaya gösterge puanını ifade etmektedir.

GYHD üzerindeki her bir parametrenin ağırlığı ( $C$ ) katsayısı ile belirlenmektedir. Bahsedilen katsayı, yapılan son 20 yıl içindeki çalışma sonuçlarından faydalanılarak tespit edilmiştir. Yaya yürüme yollarının değerlendirilmesinde kullanılan parametreler (Tablo 2) kaynak taramaları sonucu tespit edilmiştir. Parametrelerin önem sıralaması yani değerlendirme derecesi 0'dan başlanılarak 3'e kadar puanlanmıştır. Çalışmada araştırılan parametre ile ilgili anlamlı bir sonuç bulunmadıysa 0, yürüme yolları değerlendirilmesinde en etkili olan parametreye 3 puanı verilmiştir. Sonuç olarak, belirli bir parametreyi dikkate alan çalışmaların sayısı derecelendirme yöntemi olan değerlendirme derinliği ( $D$ ),  $C$ 'yi hesaplamak için kullanılmıştır.

Tablo 1. Yürüme yolu özellikleri

Yol kesimi	Y. yolu uzunluğu (m)	Y. yolu genişliği (m)	Eğim (%)	Rampa	Aydınlatma (Adet)	Engel	Donatı (Adet)	Yol kenarı Araç Parkı
1-2	44	3	2.3	Var	1.5	Yok	Yok	Yok
2-3	90	2	3.3	Var	3	Yok	1	Yok
3-4	325	1.5	4	Var	10.5	Yok	2	Yok
4-5	190	1.5	2.1	Var	6	Yok	Yok	190m
5-6	608	0.5	1.3	Var	20	Yok	Yok	608m
6-1	318	0.8	2.8	Var	10.5	Var	Yok	Yok
3-7	292	1.5	4.8	Var	9.5	Yok	Yok	Yok
7-5	292	3	1	Var	9.5	Yok	5	Yok
2-6	281	1.5	2.8	Var	9	Yok	4	Yok
6-7	234	3	3.8	Var	7.5	Yok	4	Yok



Şekil 2. Çalışma akış diyagramı

D, Tablo 2'de gösterilen her parametre ve çalışma için tanımlanmıştır. j değerlendirme derinliği ile i göstergesini dikkate alan çalışmalar Tablo 3'te ( $N_{ij}$  tablosu) sunulmuştur. Bu nedenle, her bir yaya göstergesi için C katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Denklem 2) [19].

$$C_i = \sum_{j=1}^3 D_j N_{ij} \quad (2)$$

Burada; C, yaya gösterge katsayısı; i, gösterge numarası; j, değerlendirme derinliği sayısı; D, değerlendirme derinliği ( $D_0=0$  hiç,  $D_1=1$  az,  $D_2=2$  orta,  $D_3=3$  çok etkili); N, bulunduğu çalışma sayısını ( $N_{ij}$ ; j değerlendirme derinliğine sahip i göstergesini ifade eden çalışma sayısı) ifade etmektedir.

Yaya göstergelerinin katsayıları kaynak taramaları sonuçlarından Tablo 3'deki değerler kullanılarak Denklem 2'deki gibi hesaplanmıştır ve Denklem 4'te diğer parametreler de aynı şekilde hesaplanıp sonuç değerleri verilmiştir.

$$C_1 = 1 \times 2 + 2 \times 4 + 3 \times 11 = 43 \quad (3)$$

$$C_2 = 17; C_3 = 11; C_4 = 22; C_5 = 31; C_6 = 30; C_7 = 9 \quad (4)$$

Bir sonraki aşamada GYHD için yaya gösterge puanının hesaplanması gerekmektedir. Bu değer, her bir parametre için mevcut yürüme yollarının durumu ile standartların karşılaştırılması ile hesaplanmıştır.  $I_i$  0 ile 1 arasında bir değerdir. Buna göre, mevcut koşullar ile standartlar arasındaki en iyi uygunluk değeri 1 iken, 0 olması gereken standarta uyulmadığını ifade etmektedir.  $I_i$  hesaplanırken standart ve kılavuzlarda yer alan değerler dikkate alınmıştır.

Tablo 2. Literatürde yaya hizmet düzeyi değerlendirilmesinde kullanılan parametreler [27]

Yapılan Çalışmalar	Kriterler						
	Yaya yolu genişliği	Yaya yolu eğimi	Rampa	Aydınlatma Varlığı	Yaya yoğunluğu	Fiziksel engeller	Kentsel donatı varlığı
[28]	0	2	0	1	3	3	0
[29]	2	1	0	0	0	3	0
[30]	0	0	1	0	0	0	0
[31]	3	2	0	2	0	0	0
[32]	3	0	0	2	0	0	0
[33]	3	0	0	0	3	2	0
[34]	3	0	0	1	0	2	1
[35]	0	0	0	1	2	2	0
[36]	2	1	0	0	3	0	0
[37]	0	0	0	1	2	0	0
[38]	1	0	0	0	0	0	0
[39]	3	0	1	0	3	2	1
[40]	2	0	0	1	0	0	0
[41]	0	0	0	1	2	0	0
[42]	0	1	0	1	2	0	0
[43]	0	1	1	1	3	2	0
[44]	0	0	0	1	0	0	0
[45]	3	1	1	1	3	2	1
[46]	3	0	1	1	0	2	0
[47]	0	0	0	0	0	2	1
[48]	0	0	0	1	0	2	1
[49]	3	0	1	0	0	2	0
[50]	3	2	0	1	0	0	1
[51]	1	0	0	0	0	0	0
[52]	0	0	0	0	1	0	0
[53]	3	2	1	1	0	0	1
[54]	2	1	0	0	0	0	0
[55]	0	1	0	1	2	0	1
[56]	3	1	2	1	0	0	1
[57]	0	1	2	1	0	2	0
[58]	0	0	0	1	2	2	0

**Tablo 3.** N<sub>ij</sub>; j değerlendirme derinliğine sahip i göstergesini ifade eden çalışma sayısı

Değerlendirme Derinliği	Parametreler						
	Yaya yolu genişliği	Yaya yolu eğimi	Rampa	Aydınlatma varlığı	Yaya yoğunluğu	Fiziksel engeller	Kentsel donatı varlığı
1	2	9	7	18	1	0	9
2	4	4	2	2	6	12	0
3	11	0	0	0	6	2	0

### 2.2.1.1 GYHD puanının belirlenmesi

#### 2.2.1.1.1 Yaya yolu genişliği

Yaya yolu genişliği; yürüme konforu açısından yaya yolları minimum 1,5 metre optimum 2 metre genişlikte tasarlanmalıdır. Bu genişlik değerleri otobüs duraklarının bulunduğu kısımda 3, dükkân önlerinde ise en az 3.5 metre olmalıdır [26,59-63]. Bu standarttan yola çıkarak yürüme yollarının olması gerekli genişliği ideal genişlik olan 2 metre olarak alınmıştır. Mevcut yürüme yollarındaki genişlik ise farklılık göstermektedir. Kaldırım üzerindeki engellerden (ağaç, aydınlatma direği vb.) dolayı bazı kesimlerde etkili yürüme alanı da azalmaktadır. Bu nedenle yaya yolu genişliği parametresi için yaya gösterge puanı **Denklem (5)** ile hesaplanmaktadır.

$$I_1=W/2 \text{ m} \quad (5)$$

Burada; I<sub>1</sub>, genişlik parametresi için yaya gösterge puanını; W, yürüme yolu genişliğini ifade etmektedir. Örneğin; mevcut etkili genişlik yani W değeri 1 metre ise I<sub>1</sub> değeri 0,5 olarak hesaplanmaktadır. Genişlik değerinin 2 metreden fazla olması durumunda I<sub>1</sub> değeri 1'den fazla hesaplanacaktır. Bu durumlarda da ideal şart sağlandığı için; 1'i geçen değerlerde 1 olarak alınmıştır.

#### 2.2.1.1.2 Yaya yolu eğimi

Eğim; tekerlekli sandalyelerin rahat hareket edebilmeleri için yürüme yollarının boyuna eğimi en fazla %5 olmalıdır. İsveç Yerel Yönetimler Birliği, %2.5 eğimin makul seviyede olduğunu ve hareketleri zorlaştırmadığını, bu eğimden fazla eğimlerin bazı tekerlekli sandalye kullanıcıları için sorun teşkil edebileceğini ileri sürmüştür [64]. Yaya kaldırımlarında özellikle tekerlekli sandalye kullanıcıları açısından problem oluşmasını engellemek için kaldırımdaki enine eğimin %2'den küçük olması gerekmektedir [19,26,65-66].

Yaya yolu eğimi parametresi için yaya gösterge puanı **Denklem (6)** [19] ile hesaplanmaktadır.

$$I_2=C/N \quad (6)$$

Burada; C, standart eğimli kaldırım alanı (m<sup>2</sup>),

$$N = \begin{cases} (\text{Yürüme yolu uzunluğu} - \text{kavşak uzunluğu}) \times 2 & W < 2 \text{ m} \\ (\text{Yürüme yolu uzunluğu} - \text{kavşak uzunluğu}) \times W & W \geq 2 \text{ m} \end{cases}$$

W, yürüme yolu genişliğini (m) ifade etmektedir.

Örneğin; 44 metre uzunluğunda, 3 metre genişliğindeki bir yaya yolunun C değeri 132 m<sup>2</sup>, N değeri de 132 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmaktadır. Buradan I<sub>2</sub> değeri 1 olarak bulunacaktır. 325 metre uzunluğunda, 1,5 metre genişliğindeki bir yaya yolunun C değeri 487,5 m<sup>2</sup>, N değeri de 650 m<sup>2</sup> olarak hesaplanmaktadır. Buradan I<sub>2</sub> değeri 0,75 olarak bulunacaktır. Bahsedilen işlem adımları tüm güzergâhlar için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

#### 2.2.1.1.3 Rampa

Kaldırım üzerinde bulunan seviye farkları 1.3 cm'yi geçtiği durumlarda TS 12576 tasarım standartına göre bu bölgeye rampa yapılması gerekmektedir. Yapılan rampanın eğimi %8'i geçmemelidir. Kaldırım güzergâhı üzerine yapılacak rampa genişliğinin asgari 90 cm olması, rampaların başlangıç ve bitişlerinde tekerlekli sandalyenin manevra yapabileceği 150 cm x 150 cm'lik bir alanın olması gerekmektedir [26,61,63,65-67].

Yaya yolu rampa parametresi için yaya gösterge puanı **Denklem (7)** [19] ile hesaplanmaktadır. Burada I<sub>3</sub> değerinin anlamı **Denlem (8)** ile ifade edilmektedir.

$$P=C/N \quad (7)$$

$$I_3 = \begin{cases} 1 & P \geq 1 \\ P & P < 1 \\ 1 & \text{ihtiyaç yok} \end{cases} \quad (8)$$

Burada; C, standart rampa sayısını; N, yürüme yolunun rampa ihtiyacını ifade etmektedir. Çalışma alanı yürüme yollarında rampa sayıları yeterli olduğundan dolayı rampa parametresi için yaya gösterge puanı 1 olarak alınmıştır.

#### 2.2.1.1.4 Aydınlatma varlığı

Yaya geçitlerinin bulunduğu bölge üstten ve iyi şekilde aydınlatmalı, bu aydınlatma yol aydınlatmasından ayırt edilebilir değişiklikte ayrı ve daha aydınlık bir aydınlatma olmalıdır [65].

Aydınlatma varlığı parametresinin yaya gösterge puanı (I<sub>4</sub>) 0 ile 1 arasında olacak şekilde, yürüme yollarında bulunan aydınlatma kalitesine göre gözlem yoluyla karar verilmiştir. Batı Yerleşkesinde bulunan yürüme yollarında aydınlatma kalitesi yeterli olduğundan dolayı bu değer 1 olarak alınmıştır.

#### 2.2.1.1.5 Yaya yoğunluğu

Yaya yolunda bulunan yaya yoğunluğu parametresi için yaya gösterge puanı (I<sub>5</sub>) değeri 0 ile 1 arasında olacak şekilde, yürüme yollarında bulunan ortalama yaya yoğunluğu durumuna göre gözlem yoluyla karar verilmiştir.

#### 2.2.1.1.6 Fiziksel engeller

Yaya yolu genişliği minimum 1.5 metre, optimum 2.0 metre genişlikte tasarlanmalıdır [26,59-63]. I<sub>6</sub> yaya gösterge puanı **Denklem (9)** yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I_6=W_E/W \quad (9)$$

Burada;  $W_E$ , etkili genişliği (m);  $W$ , yürüme yolu genişliğini (m) ifade etmektedir.

Örneğin yaya yürüme yolunun genişliğinin 2 metre fakat yolda bulunan ağaç, aydınlatma direği ve levhalar gibi elemanlardan kaynaklı ortalama etkili yürüme genişliği 0,8 metrelere kadar düşmektedir. Bu durumda fiziksel engel parametresinin yaya gösterge puanı ( $I_6$ ) 0,8/2'den 0,4 olarak hesaplanacaktır.

#### 2.2.1.1.7 Kentsel donatı varlığı

Kamusal dış mekânlara şekil veren donatı elemanları (merdivenler, otobüs durakları, kaldırımlar, rampalar, bordürler, oturma elemanları, gölgelendirme elemanları, plastik elemanlar, büfe/kiokslar, aydınlatma elemanları, caydırıcı ve sınırlayıcılar, çöp kutuları, yönlendirme ve işaret levhaları, peyzaj vb.) gibi unsurlar fiziksel ve görsel özellikleriyle çevresel imge üzerinde son derece etkilidirler [68]. Bu nedenle güzergâh tercihinde etkili bir parametredir. Çalışmada, yaya yürüme yollarında yaya hizmet düzeyi puanının belirlenmesinde ( $I_7$ ) gözlem yoluyla 0'dan 1'e kadar puanlandırılmıştır. Örneğin, kentsel donatı bulunmayan güzergâhlara 1 puanı verilerken, bank gibi yürüme yolu üzerinde bulunan oturma elemanı yoğunluğu durumuna göre 1'den küçük değerler verilmiştir.

Genel yürüme koşullarını ve engelli yürüme koşullarını birlikte değerlendirmek için GYHD yüzdesi ile EYHD yüzdesinin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla; 7 etki parametresinin yer aldığı GYHD yüzdesi, [Denklem \(10\)](#) ile hesaplanmıştır [19].

$$GYHD\% = \frac{GYHD}{\sum_{i=7}^7 C_i} \times 100 \quad (10)$$

Burada; GYHD%, Genel yaya hizmet düzeyinin yüzdesi; GYHD, genel yaya hizmet düzeyi;  $i$ , gösterge sayısı;  $C$ , genel yaya göstergesi katsayısını ifade etmektedir.

#### 2.2.2 EYHD'nin belirlenmesi

Engelli yaya yürüme yollarının hizmet düzeyini belirlemek amacıyla, puan sistemine dayalı GYHD denklemi [19] kullanılmıştır ([Denklem 11](#)).

$$EYHD = \sum_{i=5}^5 C_i EI_i \quad (11)$$

Burada; EYHD, engelli yaya hizmet düzeyini;  $i$ , parametre sayısını;  $C$ , yaya parametre katsayısını;  $EI$ , engelli yaya gösterge puanını ifade etmektedir.

Çalışmada yürüme engelli bireylere yapılan anket yardımıyla elde edilen etkili parametrelerin ağırlıkları [26] kullanılmıştır. En önemli parametre kaldırımda engel olması olarak gösterilmiştir; diğerleri sırasıyla kaldırım genişliği, kaldırımdan yola geçiş rampası, boyuna eğim ve yol kenarı araç parkıdır. [Denklem 10](#)'da bulunan  $C$  katsayısı yerine anket sonucu elde edilen parametre ağırlık değerleri normalize edilerek kullanılmıştır.

Bir sonraki aşamada EYHD için engelli yaya gösterge puanının hesaplanması gerekmektedir. Bu değer, her bir parametre için mevcut yürüme yollarının durumu ile standartların karşılaştırılması ile hesaplanmıştır. Hesaplama, genel yaya gösterge puanı hesaplama adımları

kullanılmıştır.  $EI_i$  0 ile 1 arasında bir değerdir. Buna göre, mevcut koşullar ile standartlar arasındaki en iyi uygunluk değeri 1 iken, 0 olması gereken standarta uyulmadığını ifade etmektedir.  $EI_i$  hesaplanırken standart ve klavuzlarda yer alan değerler dikkate alınmıştır.

#### 2.2.2.1 EYHD puanının belirlenmesi

##### 2.2.2.1.1 Yaya yolu üzerinde bulunan engeller

Yaya yolu genişliği; engelsiz bir yaya kaldırımı en az 1.5 metre, en ideal 2.0 metre genişlikte olmalıdır [26,59-63].  $I_6$  değeri [Denklem \(12\)](#) yardımıyla hesaplanabilir.

$$EI_1 = W_E / W \quad (12)$$

Burada;  $W_E$ , etkili genişliğini (m);  $W$ , yürüme yolu genişliğini (m) ifade etmektedir.

Yaya yolu genişliği ( $EI_2$ ), rampa ( $EI_3$ ) ve eğim ( $EI_4$ ) parametrelerinin engelli hizmet puanı, genel yaya hizmet puanının hesaplanmasında kullanılan denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

##### 2.2.2.1.2 Yaya yol kenarı araç parkı

Yoğun trafik hacmi etkisi ile birlikte yol kenarına kural dışı yapılan araç parkları görüşü ve yürüme alanını kısıtladığı için engelli bireylerin hareketlerini de olumsuz yönde etkilemektedir. Polat [68] yapmış olduğu anket çalışmasında engelli bireylerin %19'nu yol kenarı park etmiş araçların, hareketlerini kısıtladığını belirtmiştir.

Çalışmada yol kenarı araç park parametrenin etkisi  $EI_5$ , [Denklem \(13\)](#) ile hesaplanmıştır.

$$EI_5 = L_P / L \quad (13)$$

Burada;  $L_P$ , yürüme yolu boyunca araç park edilmiş yaya yolu uzunluğunu (m);  $L$ , yaya yolu uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Örneğin 100 metre uzunluğundaki yaya yolunun 50 metresi boyunca araç parkı mevcutsa  $EI_5$  değeri 0,5 olarak hesaplanacaktır.

Genel yürüme koşullarını ve engelli yürüme koşullarını birlikte değerlendirmek için GYHD yüzdesi ile EYHD yüzdesinin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla; 5 etki parametresinin yer aldığı EYHD yüzdesi [Denklem \(14\)](#) ile hesaplanmıştır [19].

$$EYHD\% = \frac{EYHD}{\sum_{i=5}^5 C_i} \times 100 \quad (14)$$

Burada; EYHD%, Engelli yaya hizmet düzeyinin yüzdesini; EYHD, engelli yaya hizmet düzeyini;  $i$ , gösterge sayısını;  $C$ , genel yaya göstergesi katsayısını ifade etmektedir.

[Denklem \(15\)](#) ile GYHD ile EYHD sonuçları birleştirilerek YHD hesaplanmıştır.

$$YHD = (7 \times GYHD\% + 5 \times EYHD\%) / 12 \quad (15)$$

**Tablo 4.** GYHD için hesaplanan C ve I değerleri

Yol Kesimi	Yaya yolu genişliği		Yaya yolu eğimi		Rampa		Aydınlatma varlığı		Yaya yoğunluğu		Fiziksel Engel		Kentsel Donatı	
	C <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	I <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	I <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	I <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	I <sub>7</sub>
1-2	43	1	17	1	11	1	22	1	31	1	30	1	9	1
2-3	43	1	17	1	11	1	22	1	31	0.8	30	1	9	0.8
3-4	43	0.75	17	0.75	11	1	22	1	31	0.2	30	1	9	0.6
4-5	43	0.75	17	0.75	11	1	22	1	31	1	30	1	9	1
5-6	43	0.25	17	0.25	11	1	22	1	31	0.6	30	1	9	1
6-1	43	0.4	17	0.4	11	1	22	1	31	0.4	30	0	9	1
3-7	43	0.75	17	0.75	11	1	22	1	31	0.1	30	1	9	1
7-5	43	1	17	1	11	1	22	1	31	0.1	30	1	9	0
2-6	43	0.75	17	0.75	11	1	22	1	31	0.5	30	1	9	0.2
6-7	43	1	17	1	11	1	22	1	31	0.1	30	1	9	0.2

**Tablo 5.** EYHD için hesaplanan C ve I değerleri

Yol Kesimi	Yaya yolu Engel		Yaya yolu genişliği		Rampa		Eğim		Yol kenarı park	
	C <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	I <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	I <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	I <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	I <sub>5</sub>
1-2	35	1	24	1	10	1	4	1	3	1
2-3	35	1	24	1	10	1	4	1	3	1
3-4	35	1	24	0.75	10	1	4	0.75	3	1
4-5	35	1	24	0.75	10	1	4	0.75	3	0
5-6	35	1	24	0.25	10	1	4	0.25	3	0
6-1	35	0	24	0.4	10	1	4	0.4	3	1
3-7	35	1	24	0.75	10	1	4	0.75	3	1
7-5	35	1	24	1	10	1	4	1	3	1
2-6	35	1	24	0.75	10	1	4	0.75	3	1
6-7	35	1	24	1	10	1	4	1	3	1

Burada; YHD, yaya hizmet düzeyini, GYHD%, genel yaya hizmet düzeyinin yüzdesini; EYHD%, engelli yaya hizmet düzeyinin yüzdesini ifade etmektedir.

### 3 Bulgular ve tartışma

Metot kısmında bahsedilen işlem adımları sonucunda GYHD ve EYHD modelleri için hesaplanan C ve I değerleri sırasıyla **Tablo 4** ve **Tablo 5**'te verilmiştir.

Hesaplan C ve I değerleri **Denklem 1**, **Denklem 8** ve **Denklem 12**'de yerine yazılarak GYHD, EYHD ve YHD yüzdeleri ile sınıfları **Tablo 6**'daki gibi elde edilmiştir. A hizmet düzeyi (%80-100) kaldırımı en iyi kalitede olduğunu, B hizmet düzeyi (%60-79) kaldırımın yüksek kalitede olduğunu, C hizmet düzeyi (%40-59) kaldırımın ortalama kalitede ve iyileştirme yapılması gerektiğini, D hizmet düzeyi (%20-39) kaldırım düşük kalitede olduğunu, E hizmet düzeyi (%1-19) kaldırımın en düşük kalitede olduğunu, F hizmet düzeyi (%0) kaldırımın kullanılamaz olduğunu ifade etmektedir.

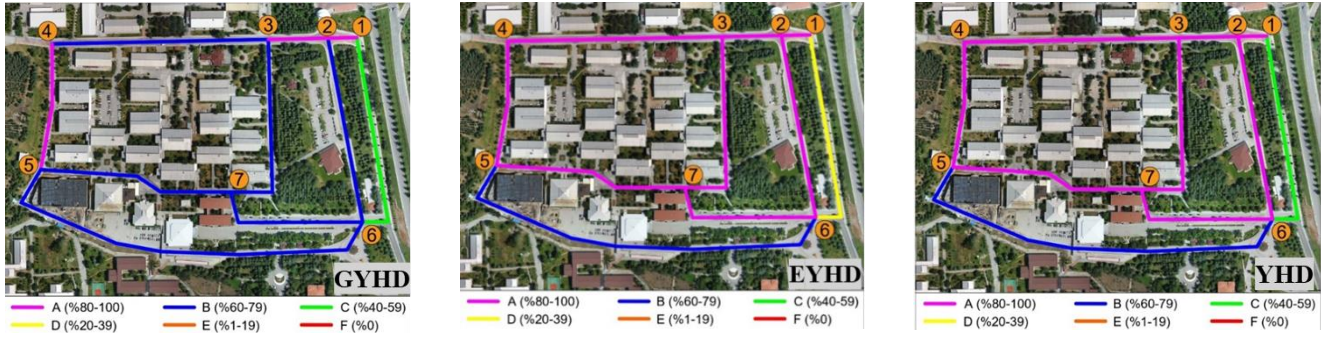
**Tablo 6** sonuçlarına göre; güzergâhların GYHD, EYHD ve YHD sınıfları **Şekil 3**'te gösterilmiştir. GYHD'nde; C sınıfı olarak hesaplanan 6-1 arası yol kesimi EYHD için D sınıfı olarak hesaplanmıştır. Bu da bize kaldırımların yaya yürümesi için uygun hizmet düzeyine sahip olduğu durumlarda engelliler için uygun olmaya bileceğini göstermektedir. Bu nedenle her yaya kaldırımı engelliler için de uygundur demek doğru olmayacaktır.

### 4 Sonuçlar

Engelli yayalar kentsel nüfusun bir parçası olduklarından, onlar için uygun altyapı sağlanmalıdır. Bununla birlikte, daha önceki çalışmalar sadece normal yayalar için YHD modeli oluşturmuşlardır. Mevcut çalışma ise, engelli bireyleri de göz önünde bulundurarak ve daha bütüncül bir yaklaşım metodu kullanarak bu eksiklikleri gidermeye çalışmıştır. Bu bağlamda öncelikle bedensel engelliler olmak üzere tüm yayaların ihtiyaçlarının karşılanmasına dikkat edilmiştir.

**Tablo 6.** Batı Kampüsü yol kesimleri için hizmet düzeyleri

Yol Kesimi	Genel Yaya Hizmet Düzeyi		Engelli Yaya Hizmet Düzeyi		Yaya Hizmet Düzeyi	
	GYHD (%)	SINIF	EYHD (%)	SINIF	YHD (%)	SINIF
1-2	100	A	100	A	100	A
2-3	95	A	100	A	97	A
3-4	73	B	90	A	80	A
4-5	90	A	86	A	88	A
5-6	65	B	68	B	66	B
6-1	48	C	31	D	40	C
3-7	74	B	90	A	81	A
7-5	77	B	100	A	86	A
2-6	77	B	90	A	82	A
6-7	78	B	100	A	87	A



Şekil 3. Güzergâhların yaya hizmet düzeyi sınıfları

Ayrıca kullanılan yöntem, çok çeşitli kılavuzlardan ve literatürden çıkarılan parametreleri içermektedir. Bir başka deyişle, önerilen model evrensel standartların birleşimidir; sonuçlar farklı bölgelerde de uygulanabilir.

Çalışma sonunda; YHD modeline göre C hizmet düzeyi olarak hesaplanan 6-1 yol kesiminde iyileştirme yapılması gerekmektedir. Bu kesimde öncelikle kaldırım genişletmesi (0,8 m) çalışması yapılmalı veya üzerinde bulunan yayaların yürümesini sınırlandıran engeller ortadan kaldırılarak etkili yürüme genişliği artırılmalıdır. B hizmet düzeyi olarak hesaplanan 5-6 yol kesiminde de öncelikle kaldırım genişletmesi (0,5 m) çalışması yapılmalı ve yol kenarı araç parklanması problemi ortadan kaldırılmalıdır. Yol kenarında bulunda araç parkı yayaların görüş mesafesini kısıtlayarak güvenliklerini tehlikeye atmaktadır. Model denemesi; SDÜ Batı Yerleşkesinde yapıldığından dolayı hizmet düzeyi sınıfları makul ölçüde çıkmıştır. Çünkü yoğunlukla, kampüs içerisinde bulunan yürüme yolları standartları uygun olarak inşa edilmiştir. Aynı modelin şehir merkezinde uygulaması gerçekleştirildiği takdirde daha kötü hizmet düzeyi sınıflarının elde edileceği düşünülmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %0**

#### Kaynaklar

- [1] B. Landis, V. Vattikuti, R. Ottenberg, D. McLeod and M. Guttenplan, Modeling the roadside walking environment: A pedestrian level of service. Transportation Research Record, 1773(1), 82–88, 2001.
- [2] J.J. Fruin, Pedestrian planning and design. Metropolitan Associations of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [3] Y. Tanaboriboon and J.A. Guyano, Level-of-service standards for pedestrian facilities in Bangkok: A case study. ITE Journal, 59(11), 39–41, 1989.
- [4] Highway Capacity Manual, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, 2000.
- [5] I. Mateo-Babiano and H. Ieda, Street space sustainability in Asia: The role of the Asian pedestrian and street culture. In Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, 1915–1930, 2007.
- [6] R. Singh, Factors affecting walkability of neighborhoods. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 216, 643-654, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.048>
- [7] K. Lautso and P. Murola, A study of pedestrian traffic in Helsinki: Methods and results. Traffic Engineering Control, 15(9), 446–449, 1974.
- [8] S. Sarkar, Determination of service levels for pedestrians, with European example. Transportation Research Record, 1405, 35–42, 1993.
- [9] C.J. Khisty, Evaluation of pedestrian facilities: Beyond the level-of-service concept. Transportation Research Record 1438, 45–50, 1994.
- [10] P.N. Seneviratne and J.F. Morrall, Level of service on pedestrian facilities. Transportation Quarterly., 39(1), 109–123, 1985a.
- [11] C. Henson, Levels of service for pedestrians. ITE Journal, 70(9), 26–30, 2000.
- [12] G.P. Benz, Pedestrian time-space concept: A new approach to the planning and design of pedestrian facilities, Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas, New York, 1986.
- [13] B. Pushkarev and J.M. Zupan, Urban space for pedestrians: A report of the regional plan association, MIT Press, Cambridge, 127–129, 1975.
- [14] W.H.K. Lam, J.F. Morrall and H. Ho, Pedestrian flow characteristics in Hong Kong. Transportation Research Record 1487, Transportation Research Board, Washington, DC, 56–62, 1995.
- [15] L. Dixon, Bicycle and pedestrian level-of-service performance measures and standards for congestion management systems. Transportation Research Record 1538, 1–9, 1996.
- [16] S. Jensen, Pedestrian and bicycle level of service on roadway segments. Transportation Research Record 2031, 43–51, 2007.
- [17] S. Sarkar, Qualitative evaluation of comfort needs in urban walkways in major activity centers. Transportation Research Board, Washington, DC, 2002.
- [18] J.Y.S. Lee and W.H.K. Lam, Levels of service for stairway in Hong Kong underground stations. Journal of Transportation Engineering, 129(2), 196–202, 2003.
- [19] Z. Asadi-Shekari, M. Moeinaddini and M. Zaly Shah, Disabled pedestrian level of service method for

- evaluating and promoting inclusive walking facilities on urban streets. *Journal of Transportation Engineering*, 139(2), 181-192, 2013.
- [20] National Cooperative Highway Research Program. (NCHRP), Multimodal level of service analysis for urban streets. Transportation Research Board, Washington, DC, 2008.
- [21] T.A. Petritsch, et al., Pedestrian level-of-service model for urban arterial facilities with sidewalks. *Transportation Research Record*, 2006.
- [22] J.S. Miller, J. Bigelow and N.J. Garber, Calibrating pedestrian level-of-service metrics with 3-D visualization. *Transportation Research Record* 1705(1), 9–15, 2000.
- [23] D. Mozer, Calculating multi-mode levels-of-service. International Bicycle Fund, Seattle, WA, 1994.
- [24] N. Gallin, Quantifying pedestrian friendliness—guidelines for assessing pedestrian level of service. *Road & Transport Research*, 10(1), 47, 2001.
- [25] P.N. Seneviratne and J.F. Morrall, Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. *Transportation Planning and Technology*, 10(2), 147–159, 1985b.
- [26] M. Saplıoğlu and A. Ünal, Yürüme engelli bireyler için kentiçi ulaşımında güzergâh iyileştirme önerisi: pilot bölge çalışması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(1), 289-299, 2019.
- [27] M.Ü. Çilek, Kamusal Alanlara Erişimde Optimum Yaya Güzergâhı Konforunu Belirlmeye Yönelik Kavramsal Bir Yaklaşım. *Megaron*, 15(3), 2020.
- [28] S. Handy and K. Clifton, Evaluating neighborhood accessibility: Possibilities and practicalities. *Journal of Transportation and Statistics*, 4(2/3), 67–78, 2001.
- [29] C. Jim and S.S. Chen, Comprehensive greenspace planning based on landscape ecology principles in compact Nanjing city, China. *Landscape and Urban Planning*, 65(3), 95-116, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00244-X)
- [30] A. Van Herzele and T. Wiedemann, A monitoring tool for the provision of accessible and attractive urban green spaces. *Landscape and Urban Planning*, 63(2), 109-126, 2003.
- [31] E. Shay, S. Spoon and A. Khattak, Walkable environments and walking activity. Report to the Southeastern Transportation Center, 1-20, 2003.
- [32] C. Collins, M. H., Ng, K. Broomhall, R.J. Donovan, A. Lange, M. Knuiman, and K. Douglas, Increasing walking: how important is distance to, attractiveness, and size of public open space?. *American Journal of Preventive Medicine*, 28(2), 169-176, 2005.
- [33] A. Barnett and E. Cerin, Individual calibration for estimating free-living walking speed using the MTI monitor. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(4), 761-767, 2006. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000210206.55941.b2>
- [34] Ş. Hepcan, M.B. Özkan, A. Kaplan, E.V. Küçükerbaş, B. Kara, B. Deniz and İ. Altuğ, Yaya erişiminde süreklilik sorunu ve çözüm olanaklarının Bornova Kent Merkezi örneğinde araştırılması. 43(2), 121–132, 2006.
- [35] B. Gültekin and M.F. Altunkasa, Kent içi yolların yaya kullanımına yönelik değerlendirilmesinde çözümlemeli bir yaklaşım: Adana örneği. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 17(3), 2008.
- [36] X. Zhu and C. Lee, Walkability and safety around elementary schools. *American Journal of Preventive Medicine*, 34(4), 282-290, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2008.01.024>
- [37] T. Sugiyama and C. Ward Thompson, Associations between characteristics of neighbourhood open space and older people's walking. *Urban Forestry & Urban Greening*, 7(1), 41–51, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2007.12.002>
- [38] D. Van Dyck, B. Deforche, G. Cardon, and I. De Bourdeaudhuij, Neighbourhood walkability and its particular importance for adults with a preference for passive transport. *Health & Place*, 15(2), 496-504, 2009.
- [39] C. Millington, C. Ward Thompson, D. Rowe, P. Aspinall, C. Fitzsimons, N. Nelson and N. Mutrie, Development of the scottish walkability assessment tool (SWAT). *Health & Place*, 15(2), 474-481, 2009.
- [40] J. Schipperijn, O. Ekholm, U.K. Stigsdotter, M. Toftager, P. Bentsen, F. Kamper-Jørgensen and T.B. Randrup, Factors influencing the use of green space: Results from a Danish national representative survey. *Landscape and Urban Planning*, 95(3), 130-137, 2010.
- [41] C.E. Kelly, M.R. Tight, F.C. Hodgson, F.C. and M.W. Page, A comparison of three methods for assessing the walkability of the pedestrian environment. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1500-1508, 2011.
- [42] M. Moniruzzaman and A. Páez, A model-based approach to select case sites for walkability audits. *Health & Place*, 18(6), 1323-1334, 2012.
- [43] D.B. Bhattacharyya and S. Mitra, Making siliguri a walkable city. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2737-2744, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.307>
- [44] W.M. Wey and Y.H. Chiu, Assessing the walkability of pedestrian environment under the transit-oriented development. *Habitat International*, 38, 106-118, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.05.004>
- [45] M. Ünal, Aktif yeşil alanların rekreasyonel hizmet etkinliğinin saptanması: Çukurova ilçesi örneği. *Çukurova Üniversitesi Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye*. 496, 2014.
- [46] J. Zakaria, N. Ujang, Comfort of walking in the city center of Kuala Lumpur. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 170, 642-652, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.066>
- [47] E. Cubukcu, B. Hepguzel, Z. Onder and B. Tumer, Active living for sustainable future: A model to measure “walk scores” via geographic information systems. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 168, 229–237, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.10.228>
- [48] W. Erna and S.L. Amin, Convenience component of walkability in Malang City case study the street

- corridors around city squares. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 227, 587-592, 2016.
- [49] K. Singh and P.K. Jain, Methods of assessing pedestrian level of service. *Journal of Engineering Research and Studies*, 2(1), 116–124, 2011.
- [50] M. Aghaabbasi, M. Moeinaddini, M. Zaly Shah and Z. Asadi-Shekari, A new assessment model to evaluate the microscale sidewalk design factors at the neighbourhood level. *Journal of Transport & Health*, 5, 97-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.08.012>
- [51] F. Moura, P. Cambra, and A.B. Gonçalves, Measuring walkability for distinct pedestrian groups with a participatory assessment method: A case study in Lisbon. *Landscape and Urban Planning*, 157, 282-296, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.07.002>
- [52] R. Rafiemanzelat, M.I. Emadi and A.J. Kamali, City sustainability: the influence of walkability on built environments. *Transportation Research Procedia*, 24, 97-104, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.074>
- [53] M. Aghaabbasi, M. Moeinaddini, M. Zaly Shah, Z. Asadi-Shekari and M. Arjomand Kermani, Evaluating the capability of walkability audit tools for assessing sidewalks. *Sustainable Cities and Society*, 37, 475-484, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.001>
- [54] A. Gharebaghi, M.A. Mostafavi, S. Chavoshi, G. Edwards and P. Fougeyrollas, The role of social factors in the accessibility of urban areas for people with motor disabilities, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7(4), 131, 2018.
- [55] M. Unal and C. Uslu, Evaluating and optimizing urban green spaces for compact urban areas: Cukurova district in Adana, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 70, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijgi7020070>
- [56] M. Aghaabbasi, M. Moeinaddini, Z. Asadi-Shekari and M.Z. Shah, The equitable use concept in sidewalk design. *Cities*, 88, 181-190, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.10.010>
- [57] K. Shaaban, Assessing sidewalk and corridor walkability in developing countries. *Sustainability*, 11(14), 3865, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11143865>
- [58] A.A. Zuniga-Teran, P. Stoker, R.H. Gimblett, B.J. Orr, S.E. Marsh, D.P. Guertin and N.V. Chalfoun, Exploring the influence of neighborhood walkability on the frequency of use of greenspace. *Landscape and Urban Planning*, 190, 2019.
- [59] Özida (Başbakanlık Özürlüler İdaresi Başkanlığı), Herkes için ulaşılabilirliğin iyileştirilmesi: örnek uygulama rehberi, Başbakanlık Özürlüler İdaresi Başkanlığı, 48, Ankara, 2008.
- [60] Özida (Başbakanlık Özürlüler İdaresi Başkanlığı), Yerel yönetimler için ulaşılabilirlik temel bilgiler teknik el kitabı, 49, Ankara, 2010.
- [61] E. Maraz, Özürlülerin kent içinde erişebilirliğini etkileyen standartlar; (Mecidiköy ve Yenibosna metrobüs duraklarının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [62] B. Sirel, O. Boyacıgil, M. Duymuş, N. Konaklı, F. Altunkasa and C. Uslu, Çukurova Üniversitesi yerleşkesi açık alanlarının fiziksel engelliler bakımından ulaşılabilirliğinin değerlendirilmesi. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture* 27(1), 53-72, 2012.
- [63] N. Kuter and M. Çakmak, Kamusal dış mekanlarda engelliler için tasarım: Ankara, Seğmenler Parkı örneği, *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 93-110, 2017.
- [64] C. Koca, Engelsiz şehir planlama bilgilendirme rapor, İstanbul: Dünya Engelliler Vakfı, 2010.
- [65] Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Şehir İçi Yollar – Özürlü ve Yaşlılar İçin Sokak, Cadde, Meydan ve Yollarda Yapısal Önlemler ve İşaretlemelerin Tasarım Kuralları. Hazırlık Grubu: Şehir İçi Yollar Özel Daimi Komitesi, TS No:12576, 1999.
- [66] R. Tiyek, B.H. Eryiğit and B.A. Emrah, Engellilerin erişilebilirlik sorunu ve tse standartları çerçevesinde bir araştırma. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(2), 225-261, 2016.
- [67] ADAAG, American disability act accessibility guideline, ABD Standards, Washington, 2004.
- [68] L. Güremen, Kent kimliği ve estetiği yönüyle kentsel donatı elemanlarının Amasya Kenti özelinde araştırılması. *Social Sciences*, 6(2), 254-291, 2011.







# Preparation of high solid loading and low viscosity ceramic slurry for dip-coating method

## Daldırarak kaplama yöntemi için katı yüklemesi yüksek ve viskozitesi düşük seramik kaplama çözeltilisinin hazırlanması

Bercesto Beyribey<sup>1,\*</sup> , Joshua Persky<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Low Emissions Resources Global Ltd., Unit 2 Block A, Mid Craigie Industrial Estate, Mid Craigie Road, Dundee UK, DD4 7RH

### Abstract

BaCe<sub>0.7</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.16</sub>Zn<sub>0.04</sub>O<sub>3-δ</sub> (BCZYZ) ceramic slurry has been prepared with different solid loading and the maximum solid loading of the slurry has been predicted as 25 vol.% using the Krieger-Dougherty equation. The slurry with the maximum solid loading has been formulated and applied as an electrolyte on porous NiO/BCZYZ tubular supports by the dip-coating method. Cells sintered at 1500°C for 10h have been characterised by Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis. The 30µ thick, very dense electrolyte layer has successfully been achieved with some closed pores.

**Keywords:** Ceramic electrolyte, Dip-coating, NiO/BCZYZ, SOFC

### 1 Introduction

Solid oxide fuel cells (SOFCs) and solid oxide electrolyzers (SOECs) are very efficient energy conversion devices, which are normally operated at high temperatures in the range of 600 - 1000 °C. Ni-YSZ based supports are mainly used in SOFCs and SOECs owing to its high conductivity, electrochemical activity, and low electrode polarization [1-3]. Recently, the research has been focused on Ni-BCZY based supports. Proton conducting materials are advantageous over oxygen ion conducting one due to the reduced operating temperatures preserving the high conductivity and chemical stability [4-6]. Planar and tubular SOFCs and SOECs are conventionally used for different applications. While the planar cells are attractive for stationary application due to their long start up time, the tubular cells are more beneficial for mobile application due to their short start-up time [7]. The other advantageous of tubular SOFCs and SOECs are mechanical strength, high volumetric power density, high thermal cyclic behaviour and less problematic sealing compared to the planar ones [8,9].

One of the main components of SOFCs and SOECs is the ceramic electrolyte, and it is critical to have a dense and open porosity free electrolyte to achieve high efficiencies. The quality of the electrolyte is strongly dependent to the fabrication methods and dip-coating is one of the most widely used coating technique in the ceramic industry due to being a simple, cost effective and time effective method [10-12]. It can easily be applied on substrates in various

### Öz

Farklı katı yüklemelerine sahip BaCe<sub>0.7</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.16</sub>Zn<sub>0.04</sub>O<sub>3-δ</sub> (BCZYZ) seramik çözeltileri hazırlandı ve çözelti için maksimum katı yüklemesi Krieger- Dougherty eşitliği yardımı ile hacimce %25 olarak belirlendi. Maksimum katı yüklemesine sahip kaplama çözeltilisi hazırlanarak, daldırarak kaplama yöntemi ile elektrolit olarak gözenekli NiO/BCZYZ tüp şeklindeki desteklerin üzerine kaplandı. 1500°C’deki 10 saatlik sinterleme işleminden sonra, taramalı elektron mikroskopu yardımı ile elektrolit karakterize edildi. 30µ kalınlıkta, kapalı gözenekler içeren, geçirimsiz elektrolit kaplaması elde edildi.

**Anahtar kelimeler:** Seramik elektrolit, Daldırarak kaplama, NiO/BCZYZ, KOYP

geometric shapes and has a great potential to be used for large-scale commercial production [10,11,13]. Slurry characteristics such as viscosity and solid loading of the slurry strongly affects the dip coating quality and subsequent electrolyte performance [14]. While the low viscosity is important to obtain a thinner and satisfactory electrolyte coating, high solid loading is crucial to achieve a dense and crack-free electrolyte [15]. Therefore, it is essential to achieve high solid loading and low viscosity ceramic slurries to achieve high quality electrolyte coating. There are various semi-empirical models to predict the maximum solid loading of ceramic slurries and Krieger-Dougherty model is one of the widely used one in the literature [16-20].

In this work, the maximum solid loading has been predicted for BCZYZ slurry using Krieger-Dougherty model, and BCZYZ slurry with maximum solid loading has been prepared and applied as electrolyte on tubular NiO/BCZYZ supports by dip-coating technique.

### 2 Material and methods

BaCe<sub>0.7</sub>Zr<sub>0.1</sub>Y<sub>0.16</sub>Zn<sub>0.04</sub>O<sub>3-δ</sub> (BCZYZ) was synthesized using combustion spray pyrolysis (Praxair Specialty Ceramics). The powder was dried at 95°C for 24 h to minimize water content before sieving through 320 mesh. The coating slurry was prepared by mixing BCZYZ powder and Butanol (Sigma, Aldrich) with a various solid loading in the range of 8-23 vol.% as given in the Table 1. The slurry was milled on a roller mill for 24 h in total.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: b\_berceste@hotmail.com (B. Beyribey)  
Geliş / Recieved: 02.04.2022 Kabul / Accepted: 27.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1096585

**Table 1.** Solid loading of the samples

Sample Name	vol.% BCZYZ	wt.% BCZYZ
SL-08	8	40
SL-10	10	45
SL-12	12	50
SL-14	14	55
SL-16	16	60
SL-19	19	65
SL-23	23	70

The stability of the BCZYZ powder in butanol was studied as a function of solid loading through zeta potential measurement and sedimentation. The slurry samples were transferred to the 10 ml graduated cylinders and then allowed to settle for 12 days. The zeta potential measurements were done at the 1st day using a zeta potential analyser (Zetasizer Nano Z, Malvern, UK).

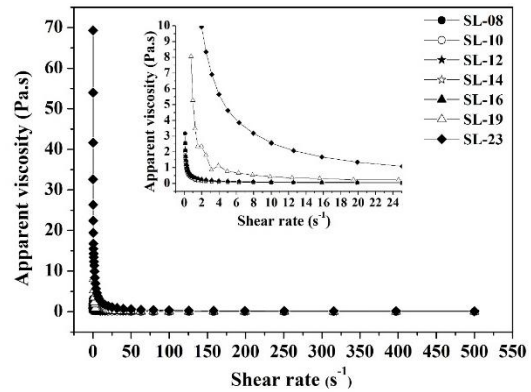
The rheological behaviour and apparent viscosity of the slurries were determined using a rheometer (Kinexus Pro+, Malvern, UK). The critical ceramic powder volume concentration was determined using Krieger-Dougherty Model and a dip coating slurry was prepared for the critical volume concentration, including polyvinylpyrrolidone (Sigma, Aldrich) and Butvar (Sigma, Aldrich) as binders and, Dibutyl phthalate (Sigma, Aldrich) and Polyethylene Glycol (Sigma, Aldrich) as plasticisers.

L025 NiO/BCZYZ tubular ceramic support (Low Emissions Resources Global Ltd., UK) was used as substrate in the experiments. The tubular support was pre-fired at 1200°C for 3h (Top Hat Furnace, Deltech, US) to achieve a porous structure before coating. A tubular support was coated using the slurry with the maximum solid loading. A built-in house instrument was used for dip-coating, applying 9.53 mm·sec<sup>-1</sup> immersion speed, 3.0 mm·sec<sup>-1</sup> withdrawal speed and 30 second dwell time. The coated cells were then placed in a built-in house drying cabinet set at 40°C for 1 hour before sintering at 1500°C for 10 hours.

The fully fired half-cell was cut using a diamond saw (Smart Cut 6001, UKAM Industrial Superhard Tools, CA, USA) to get samples from middle of cells for image analysis using Scanning Electron Microscope (SEM) (Hitachi TM4000Plus).

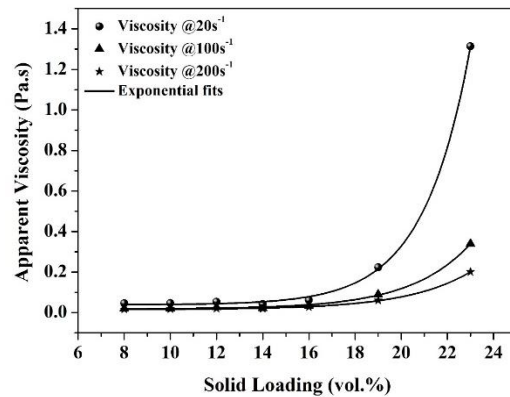
### 3 Results and discussions

Figure 1 presents the effect of solid loading on the rheological behaviour and the viscosity of BCZYZ slurry. In general, the difference in the rheological behaviour at different solid loading is negligible. The slurry shows shear-thinning behaviour at low shear rates and Newtonian behaviour at middle and high shear rates. While the Newtonian behaviour is seen above 2 s<sup>-1</sup> shear rates up to 16 vol.% solid loading, it is shifted to the higher shear rates above that solid loading. While the apparent viscosity is ~0.2 Pa·s at the shear rate of 2 s<sup>-1</sup> up to 16 vol.% solid loading, it increases to 2.3 Pa·s and 9.9 Pa·s by increasing the solid loading to 19 vol.% and 23 vol.%, respectively.



**Figure 1.** The effect of the solid loading on the rheological behaviour and viscosity

As seen in Figure 2, the change in the apparent viscosity at 20 s<sup>-1</sup>, 100 s<sup>-1</sup> and 200 s<sup>-1</sup> shear rates versus solid loading fits well with an exponential model (R<sup>2</sup> = 0.999) and the difference in the apparent viscosity at different shear rates becomes significant above 16 vol.% solid loading. The model parameters are given in the Table 2.



**Figure 2.** Apparent viscosity of the slurries versus solid loading

**Table 2.** Exponential model parameters

Exponential Model: $y = a + b * e^{cx}$	Model Parameters			
Shear rate	a	b	c	R <sup>2</sup>
20 s <sup>-1</sup>	0.039	1.47x10 <sup>-5</sup>	0.50	0.999
100 s <sup>-1</sup>	0.018	4.41x10 <sup>-5</sup>	0.39	0.999
200 s <sup>-1</sup>	0.015	4.38x10 <sup>-5</sup>	0.36	0.999

Figure 3 gives the correlation between zeta potential and solid loading. While the zeta potential is negative up to 10 vol.% solid loading, it becomes positive with 12 vol.% solid loading. From the graph, the isoelectric point is found out as 11 vol.% of BCZYZ. At the vol.% values above the isoelectric point, the negative surface species predominates, while at the vol.% values below the isoelectric point, the positive surface species predominates. Figure 4 indicates that the sedimentation rate is quite higher under the isoelectric point and becomes significantly stable at 16 vol.% solid loading and above.

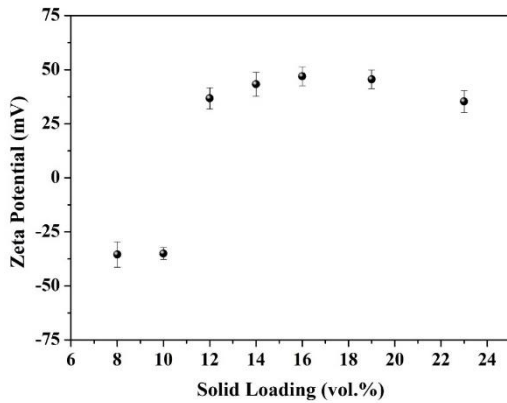


Figure 3. Zeta potential versus solid loading

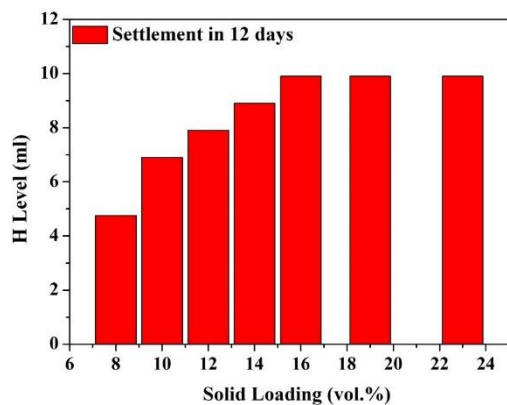


Figure 4. Sedimentation rate versus solid loading

Various semi-empirical models allow to predict the maximum solid loading for ceramic suspensions [17-20]. In the present work, the most widely used Krieger-Dougherty equation is considered [17]:

$$\eta = \eta_0 [1 - (\phi/\phi_m)]^{-[\eta]\phi_m} \quad (1)$$

Where,  $\eta$  is the viscosity of the suspension,  $\eta_0$  is the viscosity of the fluid phase of the suspension,  $\phi$  is the fraction in volume of the disperse solid phase of the suspension,  $\phi_m$  is the maximum solid loading,  $[\eta]$  is the intrinsic viscosity. Equation (1) is linearized in Equation (2)

to determine the best fit parameters using the apparent viscosity with various solid loadings:

$$\ln \eta = -[\eta]\phi_m \ln(1 - \phi/\phi_m) + \ln \eta_0 \quad (2)$$

The parameter  $\phi_m$  is determined by choosing the value of  $\phi_m$  to give the best fit straight line through the graph given in the Figure 5. By maximizing the  $R^2$ ,  $\phi_m$  is found as 0.25 at the high and medium shear rates and 0.24 at low shear rates. The model parameters are given in the Table 3.

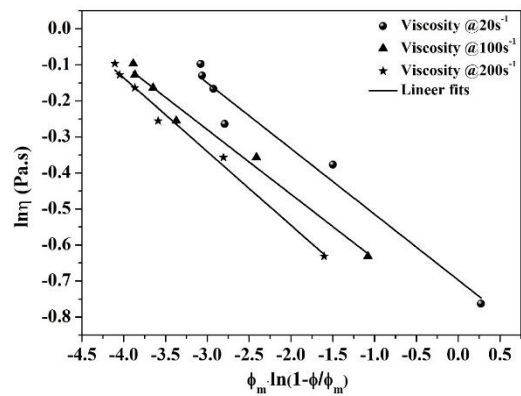
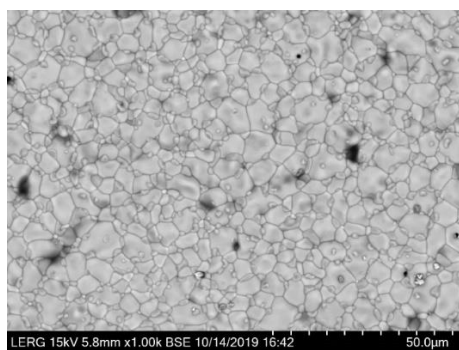


Figure 5.  $\ln \eta$  plotted against  $\phi_m \ln(1 - \phi/\phi_m)$

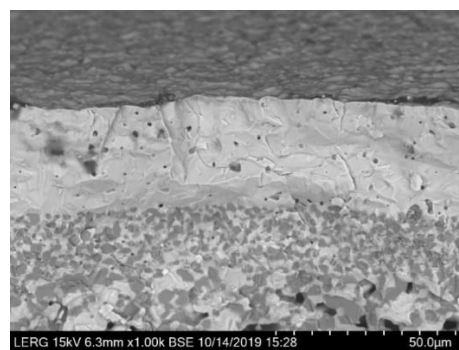
Table 3. Linear model parameters

Linear Model: $y = a + bx$	Model Parameters		
Shear rate	a	b	$R^2$
20 $s^{-1}$	-0.182	-0.697	0.961
100 $s^{-1}$	-0.179	-0.818	0.98
200 $s^{-1}$	-0.955	-0.205	0.987

The pre-fired porous L025 NiO/BCZYZ tubular ceramic support was coated with BCZYZ slurry with the maximum solid loading and analysed using SEM. Figure 6 presents the SEM images of the surface and fractured of the BCZYZ layer, which indicates a very dense, high quality electrolyte, with some closed pores and the grain size is in micron-scale between 0.5-13  $\mu$ .



(a)



(b)

Figure 6. SEM images of the surface (a) and fractured surface (b) of BCZYZ layer

#### 4 Conclusions

BCZY suspensions with solid loadings in range of 8-23 vol.% exhibit a transition from shear-thinning to Newtonian behaviour in shear rate around  $2 \text{ s}^{-1}$  for low solid loadings and  $10\text{-}20 \text{ s}^{-1}$  for high solid loadings. While the difference in the apparent viscosity at low and high shear rates are negligible at low solid loadings up to 16 vol.%, it becomes significant at higher solid loadings. Therefore, the effect of coating parameters (such as withdrawal speed, diameter of coating vessel etc) on the electrolyte thickness cannot be negligible for the high solid loading slurries.

Zeta potential measurements indicates that 11 vol.% solid loading leads the isoelectric point and makes the suspension very unstable around that solid loading. The sedimentation results show that the stability of the suspension is very poor under 11 vol.% solid loading, and it becomes quite stable with the solid loading of 16 vol.% and above. The maximum solid loading has been predicted using Krieger-Dougherty equation and found as 25 vol.% at the high and medium shear rates and 24 vol.% at the low shear rates. However, as the viscosity increases above 16 vol.% solid loading, this solid loading has been identified as the max solid loading can be achieved without giving any compromise in coating thinness or quality.

A dip-coating slurry formulated with the maximum solid loading has been used to coat an electrolyte layer on the porous L025 NiO/BCZY tubular supports. SEM analysis indicates that  $30\mu$  thick, very dense electrolyte layer has successfully been achieved with some closed pores. The thickness of the electrolyte layer can be reduced by optimising dip-coating parameters for proton conducting solid oxide fuel cell and electrolyser applications.

#### Acknowledgement

Low Emissions Resources Global Ltd. (LERG) is a wholly owned subsidiary of Low Emissions Resources Corporation (LERC). This work did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

**Similarity rate (iThenticate):** .13%

#### References

- [1] A. Torabi, T.H. Etsell, P. Sarkar, Dip coating fabrication process for micro-tubular SOFCs. *Solid State Ionic*, 192, 372-375, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.09.050>
- [2] B. Shri Prakash, S. Senthil Kumar and S.T. Aruna, Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 149-179, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.043>
- [3] J.T.S Irvine and P. Connor, *Solid oxide fuel cells: Facts and Figures*. Springer London, 2013.
- [4] C. Jia, M. Chen and M. Han, Performance and electrochemical analysis of solid oxide fuel cells based LSCF-YSZ nano-electrode, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 14 (5), 1006-1012, 2017. <https://doi.org/10.1111/ijac.12748>
- [5] K.R. Lee, C.J. Tseng, S.C. Jang, J.C. Lin, K.W. Wang, J.K. Chang, T.C. Chen and S.W. Lee, Fabrication of anode-supported thin BCZY electrolyte protonic fuel cells using NiO sintering aid, *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 23784-23792, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.097>
- [6] Y. Meng, J. Gao, H. Huang, M. Zou, J. Duffy, J. Tong and K.S. Brinkman, A high-performance reversible protonic ceramic electrochemical cell based on a novel Sm-doped  $\text{BaCe}_{0.7}\text{Zr}_{0.1}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$  electrolyte, *Journal of Power Sources* 439, 227093-227097, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227093>
- [7] A. Mat, M. Canavar, B. Timurkutluk and Y. Kaplan, Investigation of micro-tube solid oxide fuel cell fabrication using extrusion method, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 10037-10043, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.203>
- [8] C. Timurkutluk, K. Bilgil, A. Celen, S. Onbilgin, T. Altan and U. Aydin, Experimental investigation on the effect of anode functional layer on the performance of anode supported micro-tubular SOFCs, *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.260>
- [9] S. Onbilgin, B. Timurkutluk, C. Timurkutluk and S. Celik, Comparison of electrolyte fabrication techniques on the performance of anode supported solid oxide fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 35162-35170, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.097>
- [10] R.Z. Liu, S.R. Wang, B. Huang, C.H. Zhao, J.L. Li, Z.R. Wang, Z.Y. Wen and T.L. Wen, Dip-coating and co-sintering technologies for fabricating tubular solid oxide fuel cells, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 13, 1905-1911, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10008-008-0752-7>
- [11] L. Lei, Y. Bai, Y. Liu and J. Liu, An investigation on dip-coating techniques for fabricating anode-supported solid oxide fuel cells, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12 (2), 351-357, 2015. <https://doi.org/10.1111/ijac.12147>
- [12] C. Timurkutluk, B. Timurkutluk and Y. Kaplan, Experimental optimization of the fabrication parameters for anode-supported micro-tubular solid oxide fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 23294-23309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.060>
- [13] R. De la Torre Garcia, Production of micro-tubular solid oxide fuel cells. PhD Thesis, University of Trento, Trento, Italy, 2011.
- [14] Z. Hu, Y. Yang, Q. Chang, F. Liu, Y. Wang and J. Rao, Preparation of a high-performance ceramic membrane by a two-step coating method and one-step sintering, *Applied Sciences*, 9, 52-63, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9010052>

- [15] X. Li, H. Zhong, J. Zhang, Y. Duan, H. Bai and J. Li, D. Jiang, Dispersion and properties of zirconia suspensions for stereolithography, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 00, 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1111/ijac.13321>
- [16] A. De La Rosa, G. Ruiz, E. Castillo and R. Moreno, Calculation of dynamic viscosity in concentrated cementitious suspensions: Probabilistic approximation and Bayesian analysis, *Materials (Basel)*, 14(8), 1971-1998, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081971>
- [17] A. Azzolini, V.M. Sglavo and J.A. Downs, Novel method for the identification of the maximum solid loading suitable for optimal extrusion of ceramic pastes, *Journal of Advanced Ceramics*, 3(1), 7-16, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40145-014-0088-y>
- [18] L.F.G. Setz, L. Koshimizu, S.R.H. Mello-Castanho and M.R. Morelli, Rheological analysis of ceramics suspensions with high solid loadings, *Materials Science Forum*, 727-728, 646-651, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.646>
- [19] P.K. Senapati, D. Panda and A. Parida, Predicting viscosity of limestone-water slurry, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 8(3), 203-221, 2009. <https://doi.org/10.4236/JMMCE.2009.83018>
- [20] B. PFG, Concentration effects in the rheology of cement pastes: Krieger-Dougherty revisited. *Proceedings of 13th International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, Spain, 2011.*





## Benefiting from solar energy due to different emissivity levels of multiple glass windows for buildings

### Binalarda farklı yayma oranlarına bağlı olarak çok camlı pencerelerden güneş enerjisinden yararlanma

Okan Kon<sup>1</sup> , İsmail Caner<sup>2\*</sup> 

<sup>1,2</sup> Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir, Türkiye

#### Abstract

In the study, firstly, heat transfer coefficients of windows were calculated according to the highest and lowest emissivity values. Secondly, monthly average solar radiation values were determined. The heat transfer coefficient calculated for double, triple and quadruple glass windows. Thirdly, the solar radiation in the south, north and east/west directions of the five climatic zones were multiplied by the shading factor, surface area and the solar energy factor of discrete buildings. Thus, the solar energy gain value for the heating period and solar energy losses for cooling period was determined. Finally, passive solar energy gains are calculated during the heating and cooling period for all climate zones. It has been calculated that in the fifth climatic zone in south direction, heat loss from windows with 0.05 emissivity can be provided with passive solar energy by 167.9% in double-glazed windows, 258.7% in triple-glazed windows and 349.1% in quadruple-glazed windows.

**Keywords:** Emissivity, Heat transfer coefficient of windows, Multiple glazing, Solar energy from windows

#### 1 Introduction

The windows allow the use of daylight and heat caused by sunlight and also provides comfort to the indoor environment and a view to the outdoor environment [1]. One way to reduce the energy consumption of buildings can be achieved by passive design measures of windows. One of them is to benefit from alternative energy sources such as solar energy. This not only reduces the building's energy consumption, but also helps global climate change prevention efforts [2,3]. In cold climates, 10–25% of the heat lost from buildings usually occurred from windows. As to hot climates, the excessive solar radiation entering through the windows increases the cooling load [4]. Parameters such as shading, coatings on the glass with different emissivity levels, gap widths of the glass, the number of glass layers significantly affect the use of solar energy and energy passing through the window in the room [5,6,7].

When previous studies are examined, Li H et al. [8]

#### Öz

Çalışmada öncelikle en yüksek ve en düşük yayma oranlarına göre pencerelerin ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. İkinci olarak aylık ortalama güneş ışınımı değerleri belirlenmiştir. İkili, üçlü ve dörtlü cam pencereler için ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Üçüncü olarak, beş iklim bölgesinin güney, kuzey ve doğu/batı yönündeki güneş radyasyonu, ayrı binaların gölgeleme faktörü, yüzey alanı ve güneş enerjisi faktörü ile çarpılmıştır. Böylece ısıtma periyodu için güneş enerjisi kazanç değeri ve soğutma periyodu için güneş enerjisi kayıpları belirlenmiştir. Son olarak, tüm iklim bölgeleri için ısıtma ve soğutma periyodu boyunca pasif güneş enerjisi kazanımları hesaplanmıştır. Güney yönünde beşinci iklim kuşağında 0.05 yayma oranına sahip pencerelerden ısı kaybının pasif güneş enerjisi ile çift camlı pencerelerde %167.9, üç camlı pencerelerde %258.7 ve dört camlı pencerelerde %349.1 sağlanabileceği hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yayma oranı, Pencerelerin ısı transfer katsayısı, Çoklu cam, Pencerelerden güneş enerjisi

developed a mathematical model to study the dynamic heat transfer process in the construction of outdoor walls in the hot summer and cold winter region of China. Li J et al. [9] evaluated the extensive energy consumption of the reading room in the libraries through dynamic and static simulations of lighting variation, daylight factor, and artificial lighting under different window conditions. Gondal IA et al. [2] showed that in addition to the effect of solar energy, building parameters such as roof/wall thickness, window to wall ratio and optimum window sizes can also reduce energy consumption. Udrea I and Badescu V [10] were carried out to simulations to examine the effect of various shading sources on thermal comfort, such as louvres, outdoor shadings and protrusions. Zhu Y et al. [11] measured and simulated the parameters required for the thermally efficient design and construction of rural residential buildings in north western China. Liu C et al. [12] examined the thermal and optical performance of a roof in a building containing solid and liquid phase change material (PCM). Moreover, internal

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ismail@balikesir.edu.tr (İ. Caner)

Geliş / Received: 21.03.2022 Kabul / Accepted: 11.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1091332

temperature, temperature delay and total transmitted energy, solar permeability and transmitted solar energy effect were investigated. Suna Y [13] developed an innovative model (combined optical, electrical and energy model) to comprehensively evaluate the performance of an office equipped with a semi-transparent photovoltaic (STPV) window and analyse the effect of window design on overall energy efficiency. Baglivo C et al. [14] analysed the thermal behaviour of the building with TRNSYS 17 software to evaluate the indoor air temperature with various configurations such as walls, ground floor, roof, shading, windows and internal thermal loads. Maestre IR et al. [15] examined the effect of different window sizes, window orientations, typologies of shading devices, latitudes of the hemisphere sky and level of discretization on the estimation of incident direct radiation on building surfaces and the required calculation times. Khakian R [16] evaluated the energy performance of a two-storey house located in a mountainous region of Iran and examined the effect of multiple parameters such as building orientation, window to wall ratio and glass coating. Zhang G et al. [17] proposed a two-dimensional heat transfer model to numerically investigate the effect of phase change material (PCM) enriched with different types of nanoparticles on the thermal performance of windows in different seasons of the year. Altun AF and Kılıç M. [18] investigated the effect of window configuration on energy performance related to the window to wall ratio, total solar energy permeability value of glass, shading levels, orientation, geometric properties and thermo-physical properties. Košir M et al. [19] studied the interdependence of building form, orientation and window area in relation to energy consumption for heating and cooling a building in a central European climate. In the study, they found that larger window areas allowed more solar energy use. However, while this is advantageous for heating time, they have found a potential problem during the cooling season. Therefore, they recommended that appropriate shading device should be applied and the optimum solution should be obtained for the annual cumulative energy consumption of the building. Obrecht TP et al. [3] examined the deflection of the main glazed façade in the south of a family building to the other façades and how this affects the energy flow through the glass. They showed the change of optimum glass areas depending on the solar energy gains from the windows on other façades. Ashrafian T and Moazzen N [20] modelled the effect of different glass ratios and window configurations in a classroom, west and east directions, on comfort and energy demand. Xuan Q et al. [21] created and experimentally validated optical models for the Asymmetric concentrator-PV type window design, which includes the daylight function Kralj A et al. [1] studied the general configuration of six pane glass. They analysed properties such as heat transfer coefficient value, solar energy permeability, apparent permeability, solar heat gain coefficient, glass plate temperatures, vapor permeability, economic aspect and comfort. Sedaghat A et al. [22] examined the solar performance of double-glazed windows in actual working conditions in four office building with and without solar film window at the Australian College of

Kuwait. Asfour OS [23] investigated the use of building integrated photovoltaics as vertical and horizontal shading devices with different tilt angles in hot climates in Saudi Arabia. Lago TGS [4] studied the thermal behaviour of a ventilated double-glazed window coated with a solar reflective film numerically and compared with the results found in the literature. Manz H and Menti UP [24] examined the energy performance of triple glasses according to the monthly average values of the internal and outdoor temperature difference and solar radiation. They calculated the gain-loss ratio depending on the glass quality and façade orientation. Frederick JE [25] developed a new model that processes, solar and longwave radiation transmission, thermal conduction and precise measurement of heat transfer to measure energy flow through single and double glazing windows. Karlsson J and Roos A. [26] studied and compared different window energy rating systems based on total solar energy permeability and thermal permeability of the window for different European climates, building types and orientations. Chandel SS ve Aggarwal RK [27] have shown that central heating systems using high cost electricity/gas/wood can be replaced with a low cost solar heating system with backup heaters. They have shown that the passive solar heating system saves on electricity required for space heating and reduces heat losses in the building by about 35%. Andersona T and Luther M [5] designed various glazing systems using different software tools to improve the thermal environment of a glass-walled commercial office. Alam MJ and Islam MA. [6] investigated the state of enhanced glazing and shading on solar energy transmitted to or lost from the room with fenestration areas for a residence in Bangladesh. Lu S et al [28] developed a solar radiation model to calculate solar energy in glass-covered buildings. Using this mathematical model, they calculated the modified solar heat gain coefficient. Kaasalainen T et al. [29] conducted studies in dynamic building simulations to examine the effects of variables such as window area, ratio, location, outdoor shading, glass properties and adjacent room condition on heating, cooling and lighting needs. Jaber S and Ajib S [30] examined the effects of windows' heat transfer coefficient value, window direction and window size on annual heating and cooling energy demand, taking into account both energy and investment costs. Carlos JS and Corvacho H [31] made simulations to estimate the heat transfer coefficient values of ventilated double windows under different window configurations and different air flow rates. Karabay H and Arıcı M [32] identified the number of glasses with thermoeconomic optimization using the degree-day method for triple and quadruple glazed windows in two different climate zones in Turkey. Kon O. [33] calculated the fuel consumption for the heating and cooling period due to double, triple and quadruple windows with emissivities between 0.0 to 1.0. Arıcı M and Kan M [7] numerically investigated the fluid flow and heat transfer properties in double, triple and quadruple glazed windows considering different emissivity coatings and gap widths of various glasses. Al-Sibai F et al. [34] presented a method that simulates in detail the heat transfer processes by conduction, convection and radiation of air gaps in different roof systems.

Kon O [35] calculated fuel consumption and emission based on outdoor walls and windows using economical optimization. Kitagawa H et al. [36] aimed to determine the window design that optimizes the indoor airflow for ventilated cooling. Multiple window types were analyzed using an experimental building in Tangerang, Indonesia. Analyzes based on convection heat transfer and standard effective temperature (SET) in the center of the room were made. Hu D and Gu Y. [37] designed a new emitter type with high emissivity and high reflectance at different wavelengths (8–13  $\mu\text{m}$  & 16–25  $\mu\text{m}$ ) for two atmospheric windows. The designed emitter has a higher cooling potential than different types of emitters. Based on polydimethylsiloxane (PDMS) film, this new emissivity characteristic introduces a reflection window between the two windows. Heydari A et al. [38] performed cooling/heating load analyses of the modeled building using DesignBuilder software to find the optimum window configuration in the Semnan (Iran) climatic condition by changing the gap between panes and glass thickness. In the study, argon gas, krypton and air were used as insulators between the windows, and various single-glazed and double-glazed windows were examined. Zhang L et al. [39] proposed an optimization method to analyze the effect of the heat transfer coefficient on the performance of the prefabricated room envelope for hot summer and cold winter climates, in order to reduce the energy consumption for the sample room. Used in Designer's Simulation Toolkit software for an energy-consuming prefab room in Nanjing (China). Raimundo AM et al. [40] investigated the relationship between investment costs in windows, energy performance, and other related costs by contacting many window manufacturers. Calumen and Guardian Configurator software was used to make the analyzes. In the study, besides the economic benefits, the effect of the energy performance of the windows on the energy performance of the building was also examined. Shi Y et al. [41] proposed an estimation method of the composite vacuum glazing (CVG) heat transfer coefficient in their study. The theoretical calculation formula for the heat transfer coefficient of CVG has been established. Simulations were made using ANSYS. The CVG heat transfer coefficient was calculated by combining the theoretical formula and simulation results. The simulation results were compared with the experiment. Wang Z et al. [42] investigated the use of an energy-saving insulated window (ESIW), which provides energy for the

protection of heat loss in winter. With DeST software, the energy consumption characteristics of the six window structure of a house with an ESIW-structure window were evaluated and comparisons were made.

The aim of the study is to calculate the change of solar energy and heat transmission for double, triple and quadruple glazed windows with coated and uncoated glasses. The internal gap of the glasses is accepted as filled with air and its thickness is chosen as 6 mm. Calculations have been made for a 0.5 m  $\times$  1 m window. According to principles for the preparation of the projects of the central heating systems (TS 2164), emissivity value of coated glass was taken as 0.05 and emissivity value of uncoated glass was 0.89. The cooling system works above 22  $^{\circ}\text{C}$  indoor air temperature and the heating system works below 19  $^{\circ}\text{C}$  indoor air temperature for residential buildings. It is considered that the building is discrete. Monthly average outdoor temperatures and monthly solar radiation values depending on the directions were taken from Turkish insulation standard (TS 825).

## 2 Methodology

Emissivity values used in the study were taken from TS 2164 (principles for the preparation of the projects of the central heating systems), the average shading factor and the solar transmission factor were taken from TS 825. In discrete buildings, the average shading factor ( $r_s$  value) was taken as 0.8 and the solar transmission factor ( $g_s$ ) was 0.6.

The reason for choosing a discrete building in the study is that the shading factor is the highest building type. In the study, the temperature value was chosen as 19  $^{\circ}\text{C}$  for the heating period and 22  $^{\circ}\text{C}$  for cooling period in different climate zones. It is thought that heating is done below 19  $^{\circ}\text{C}$  outdoor air temperature and cooling is done above 22  $^{\circ}\text{C}$  outdoor air temperature. In solar energy gain or loss calculations, south, north and west/east directions are taken into consideration. It is assumed that the window internal gap is filled with air.

### 2.1 Meteorological data for different climate zones

Outdoor air temperatures and solar radiation values in different directions according to different climate zones used in the calculations are taken from the Turkish standard TS 825 [43]. In Figure 1, a) Outdoor temperatures for different climate zones b) Solar radiation values depending on different directions are shown according to TS 825.

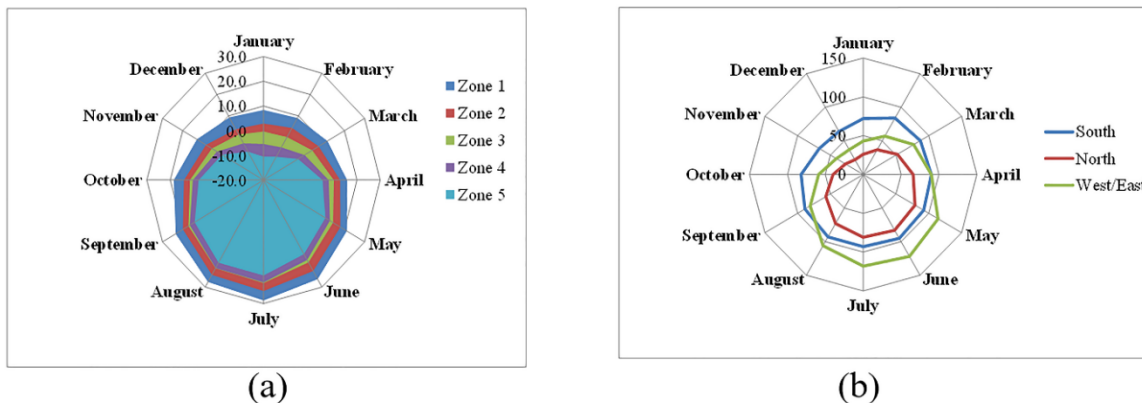


Figure 1. a) Outdoor temperatures for different climate zones b) Solar radiation values depending on different directions



### 2.2 Calculation of convection heat transfer coefficient

The following equations were used to find the convection heat transfer coefficient of the air gap of windows with multiple glazing [34,45].

Grashof number;

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_0)}{\vartheta^2} \quad (1)$$

Here,  $g$  is the gravitational acceleration,  $T_s$  is the surface temperature,  $T_0$  is the outdoor air temperature (ambient temperature),  $\vartheta$  is the kinematic viscosity,  $\beta$  is the volumetric expansion coefficient,  $\alpha$  is the thermal diffusivity,  $L$  is the air layer thickness (natural convection is the distance between hot and cold surfaces in heat transfer in closed gaps).

Rayleigh number;

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\varrho}{\alpha} \quad (3)$$

Here,  $Gr$  is grashof number and  $Pr$  is prandtl number.

Nusselt number;

$$\text{If } Ra < 10^3; \quad Nu = 1 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\text{If } 10^3 < Ra < 10^4 \text{ and } \frac{H}{L} < 83; \\ Nu &= 0.38 \cdot Ra^{0.25} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.25} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{If } 10^4 < Ra < 10^7 \text{ and } \frac{H}{L} < 83; \\ Nu &= 0.42 \cdot Pr^{0.012} \cdot Ra^{0.25} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{-0.25} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{If } 10^7 < Ra < 10^9; \quad Nu = 0.049 \cdot Ra^{0.33} \quad (7)$$

Convection heat transfer coefficient;

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{L} \quad (8)$$

Here,  $\lambda_a$  is heat conduction coefficient of the air (W/m.K),  $L$  is the air layer thickness and  $h$  is the convection heat transfer coefficient. When  $Nu = 1$ , conduction heat transfer occurs [34,45]. In Table 1, reference outdoor temperature values are given in the calculation of convection heat transfer coefficient.

**Table 1.** Reference outdoor temperatures for calculating convection heat transfer coefficient [44]

Zone	Temperature (°C)
1	3
2	-6
3	-12
4	-18
5	-27

### 2.3. Calculation of general heat transfer coefficient for windows

General heat transfer coefficient for multiple glazed windows [7,32,33,35];

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{h_i \cdot A} + \frac{c}{k_{\text{glass}} \cdot A} + \frac{1}{(U_{1-2,\text{cond}} + U_{1-2,\text{conv}} + U_{1-2,\text{rad}}) + \frac{c}{k_{\text{glass}} \cdot A} + \frac{1}{h_o \cdot A}} \quad (9)$$

Here, the  $U_{1-2,\text{cond}}$  is conduction heat transfer coefficient,  $U_{1-2,\text{conv}}$  is convection heat transfer coefficient and the  $U_{1-2,\text{rad}}$  is radiation heat coefficient between the inner surfaces of the outdoor glass,

$$U_{1-2,\text{cond}} = \frac{1}{\frac{L}{A \cdot k_{\text{air}}} + (n-2) \left( \frac{c}{A \cdot k_{\text{glass}}} + \frac{L}{A \cdot k_{\text{air}}} \right)} \quad (10)$$

$$U_{1-2,\text{conv}} = \frac{1}{\frac{1}{h \cdot A} + (n-2) \left( \frac{1}{h \cdot A} \right)} \quad (11)$$

$$U_{1-2,\text{rad}} = \frac{1}{\frac{2(1-\varepsilon)}{(A \cdot \varepsilon)} + \frac{2(n-2)(1-\varepsilon)}{(A \cdot \varepsilon)} + \frac{(n-1)}{(F_{ij} \cdot A)}} \cdot \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad (12)$$

Here, radiation heat transfer and conduction or convection heat transfer occur between glasses. Here,  $h$  is convection heat transfer coefficient,  $n$  is the number of glass layer,  $L$  is air gap thickness,  $A$  is the surface area,  $\varepsilon$  is emissivity,  $\sigma$  is Stefan-Boltzman constant, for uncoated glass window;  $h_o = 34$  W/m<sup>2</sup>.K and  $h_i = 8.29$  W/m<sup>2</sup>.K and for coated glass window;  $h_o = 34$  W/m<sup>2</sup>.K and  $h_i = 4.4$  W/m<sup>2</sup>.K internal and outdoor convection heat transfer coefficient,  $k_{\text{glass}}$  is the heat conduction coefficient of glass ( $k_{\text{glass}} = 0.92$  W/m.K),  $k_{\text{air}}$  is the conduction heat transfer coefficient of air,  $(1 - \varepsilon)/(\varepsilon A)$  and  $1/F_{ij}$  are surface and area radiation resistance.  $F_{ij}$  was taken as 1, and glass thickness was assumed as 4 mm.  $T_1$  and  $T_2$  are the internal surface temperature of windows [7,32,33,35,45].

### 2.4. Solar energy and heat transmission calculation for multi glass windows

Solar energy transition from through the windows [24,30,31,43];

$$E_s = r_i \cdot g_i \cdot I_{sr} \cdot A \quad (13)$$

Here,  $r_i$  is average shading factor,  $g_i$  is solar energy transmission factor, and  $I_{gm}$  is monthly average solar radiation intensity depending on different directions.

Heat transition from the through the windows;

$$Q = U_w \cdot \Delta T \cdot A = U_w \cdot (T_i - T_0) \cdot A \quad (14)$$

Here,  $U_w$  is heat transfer coefficient for multiple glazing window,  $\Delta T$  is temperature differences between indoor and outdoor air and  $A$  is the surface area of window.  $T_i$  is indoor air temperature,  $T_0$  is outdoor air temperature.

Solar energy transition and heat transition ratio;

$$\tau = \frac{E_s}{Q} = \frac{\tau_i \cdot g_i \cdot I_g \cdot A}{U_w \cdot \Delta T \cdot A} \quad (15)$$

Here,  $\tau$  is shown as positive due to the gain of solar energy during the winter period and negative for the multiple glazed windows as there is heat transfer (heat gain) from inside to outside environment. During the summer period, solar energy flux from outdoor to indoor environments, so energy consumption is required for cooling. Therefore, both are shown as a negative. While the total energy needs decrease due to solar energy gain for the winter period and it increases with the contribution of solar energy for the summer period [43]. In the literature, the temperature values for cooling season varying between 20 to 26 °C. In this study, 22 °C was accepted.

$$\text{If } T_i < 19^\circ\text{C}; \text{ heating is done} \quad (16)$$

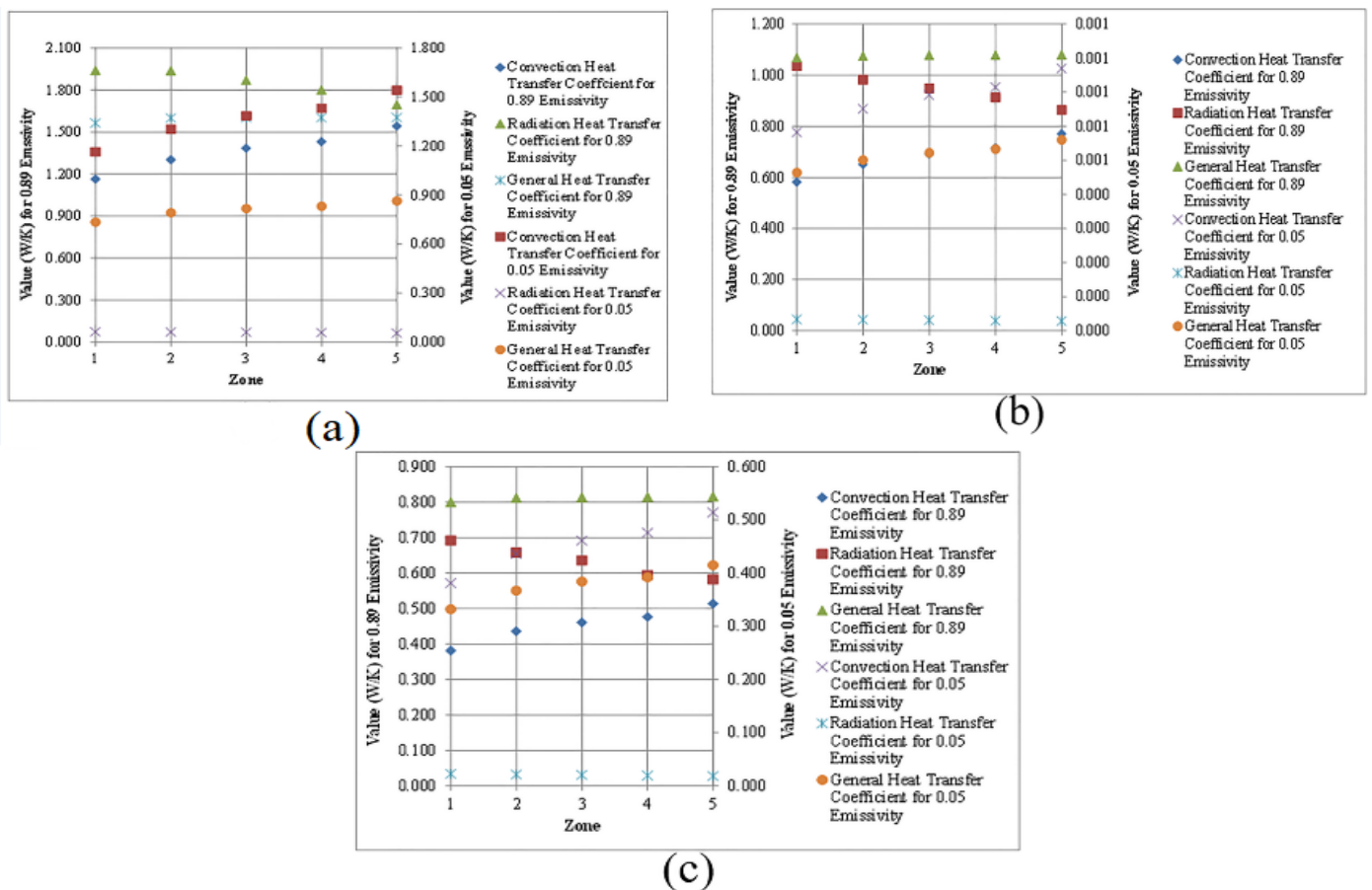
$$\text{If } 19^\circ\text{C} < T_i < 22^\circ\text{C}; \text{ there is no need for heating or cooling} \quad (17)$$

$$\text{If } 22^\circ\text{C} < T_i; \text{ cooling is done} \quad (18)$$

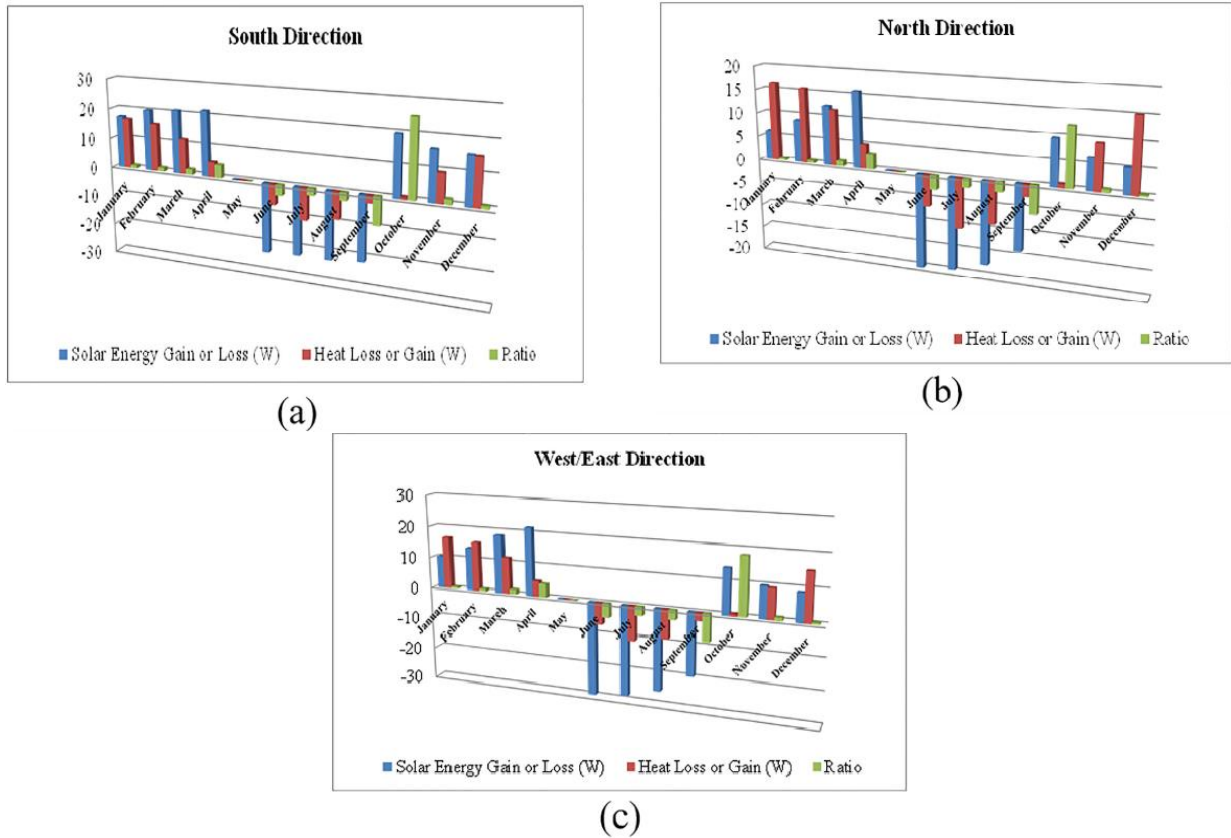
The general heat transfer coefficient was calculated between 1.563 to 1.602 W/K for double-glazed windows with 0.89 emissivity. For double-glazed windows with 0.05 emissivity, it was calculated between 0.734 and 0.863 W/K. It was estimated between 1.069 to 1.080 W/K for triple-glazed windows with 0.89 emissivity and between 0.464 to 0.560 W/K with 0.05 emissivity. It was calculated between 0.800 to 0.816 W/K for quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity and between 0.332 to 0.415 W/K with 0.05 emissivity. These values are given in Fig. 2.

### 3 Results and discussions

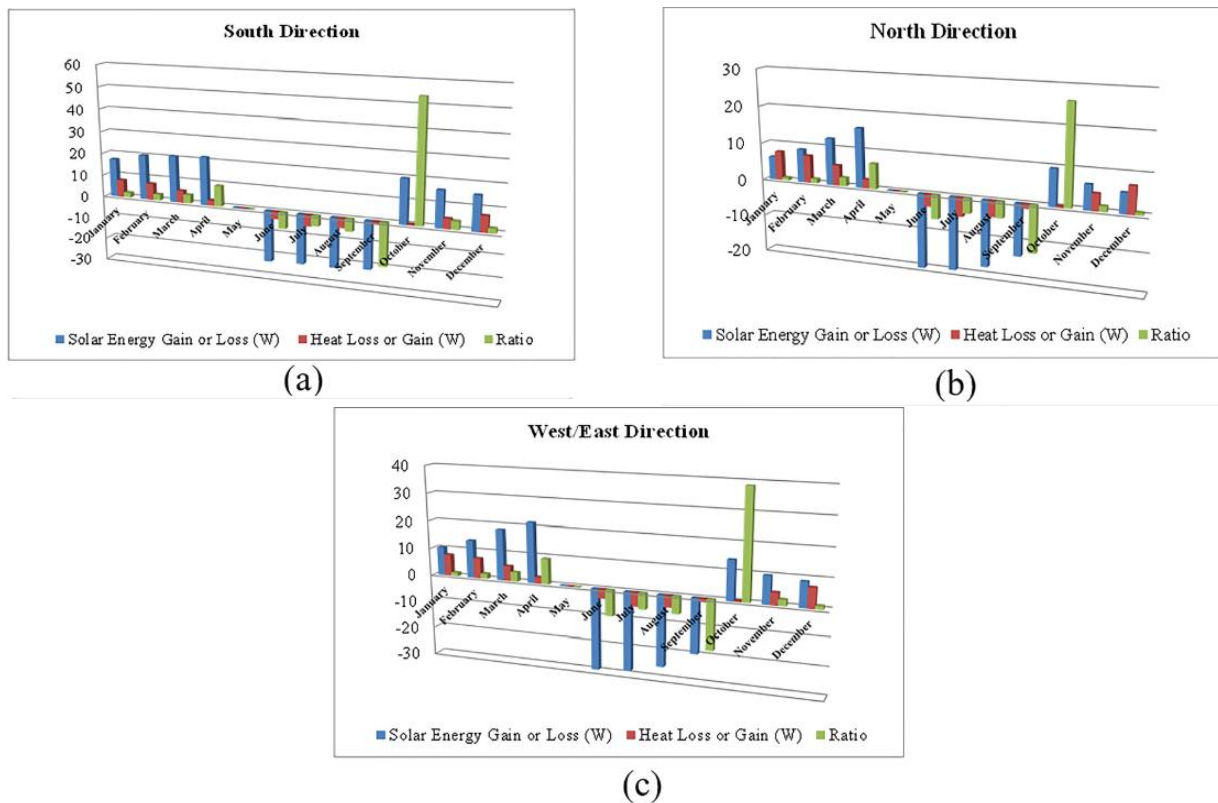
When the indoor set-point temperature is taken as 19 °C for heating and 22 °C for cooling, cooling is performed in the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> climate zones in the summer period. In the third, fourth and fifth climate zones, only heating is performed.



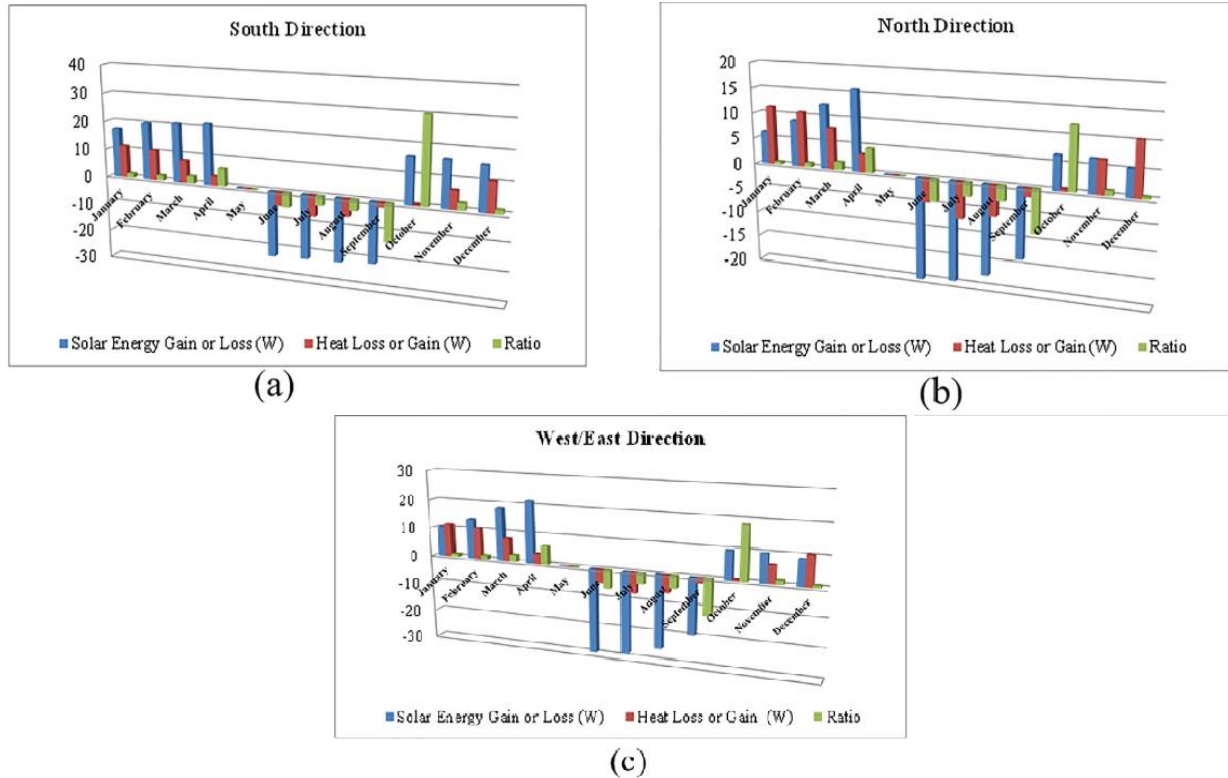
**Figure 2.** Change of heat transfer coefficients of a) double-glazed b) triple-glazed d) quadruple-glazed windows according to climate zones



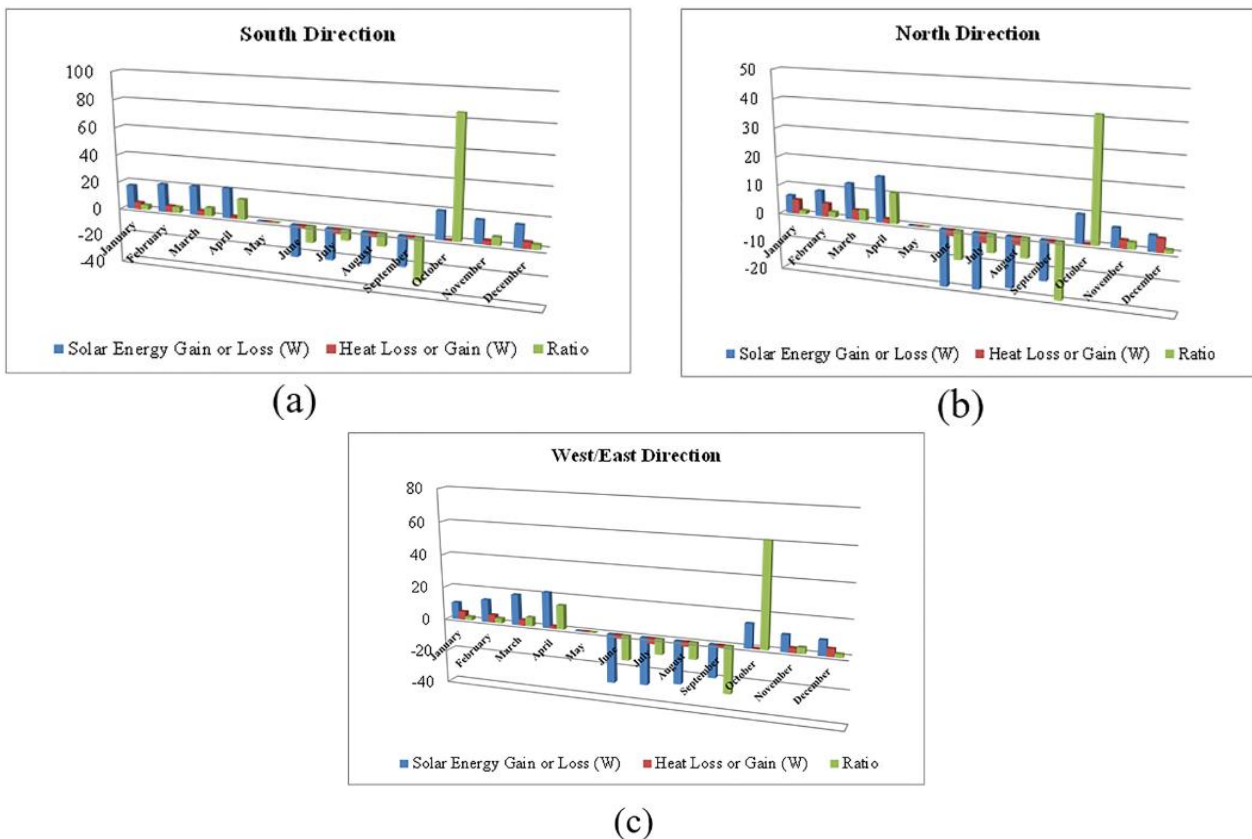
**Figure 3.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the uncoated ( $\epsilon=0.89$ ) double-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction



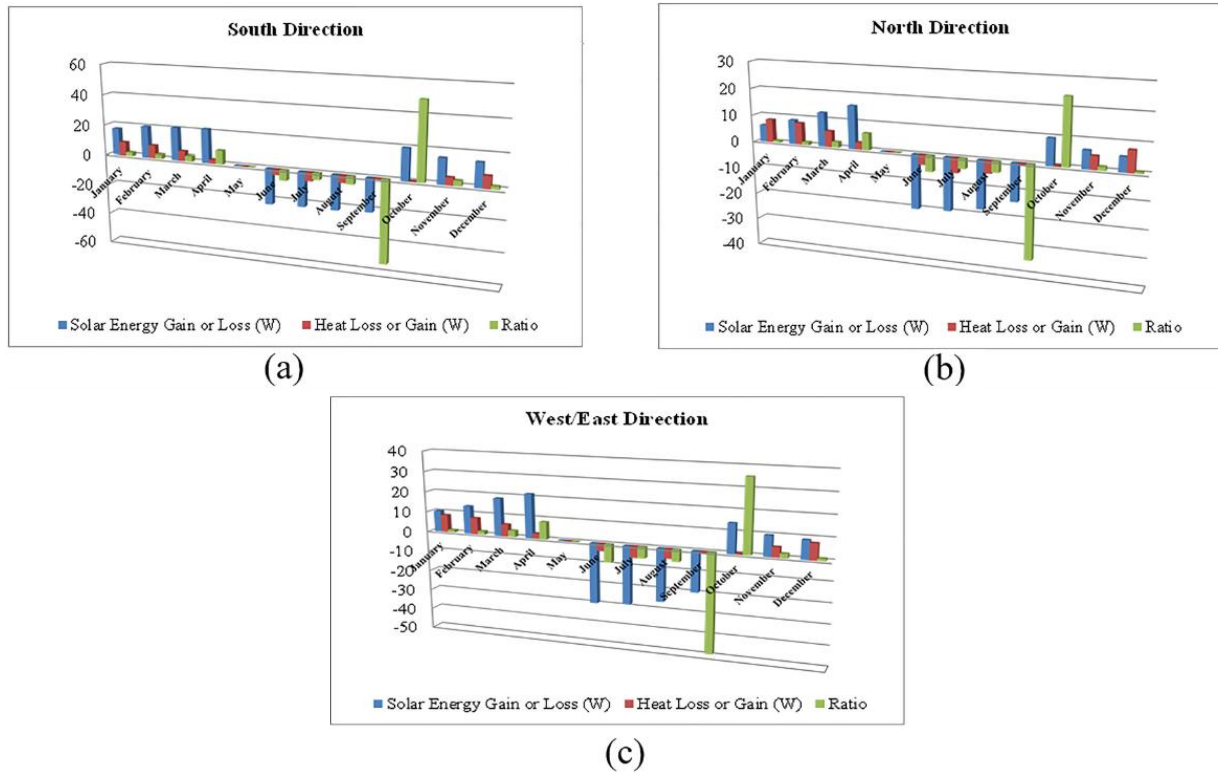
**Figure 4.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the coated ( $\epsilon=0.05$ ) double-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction



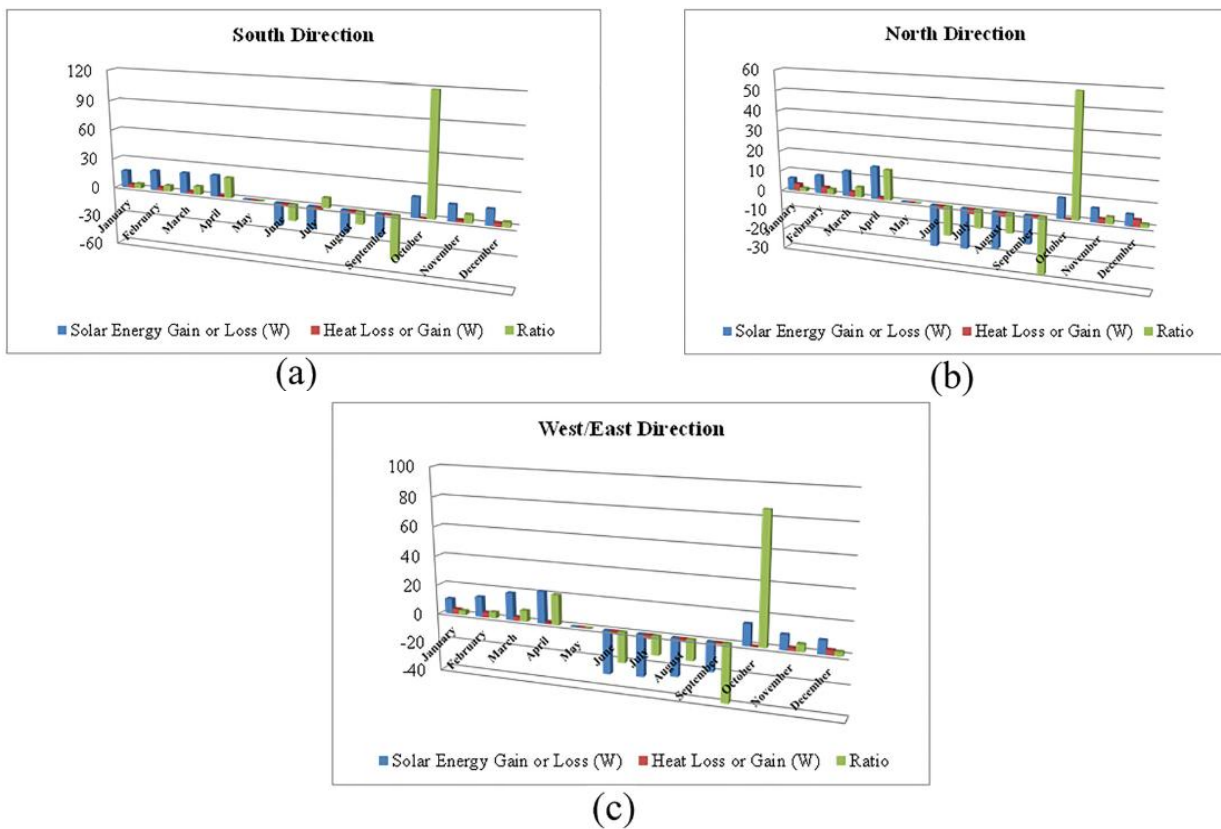
**Figure 5.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the uncoated ( $\epsilon=0.89$ ) triple-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction



**Figure 6.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the coated ( $\epsilon=0.05$ ) triple-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction



**Figure 7.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the uncoated ( $\epsilon=0.89$ ) quadruple-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction



**Figure 8.** The change of solar energy gain or loss and heat loss or gain in the 1<sup>st</sup> zone for the coated ( $\epsilon=0.05$ ) quadruple-glazed windows a) South Direction, b) North Direction and c) West/East Direction

In the 1<sup>st</sup> climate zone, heating is performed in January, February, March, April, October, November and December, when the outdoor temperature is below 19 °C. Cooling is carried out in June, July, August and September at the outdoor temperatures above 22 °C. In May, since the outdoor temperature is between 19 °C and 22 °C, there is no need for heating and cooling. In the 2<sup>nd</sup> climate zone, heating is done in May because the outdoor temperature is below 19 °C and the cooling is done only in June, July and August. In the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> climate zones, only heating is done. In July and August, since the outdoor temperature is between 19 °C and 22 °C, heating and cooling is not performed. In the 5<sup>th</sup> climate zone, heating is carried out in all months of the year.

In the 1<sup>st</sup> climate zone in winter, the heat loss from uncoated double-glazed window with 0.89 emissivity was calculated as 45.796 W, while it was found as 21.513 W for a coated double-glazed window with 0.05 emissivity. It was calculated as 31.321 W for the uncoated triple-glazed window with 0.89 emissivity and found as 13.596 W for the coated triple-glazed window with 0.05 emissivity. It was figured out as 24.240 W for the uncoated quadruple-glazed window with 0.89 emissivity and 9.728 W for the coated quadruple-glazed window with 0.05 emissivity. From [Figure 3](#) to [Figure 8](#), solar energy gain or loss, heat loss or heat gain and their ratios are shown related to the amount of solar energy and heat transfer depending on the south, north and west / east direction; for winter and summer period in the 1<sup>st</sup> climate zone. For the winter months, the maximum of total heat loss was calculated as 267.537 W for double-glazed windows with 0.89 emissivity in the 5<sup>th</sup> climate zone and the minimum of total heat loss was 74.087 W in 1<sup>st</sup> climate zone. For double-glazed windows with 0.05 emissivity, the highest heat loss was 144.121 W in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest was 34.793 W in the 1<sup>st</sup> climate zone. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest total of heat loss was found to be 180.360 W in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest was 50.671 W in the 1<sup>st</sup> climate zone. For windows with 0.05 emissivity, the highest value was found as 93.520 W in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest value was 21.995 W in the 1<sup>st</sup> climate zone. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the maximum total of heat loss was determined as 136.274 W in the 5<sup>th</sup> climate zone and the minimum was 37.920 W in the 1<sup>st</sup> climate zone. For the windows with 0.05 emissivity, 69.308 W in the 5<sup>th</sup> climate zone with the highest value and 15.738 W in the 1<sup>st</sup> climate zone with the lowest value. These values are shown in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

For the summer period, the maximum heat gain was found as 28.291 W for double-glazed windows with 0.89 emissivity in the 1<sup>st</sup> climate zone and the lowest total of heat gain was 9.115 W in 2<sup>nd</sup> climate zone. For double-glazed windows with 0.05 emissivity, the highest total of heat gain was 13.286 W in the 1<sup>st</sup> climate zone and the lowest was 4.509 W in the 2<sup>nd</sup> climate zone. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest total heat gain was determined as 19.350 W in the 1<sup>st</sup> climate zone and the

lowest was 6.129 W in the 2<sup>nd</sup> climate zone. For windows with 0.05 emissivity, the highest value was calculated as 8.399 W in the 1<sup>st</sup> climate zone and the lowest value was 2.856 W in the 2<sup>nd</sup> climate zone. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the maximum total of heat gain was calculated as 13.680 W in the 1<sup>st</sup> climate zone and the minimum was 4.629 W in the 2<sup>nd</sup> climate zone. For the windows with 0.05 emissivity, 6.010 W in the 1<sup>st</sup> climate zone with the highest value and 2.092 W in the 2<sup>nd</sup> climate zone with the lowest value. These values are given in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

For the winter months, the average of the highest solar energy gain/heat loss ratio for double-glazed windows with 0.89 emissivity is calculated as 7.792 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest average ratio was 2.072 W in the north direction in the 2<sup>nd</sup> climate zone. For windows with 0.05 emissivity, the maximum average ratio was 14.823 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone and the minimum average ratio was 3.834 W in the north direction in the 4<sup>th</sup> climate zone. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the average of the highest solar energy gain/heat loss ratio was found as 11.858 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone and the average of the lowest solar energy gain/heat loss ratio was 2.245 W in the north direction in the 4<sup>th</sup> climate zone. The average of the highest solar energy gain/heat loss ratio for windows with 0.05 emissivity was 22.869 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest was 4.639 W in the north direction in the 4<sup>th</sup> climate zone. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest average ratio was calculated as 15.711 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone and the lowest average ratio was 3.033 W in the north direction in the 4<sup>th</sup> climate zone. For windows with 0.05 emissivity, 30.860 W in the west/east direction in the 5<sup>th</sup> climate zone with the highest value and 6.305 W in the north direction in the 4<sup>th</sup> climate zone with the lowest value. The values are given in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

For the summer period, the highest average solar energy loss/heat gain ratio for double-glazed windows with 0.89 emissivity was found as 16.541 W in the west/east direction in the 2<sup>nd</sup> climate zone and the lowest ratio was 3.164 W in the north direction in the 1<sup>st</sup> climate zone. For windows with 0.05 emissivity, the highest average ratio was calculated as 33.423 W in the west/east direction in the 1<sup>st</sup> climate zone and the minimum average ratio was 6.738 W in the north direction in the 1<sup>st</sup> climate zone. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the average of the highest solar energy loss/heat gain ratio was estimated as 24.598 W in the west/east direction in the 2<sup>nd</sup> climate zone and the lowest average of solar energy loss/heat gain ratio was 4.626 W in the north direction in the 2<sup>nd</sup> climate zone. The average of the highest solar energy loss/heat gain ratio for windows with 0.05 emissivity was determined as 55.742 W in the west/east direction in the 1<sup>st</sup> climate zone and the lowest was 10.659 W in the north direction in the 1<sup>st</sup> climate zone. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest average ratio was calculated as 32.588 W in the

west/east direction in the 2nd climate zone and the lowest average ratio was 11.882 W in the north direction in the 1st climate zone. For windows with 0.05 emissivity, 71.693 W in the west/east direction in the 1st climate zone with the highest value and 14.986 W in the north direction in the 1st climate zone with the lowest value. The values are given in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

For the winter months, the maximum total of solar energy gain and total of heat loss difference for double-glazed windows with 0.89 emissivity was found as 56.953 W in the south direction in the 1st climate zone and the lowest was -113.217 W in the north direction in the 5th climate zone. For windows with 0.05 emissivity, the highest value was calculated as 109.534 W in the south direction in the 3rd climate zone and the lowest was in the north direction in the 4th climate zone with 5.402 W. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest solar energy gain and heat loss difference was 80.369 W in the south direction in the 1st climate zone and -26.040 W in the north direction in the 5th climate zone at the lowest value. For windows with 0.05 emissivity, the highest and lowest values were found as 148.400 W in the south direction in the 5th climate zone and 42.805 W in the 1st climate zone, respectively. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the maximum solar energy gain and heat loss difference was 109.854 W in the south direction in the 3rd climate zone and 7.009 W in the north direction in the 4th climate zone as the lowest value. For windows with 0.05 emissivity, the highest was 172.612 W in the south direction and the lowest was 49.062 W in the north direction in the 1st climate zone. The values were given in detail in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

For the summer period, the highest total of solar energy loss and heat gain was calculated as -130.771 W in the west/east direction in the 1st zone and was found as -65.995 W in the north direction in the 2nd zone for double-glazed windows with 0.89 emissivity. For windows with 0.05 emissivity, it is calculated as -115.766 W in the west/east direction in the 1st zone and -61.389 W in the north direction in the 2nd zone. For triple-glazed windows with 0.89 emissivity, the maximum total of solar energy loss and heat gain was determined as -121.830 W in the west/east direction and the minimum was -63.009 W in the 2nd zone. For windows with 0.05 emissivity, it was found as -142.776 W in the west/east direction in the 1st zone and -59.736 W in the north direction in the 2nd zone. For quadruple-glazed windows with 0.89 emissivity, the highest value was calculated as -108.490 W in the west/east direction in the 1st zone and the lowest value was -61.509 W in the north direction in the 2nd zone. For windows with 0.05 emissivity, the highest total of solar energy loss and heat gain was -116.160 W in the west/east direction in the 1st zone and -58.972 W in the north direction in the 2nd zone. More details were given in [Appendix 2](#), [Appendix 3](#) and [Appendix 4](#).

The zone with the highest heat loss is the 5th zone for double, triple and quadruple-glazed windows while the lowest zone is the 1st zone during the winter months. The reason for this is that in the 5th climate zone, heating is

carried out in the whole year. Besides, in the 1st climate zone, seven months of heating and four months of cooling are performed and in the 2nd climate zone, heating for eight months and cooling for three months is done. In the 3rd and 4th climate zones, only heating is done for ten months of the year. There is no cooling in the 3rd, 4th and 5th climatic zones. While the number of months heating increases from climate zone 1 to 5, the number of months with cooling decreases.

The highest total solar energy gain was calculated as 241.920 W and the lowest was 131.040 W for double, triple and quadruple glazed windows with emissivities of 0.89 and 0.05 in the south direction for the winter months. The highest total solar energy gain for north direction was determined as 154.320 W and the lowest was 64.800 W. The highest total solar energy gain for the west/east direction was found as 226.800 W and 96.960 W.

For the summer months, the highest total solar energy gain was calculated as 88.800 W and the lowest was 67.440 W for double, triple and quadruple glazed windows with emissivities of 0.89 and 0.05 in the south direction. The highest total solar energy gain for north direction was determined as 70.560 W and the lowest was 56.880 W. The highest total solar energy gain for the west/east direction was found as 102.480 W and 83.040 W.

Solar energy gain/heat loss ratio in winter and solar energy loss/heat gain ratio change in summer depends on whether the 1st climate zone is the hottest and the 5th climate zone is the coldest zone and the lowest solar energy is in the north direction. While these ratios are higher in the south direction in the 1st climate zone, the west/east direction is higher in other climate zones. These rates are calculated at a much higher value in west/east direction.

The heat loss increases from climate zone 1st to 5th during the winter months. In summer period, heat gain (cooling process) is higher in the 1st climate zone, while it is less in the 2nd climate zone.

Solar energy gain/heat loss ratio increases as the outdoor temperature increases in the winter months when heating is performed. In the summer months when cooling is performed, as the outdoor temperature increases, the rate of solar energy loss/heat gain decreases.

The heat loss is lower in the coated glass windows with 0.05 emissivity for the winter months compared to the uncoated glass windows with 0.89 emissivity. Accordingly, the solar energy gain/heat loss ratio is higher. In summer, heat gain occurs at a lower rate. Accordingly, the rate of solar energy loss/heat gain is higher.

#### 4 Conclusions

The results obtained by the relationship between solar energy and heat loss due to coated and uncoated double, triple, and quadruple glazed windows with different emissivity:

The convection heat transfer coefficient increases from climate zones 1st to 5th and radiation heat transfer coefficient reduces.

As the number of glass increases, convection, radiation and general heat transfer coefficient decreases.

For uncoated glasses with 0.89 emissivity compared to coated glasses with 0.05 emissivity; radiation and general heat transfer coefficient are of higher value.

For coated glasses with 0.05 emissivity compared to uncoated glasses with 0.89 emissivity; since heat loss in winter and heat gain occur lower in summer, solar energy gain/heat loss rate in winter and solar energy loss/heat gain rate in summer is higher. Thus, while benefiting from solar energy more in winter, the effect of solar energy is reduced in summer.

For the heating period, as the number of glasses increases, the heat loss decreases. The rate of benefiting from solar energy increases. Thus, the rate of solar energy gain/heat loss increases. Heat gain decreases for the cooling period. Thus, the less solar energy gain occurs and the less cooling process is performed.

The highest energy saving is provided in quadruple-glazed windows with 0.05 emissivity. The quadruple-glazed window has a high solar energy gain/heat loss ratio for the heating period. For the cooling period, it has a low solar energy loss/heat gain ratio.

The highest solar gain (loss in summer months) occurs on the south direction and the lowest on the north direction (loss in summer months).

Considering the annual cumulative energy total in the 1st climate zone where heating and cooling are performed together, 92.2% of the heat loss in the double-glazed windows with 0.89 emissivity in the south direction is provided by solar energy. Also 196.4% of the heat loss is provided in 0.05 emissivity glass. Similarly, in the 2nd climate zone where heating and cooling are performed together, 72.5% of heat loss is provided in double-glazed windows with 0.89 emissivity, and 145.3% is provided in windows with 0.05 emissivity. It is seen that there is more solar energy gain than heat loss in windows with 0.05 emissivity. Thus, the gain obtained is a passive energy gain that can be used to reduce the overall energy loss of the whole building.

When the 3rd, 4th, and 5th climate zones examined where only heating is performed; in the 5th climate zone at the south direction, it is calculated that 167.9% of the heat loss in the double-glazed, 258.7% of the heat loss in the triple-glazed windows, and 349.1% of the heat loss in the quadruple-glazed windows with 0.05 emissivity can be passively provided by solar energy. This is a significant amount to reduce the energy loss of the entire building.

When all calculations are considered, quadruple-glazed windows with 0.05 emissivity are the most suitable glazing system in terms of annual energy gain for all climate zones considering the entire building.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %14

#### References

- [1] A. Kralj, M. Drev, M. Žnidaršic, B. Cerne, J. Hafner and B. P. Jelle, Investigations of 6-pane glazing: Properties and possibilities. *Energy and Buildings*, 190, 61–68, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.033>
- [2] I. A. Gondal, M. S. Athar and M. Khurram, Role of passive design and alternative energy in building energy optimization. *Indoor and Built Environment*, 30(2), 278-289, 2021. <https://doi.org/10.1177/1420326X19887486>
- [3] T. P. Obrecht, M. Premrov and V. Z. Leskovic, Influence of the orientation on the optimal glazing size for passive houses in different European climates (for non-cardinal directions). *Solar Energy*, 189, 15–25, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.037>
- [4] T. G. S. Lago, K. A. R. Ismail, F. A. M. Lino, Ventilated double glass window with reflective film: Modeling and assessment of performance. *Solar Energy*, 185, 72–88, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.047>
- [5] T. Andersona and M. Luther, Designing for thermal comfort near a glazed exterior wall. *Architectural Science Review*, 55, 3:186–195, 2012. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.697863>
- [6] M. J. Alam and M. A. Islam, Effect of outdoor shading and window glazing on energy consumption of buildings in Bangladesh. *Advances in Building Energy Research*, 11, 2:180–192, 2017. <https://doi.org/10.1080/17512549.2016.1190788>
- [7] M. Arıcı and M. Kan, An investigation of flow and conjugate heat transfer in multiple pane windows with respect to gap width, emissivity and gas filling. *Renewable Energy* 75:249-256, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.004>
- [8] H. Li, K. Zhong, J. Yu, Y. Kang and Z. Zhai (John) Z, Solar energy absorption effect of buildings in hot summer and cold winter climate zone China. *Solar Energy* 198:519–528, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.047>
- [9] J. Li, Q. Guan, H. Yang, Winter energy consumption in reading space of green library in cold regions. *International Journal of Heat and Technology* 36, 4:1256-1261, 2018. <https://doi.org/10.18280/ijht.360413>
- [10] I. Udrea and V. Badescu, Usage of solar shading devices to improve the thermal comfort in summer in a Romanian PassivHaus. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 96, 5:471–486, 2020. <https://doi.org/10.1177/0037549719887790>
- [11] Y. Zhu, X. Fan, C. Wang and G. Sang, Analysis of heat transfer and thermal environment in a rural residential building for addressing energy poverty. *Applied Sciences*, 8, 2077:1-13, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8112077>
- [12] C. Liu, Y. Wu, D. Li, T. Ma, and X. Liu, Investigations on thermal and optical performances of a glazing roof with PCM layer. *International journal of energy research International Journal of Energy Resources*, 41:2138–2148, 2017. <https://doi.org/10.1002/er.3775>
- [13] Y. Suna, K. Shanks, H. Baig, W. Zhang, X. Hao, Y. Li, B. He, R. Wilson, H. Liu, S. Sundaram, J. Zhang, L. Xie, T. Mallick and Y. Wu, Integrated semi-transparent cadmium telluride photovoltaic glazing into windows: energy and daylight performance for different architecture designs. *Applied Energy*, 23:972–984, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.133>
- [14] C. Baglivo, P. M. Congedo, M. D. Cataldo, L. D. Coluccia and D. D’Agostino, Envelope design optimization by thermal modelling of a building in a



- warm climate. *Energies*, 10, 1808:1-34, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10111808>
- [15] I. R. Maestre, J. L. F. Blázquez, F. J. G. Gallero and J. D. M. Baladé. Effect of sky discretization for shading device calculation on building energy performance simulations. *Energies* 13, 138:1-14, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13061381>
- [16] R. Khakian, M. Karimimoshaver, F. Aram, S. Z. Benis, A. Mosavi and A. R. Varkonyi-Koczy, Modeling nearly zero energy buildings for sustainable development in rural areas. *Energies* 13, 2593:1-19, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13102593>
- [17] G. Zhang, Z. Wang, D. Li, Y. Wu and M. Arıcı, Seasonal thermal performance analysis of glazed window filled with paraffin including various nanoparticles. *International Journal of Energy Resources*, 44:3008–3019, 2020. <https://doi.org/10.1002/er.5129>
- [18] A. F. Altun and M. Kılıç, Influence of window parameters on the thermal performance of office rooms in different climate zones of Turkey. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9:226-243, 2019.
- [19] M. Košir, T. Gostiša and Ž. Kristl, Influence of architectural building envelope characteristics on energy performance in Central European climatic conditions. *Journal of Building Engineering*, 15,278–288, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.023>
- [20] T. Ashrafian and N. Moazzen, The impact of glazing ratio and window configuration on occupants' comfort and energy demand: The case study of a school building in Eskisehir. Turkey. *Sustainable Cities and Society*, 47:101483:1-14, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101483>
- [21] Q. Xuan, G. Li, Y. Lu, B. Zhao, X. Zhao, Y. Su, J. Ji and G. Pei, Design, optimization and performance analysis of an asymmetric concentrator-PV type window for the building south wall application. *Solar Energy*, 193:422–433,2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.084>
- [22] A. Sedaghat, F. Alkhatib, S. A. A. Oloomi, F. Sabri, H. Salem, S. Mohammad, J. Z. Waqar, M. A. Malayer and A. Negahi, Experimental study on the performance of solar window films in office buildings in Kuwait. *Journal of Nanoparticle Research*, 22, 85:1-17, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-04789-8>
- [23] O. S. Asfour, Solar and shading potential of different configurations of building integrated photovoltaics used as shading devices considering hot climatic conditions. *Sustainability*, 10,4373:1-15, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10124373>
- [24] H. Manz and U. P. Menti, Energy performance of glazings in European climates. *Renewable Energy*, 37:226-232, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.016>
- [25] J. E. Frederick, Energy transfer through single- and double-pane windows subject to winter time environmental radiation. *Journal of Building Physics*, 38, 3:214–233, 2014. <https://doi.org/10.1177/1744259113501628>
- [26] J. Karlsson J and A. Roos, Evaluation of window energy rating models for different houses and European climates. *Solar Energy*, 76:71–77, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.016>
- [27] S. S. Chandel and R. K. Aggarwal, Performance evaluation of a passive solar building in Western Himalayas. *Renewable Energy*, 33:2166–2173, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.008>
- [28] S. Lu, Z. Li, Q. Zhao and F. Jiang, Modified calculation of solar heat gain coefficient in glazing façade buildings. *Energy Procedia*, 122, 151-156, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.335>
- [29] T. Kaasalainen, A. Makinen, T. Lehtinen, M. Moisio, J. Vinha, Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. *Journal of Building Engineering*, 27,100996:1-14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100996>
- [30] S. Jaber and S. Ajib, Thermal and economic windows design for different climate zones. *Energy and Buildings*, 43:3208–3215, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.019>
- [31] J. S. Carlos and H. Corvacho, Evaluation of the thermal performance indices of a ventilated double window through experimental and analytical procedures: Uw-values. *Renewable Energy*, 63:747-754, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.031>
- [32] H. Karabay and M. Arıcı, Multiple pane window applications in various climatic regions of Turkey. *Energy and Buildings*, 45:67-71, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.020>
- [33] O. Kon, Farklı yayıncılığa sahip iki, üç ve dört camlı pencerelere bağlı yakıt tüketimi. 1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering (ICAMMEN 2018), Ankara/Turkey 8-9 November 2018.
- [34] F. Al-Sibai, B. Hillemacher, M. Burghold and R. Kneer, Untersuchung zur dämmwirkung von wärmedämm-materialien mit infrarot reflektierenden oberflächen. *Bauphysik*, 35, 4, 225-234, 2013. <https://doi.org/10.1002/bapi.201310071>
- [35] O. Kon, Calculation of fuel consumption and emissions in buildings based on outdoor walls and windows using economic optimization. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33, 1:101-113, 2018. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.406783>
- [36] H. Kitagawa, T. Asawa, T. Kubota, A. R. Trihamdani, K. Sakurada and H. Mori, Optimization of window design for ventilative cooling with radiant floor cooling systems in the hot and humid climate of Indonesia. *Building and Environment*, 188, 107483:1-13, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107483>
- [37] D. Hu and Y. Gu, A membrane reflector, polymer hybrid infrared emitter for better radiative cooling performance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 234,111417:1-8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111417>
- [38] A. Heydari, S. E. Sadati and M. R. Gharib, Effects of different window configurations on energy consumption in building: Optimization and economic analysis. *Journal of Building Engineering*, 35,102099:1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102099>
- [39] L. Zhang, H. Zhang, X. Xu and L. Dong, Optimization method for prefabricated restroom envelope energy saving characteristics in hot summer and cold winter zone. *Energy Exploration & Exploitation*, 39,3:944–

- 961, 2021. <https://doi.org/10.1177/0144598721993934>
- [40] A. M. Raimundo, N. B. Saraiva, L. Dias Pereira and A. C. Rebelo, Market-Oriented cost-effectiveness and energy analysis of windows in Portugal. *Energies*, 14, 3720:1-19, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14133720>
- [41] Y. Shi, X. Xi, Y. Zhang, H. Xu, J. Zhang and R. Zhang, Prediction and analysis of the thermal performance of composite vacuum glazing. *Energies*, 14,5769:1-15, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14185769>
- [42] Z. Wang, Q. Tian and J. Jia, Numerical study on performance optimization of an energy-saving insulated window. *Sustainability*, 13, 935:1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13020935>
- [43] Turkish Standard, TS 825, Thermal insulation requirements for buildings. December 2013.
- [44] Turkish Standard, TS 2164, principles for the preparation of the projects of the central heating systems. 2000.
- [45] Çengel Y. Isı ve Kütle Transferi Pratik bir Yaklaşım. Güven Kitabevi, İzmir-Türkiye, 2011.



Appendix-1. The solar energy gain or loss, heat loss or gain and their ratios and energy exchange for uncoated and coated double-glazed windows

Parameter	Winter										Summer					
	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 1		Zone 2			
	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoate d ( $\epsilon=0.89$ )		
<b>South Direction</b>																
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	131.040	131.040	153.040	153.840	197.280	197.280	197.280	197.280	241.920	241.920	241.920	241.920	-88.800	-88.800	-67.440	-67.440
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	34.793	74.087	63.439	128.241	87.746	171.840	111.958	215.657	144.121	267.537	144.121	267.537	-13.286	-28.291	-4.509	-9.115
<b>Average Ratio</b>	11.063	5.193	5.745	2.848	8.902	4.549	4.105	2.131	12.640	6.804	12.640	6.804	-9.148	-4.296	-26.526	-13.127
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	96.247	56.953	89.601	25.599	109.534	25.440	85.322	-18.377	97.799	-25.617	102.086	117.091	-	-	-71.949	-76.555
<b>North Direction</b>																
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	64.800	64.800	83.760	83.760	117.360	117.360	117.360	117.360	154.320	154.320	154.320	154.320	-70.560	-70.560	-56.880	-56.880
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	34.793	74.087	63.439	128.241	87.746	171.840	111.958	215.657	144.121	267.537	144.121	267.537	-13.286	-28.291	-4.509	-9.115
<b>Average Ratio</b>	5.632	2.644	4.188	2.072	6.977	3.566	3.834	1.544	10.206	5.494	10.206	5.494	-6.738	-3.164	-22.803	-11.285
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	30.007	-9.287	20.321	-44.481	29.614	-54.480	5.402	-98.297	10.199	-113.21	83.846	98.851	-61.389	-61.389	-61.389	-65.995
<b>West/East Direction</b>																
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	96.960	96.960	124.320	124.320	173.040	173.040	173.040	173.040	226.800	226.800	226.800	226.800	-102.48	-102.48	-83.040	-83.040
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	34.793	74.087	63.439	128.241	87.746	171.840	111.958	215.657	144.121	267.537	144.121	267.537	-13.286	-28.291	-4.509	-9.115
<b>Average Ratio</b>	8.265	3.880	6.071	3.003	10.197	5.211	4.332	2.248	14.823	7.992	14.823	7.992	-9.720	-4.564	-33.423	-16.541
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	62.167	22.873	60.881	-3.921	85.294	1.200	61.082	-42.617	82.679	-40.737	-115.76	-130.77	-115.76	-130.77	-87.549	-92.155

\* Since there is solar energy gain and heat loss in winter, it is defined with a plus sign. In summer, it is defined with a minus sign because there is solar energy loss and heat gain. The ratio is the solar energy gain / heat loss ratio for the winter period in which the heating is performed, the solar energy loss / heat gain ratio for the summer period when the cooling is performed.

Appendix-2. The solar energy gain or loss, heat loss or gain and their ratios and energy exchange for uncoated and coated triple-glazed windows

Parameter	Winter										Summer				
	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 1		Zone 2		
	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	
<b>South Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	131.040	131.040	153.040	153.040	197.280	197.280	197.280	197.280	241.920	241.920	241.920	241.920	241.920	241.920	-67.440
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	21.995	50.671	40.181	86.217	56.064	115.778	71.795	153.110	93.520	180.360	180.360	180.360	180.360	180.360	-6.129
<b>Average Ratio</b>	17.500	6.630	9.070	4.228	13.942	6.751	6.401	3.067	19.469	10.095	10.095	10.095	10.095	10.095	-41.858
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	109.045	80.369	112.859	66.823	141.216	81.502	125.485	44.170	148.400	61.560	61.560	61.560	61.560	61.560	-73.569
<b>North Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	64.800	64.800	83.760	83.760	117.360	117.360	117.360	117.360	154.320	154.320	154.320	154.320	154.320	154.320	-56.880
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	21.995	50.671	40.181	86.217	56.064	115.778	71.795	153.110	93.520	180.360	180.360	180.360	180.360	180.360	-6.129
<b>Average Ratio</b>	8.909	3.032	6.612	3.082	10.929	5.292	4.639	2.245	15.721	8.152	8.152	8.152	8.152	8.152	-35.983
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	42.805	14.129	43.579	-2.457	61.296	1.582	45.565	-35.750	60.800	-26.040	-26.040	-26.040	-26.040	-26.040	-63.009
<b>West/East Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	96.960	96.960	124.320	124.320	173.040	173.040	173.040	173.040	226.800	226.800	226.800	226.800	226.800	226.800	-83.040
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	21.995	50.671	40.181	86.217	56.064	116.138	71.795	153.110	93.520	180.360	180.360	180.360	180.360	180.360	-6.129
<b>Average Ratio</b>	13.074	4.518	9.584	4.467	15.973	7.735	6.754	3.268	22.809	11.858	11.858	11.858	11.858	11.858	-24.598
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	74.965	46.289	84.139	38.103	116.976	56.902	101.245	19.930	133.280	46.440	46.440	46.440	46.440	46.440	-89.169

\* Since there is solar energy gain and heat loss in winter, it is defined with a plus sign. In summer, it is defined with a minus sign because there is solar energy loss and heat gain. The ratio is the solar energy gain / heat loss ratio for the winter period in which the heating is performed, the solar energy loss / heat gain ratio for the summer period when the cooling is performed.

Appendix-3. The solar energy gain or loss, heat loss or gain and their ratios and energy exchange for uncoated and coated quadruple-glazed windows

Parameter	Winter					Summer									
	Zone 1		Zone 2		Zone 3		Zone 4		Zone 5		Zone 1		Zone 2		
	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	Coated ( $\epsilon=0.05$ )	Uncoated d ( $\epsilon=0.89$ )	
<b>South Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	131.040	131.040	153.040	152.400	197.280	197.280	197.280	197.280	241.920	241.920	241.920	241.920	88.800	-67.440	-67.440
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	15.738	37.920	29.435	65.123	41.244	87.426	52.806	109.784	69.308	136.274	136.274	6.010	-13.680	-2.092	-4.629
<b>Average Ratio</b>	24.457	10.150	12.382	5.587	18.955	8.942	8.700	4.185	26.271	13.375	13.375	-15.208	-17.294	-57.112	-25.862
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	115.302	93.120	123.605	87.277	156.036	109.854	144.474	87.496	172.612	105.646	105.646	-94.810	-102.48	-69.532	-72.069
<b>North Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	64.800	64.800	83.760	82.560	117.360	117.360	117.360	117.360	154.320	154.320	154.320	154.320	-70.560	-70.560	-56.880
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	15.738	37.920	29.435	65.123	41.244	87.426	52.806	109.784	69.308	136.274	136.274	6.010	-13.680	-2.092	-4.629
<b>Average Ratio</b>	12.450	5.167	9.026	4.062	14.857	7.009	6.305	3.033	21.214	10.800	10.800	-14.896	-11.882	-49.097	-22.233
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	49.062	26.880	54.325	17.437	76.116	29.934	64.554	7.576	85.012	18.046	18.046	-76.570	-84.240	-58.972	-61.509
<b>West/East Direction</b>															
<b>Solar Energy Gain or Loss Total (W)</b>	96.960	96.960	124.320	124.280	173.040	173.040	173.040	173.040	226.800	226.800	226.800	226.800	-102.48	-102.48	-83.040
<b>Heat Loss or Gain Total (W)</b>	15.738	37.920	33.887	65.123	41.244	87.426	52.806	109.784	69.308	136.274	136.274	6.010	-13.680	-2.092	-4.629
<b>Average Ratio</b>	18.270	7.583	12.912	5.913	21.715	10.244	9.180	4.390	30.860	15.711	15.711	-21.488	-17.014	-71.963	-32.588
<b>Difference for Winter and Total for Summer (W)</b>	81.222	59.040	90.433	59.157	131.796	85.614	120.234	63.256	157.492	90.526	90.526	-108.49	-116.16	-85.132	-87.669

\* Since there is solar energy gain and heat loss in winter, it is defined with a plus sign. In summer, it is defined with a minus sign because there is solar energy loss and heat gain. The ratio is the solar energy gain / heat loss ratio for the winter period in which the heating is performed, the solar energy loss / heat gain ratio for the summer period when the cooling is performed.





# An investigation of the effect of tapered angle and boundary condition on natural frequency of different ceramic coated Ti-6Al-4V alloy with finite element analysis

## Farklı seramik kaplı Ti-6Al-4V alaşımının doğal frekansına konik açı ve sınır koşulunun etkisinin sonlu eleman analizi ile incelenmesi

Berkay Ergene<sup>1,\*</sup> , Çağın Bolat<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Pamukkale University, Mechanical Engineering Department, 20160, Denizli, Turkey

<sup>2</sup> Istanbul Technical University, Mechanical Engineering Department, 34437, Istanbul, Turkey

### Abstract

In recent years, the interest in light metals has increased due to the increasing demand for components with high specific strength and long service life in the industry. In this context, titanium alloys have become very common and popular owing to their high strength/weight properties and superior refractory characteristics. In this study, the effect of boundary condition and tapered angle on the natural frequency and vibration behavior of the beam was investigated in Ti-6Al-4V beams coated with three different ceramic materials; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, and TiB<sub>2</sub>. Tapered angle values are considered as 0°, 0.2°, 0.4°, 0.6° and 0.8°. Besides, boundary conditions were evaluated in two conditions including left side fixed or both sides fixed. All analyzes were performed in the finite element-based Ansys APDL 19 program. According to the results obtained from the analyses, it was observed that there was a change in the natural frequency values according to the type of coating material, but no difference was found in terms of increase/decrease tendency. In addition, the resultant displacement values were determined for all samples. The results indicated that the resultant displacement values were severely affected by the tapered angle. A decreasing resultant displacement trend was observed in all samples with increasing tapered angle.

**Keywords:** Natural frequency, Ceramic coating, Tapered beam, Vibration behavior, Ti-6Al-4V

### 1 Introduction

Light metals like magnesium, aluminum, and titanium have become popular in recent years due to the fact that they carry a promising potential for high specific mechanical properties. From the composite and foam industry to the medical and construction sector, many different usage areas can be counted for these metals depending on design requirements [1-5]. Owing to their low density and high strength combination, total interest in these classes of materials by researchers and engineers working on structural optimizations has started to rise nowadays [6, 7].

Ti-6Al-4V metallic alloy, which is also called Ti64, is a dual-phase ( $\alpha + \beta$ ) titanium alloy and it exhibits sufficient

### Öz

Son yıllarda sektörde özgül mukavemeti yüksek ve uzun ömürlü bileşenlere olan talebin artması nedeniyle hafif metallerde olan ilgi artmıştır. Bu bağlamda titanyum alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık özellikleri ve üstün refrakter özellikleri nedeniyle oldukça yaygın ve popüler hale gelmiştir. Bu çalışmada, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN ve TiB<sub>2</sub> olmak üzere üç farklı seramik malzemesi ile kaplanmış Ti-6Al-4V kirişlerde sınır koşulunun ve konik açının kirişin doğal frekansı ve titreşim davranışına olan etkisi araştırılmıştır. Konik açı değerleri 0°, 0.2°, 0.4°, 0.6° ve 0.8° olarak ele alınmıştır. Ayrıca, sınır koşulları sol kenarın sabitlenmesi ya da her iki kenarın da sabitlenmesi olarak iki şekilde değerlendirilmiştir. Tüm analizler sonlu elemanlar bazlı Ansys APDL 19 programında gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, kaplama malzemesinin cinsine göre doğal frekans değerlerinde değişim olduğu ancak artış/azalma eğilimi açısından bir farklılık olmadığı görülmüştür. Ek olarak, tüm numuneler için bileşke deplasman değerleri belirlenmiştir. Sonuçlar, bileşke deplasman değerlerinin konik açıdan ciddi şekilde etkilendiğini göstermiştir. Konik açının artışı ile birlikte tüm numunelerin bileşke deplasman değerlerinde azalış eğilimi gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Doğal frekans, Seramik kaplama, Konik kiriş, Titreşim davranışı, Ti-6Al-4V

yield strength, low density, good fracture toughness, and perfect corrosion resistance [8]. Thanks to its high specific mechanical responses, Ti-6Al-4V alloy has been used frequently by engineers in lots of critical structural parts such as gas turbines, jet engines, fuselage components, and airframe parts [9, 10]. Also, in comparison with the other alloys series of titanium, it is correct to allege that Ti-6Al-4V dominates the market sales since its appearing in the sector [11]. Weight reduction capacity, superior mechanical features, and excellent corrosion endurance are the most influential reasons behind this circumstance.

To date, there has been made lots of scholarly endeavors aiming to elucidate the mechanical and physical properties

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bergene@pau.edu.tr (B. Ergene)

Geliş / Received: 24.02.2022 Kabul / Accepted: 06.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1078779

of Ti-6Al-4V alloys by various investigation teams. Nevertheless, these attempts have remained limited to elastic properties, plastic behaviors, wear resistance, fatigue, and corrosion potential [12-16]. Corrosion can be interpreted as a noteworthy problem for this kind of titanium alloy in industrial service conditions and can be prevented with some coating techniques. In the technical literature, some valuable efforts are present to emphasize the positive effect of the coating process. For instance, Hussain et al. [17] proposed poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/hydroxyapatite composite coating to block undesired corrosion in Ti-6Al-4V samples. Haider et al. [18] deposited graphene oxide film on Ti-6Al-4V samples and improved the corrosion resistance. Mordyuk et al. [19] reported that  $Al_2O_3$  composite coatings could enhance the corrosion and oxidation properties of Ti-6Al-4V substrates. Mandal et al. [20] worked on hard AlN coatings and applied them to Ti-6Al-4V samples. The research group claimed that coated samples displayed better tribo-corrosion performance. Bolat et al. [21] pointed out that  $Al_2O_3$ , AlN, and  $TiB_2$  coatings not only reflected better corrosion resistance for Ti-6Al-4V samples but they also provided sufficient elasticity under a load of thermal stresses. Lin et al. [22] offered TiN coatings on Ti-6Al-4V samples for longer service life under corrosive environments and utilized a multi arc-ion plating process for the manufacturing of the protective layer.

In the light of the previous scientific studies published in the technical archives, it can be put forward that there is a lack of interest in the topics of vibration properties of the coated Ti-6Al-4V alloy. Accordingly, if it is considered that all design components are subjected to vibrational effect in

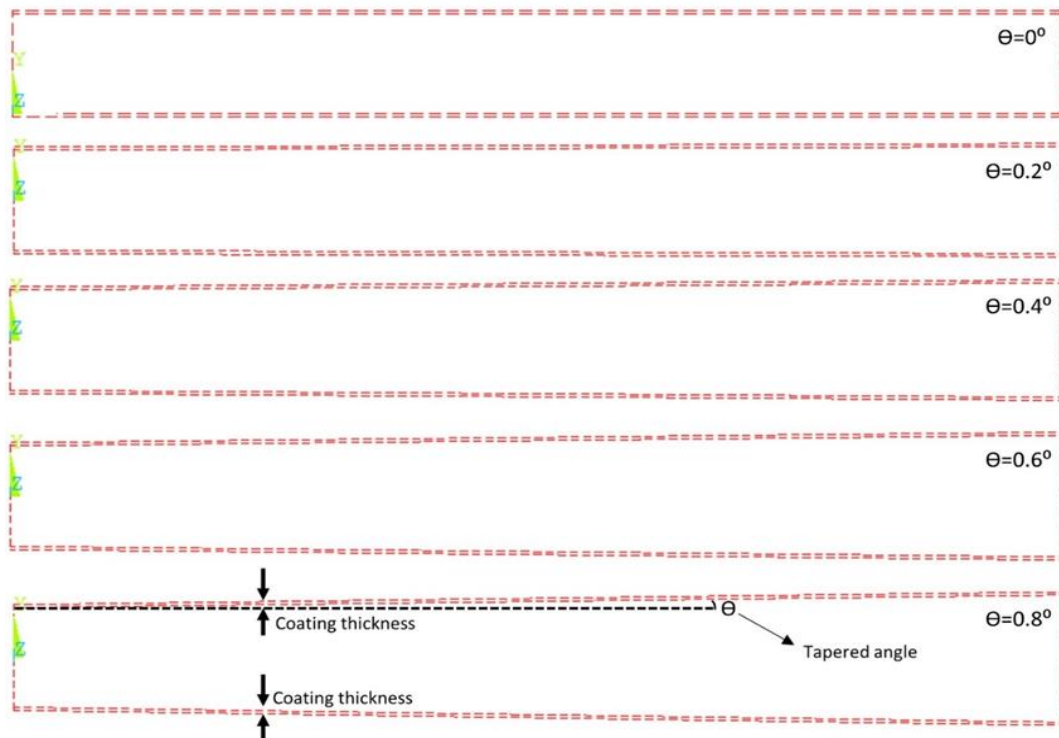
the real service conditions, it should be underlined that the correct detection of the natural frequency of the coated samples is notably significant. Thanks to true frequency predictions, unwanted separation of coating layers and severe damage of substrate material can be hindered. In this paper, three different hard ceramic coatings ( $Al_2O_3$ , AlN, and  $TiB_2$ ) were selected and their effect on the natural frequency capacity of the Ti-6Al-4V was analyzed by using finite element methodology. All components were modeled using proper meshing models. According to the simulation results, all coating ceramics were compared to each other and some further recommendations were made.

## 2 Material and method

It is known that the natural frequency of the cantilever beam can be calculated with Equation 1 given below. In Equation 1,  $f_n$ ,  $K_n$ , E, I, g, l and w demonstrate the natural frequency, constant where n refers to the mode of vibration, elasticity modulus, area moment of inertia, gravitational acceleration, length of the beam and uniform weight respectively [7].

$$f_n = \frac{K_n}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}} \quad (1)$$

In this study, Ti-6Al-4V beam models (with a length of 200 mm, a width of 20 mm, and, a thickness of 2 mm) were designed in Ansys APDL 19.0 finite element-based program as shown in Figure 1.



**Figure 1.** The view of the tapered angles ( $\Theta$ ) on the designed Ti-6Al-4V beams with coating thickness of 0,6 mm;  $\Theta = 0^\circ$ ,  $\Theta = 0.2^\circ$ ,  $\Theta = 0.4^\circ$ ,  $\Theta = 0.6^\circ$  and  $\Theta = 0.8^\circ$  respectively

As coating ceramics, hard AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and TiB<sub>2</sub> were appointed and the coating thickness values were designated as 0.6 mm. During the modeling procedure, both beam and coating layer was created with different areas and then these areas were glued to each other to be able to define different material properties for the beam and coating layer. These three hard ceramics were selected since they have been used frequently by different investigators due to their high hardness and rigidity as composite reinforcements and coating layers [23-28]. Also, five different tapered angles were picked up in order to conceive the impact of the geometrical factor. In Table 1, material properties utilized in the Ansys APDL program can be followed easily.

**Table 1.** Material properties of base and coating materials [21]

Material Type	Elasticity Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Ti-6Al-4V	110 000	0.310	4.41
AlN	341 000	0.240	3.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	403 000	0.210	3.95
TiB <sub>2</sub>	562 000	0.108	4.52

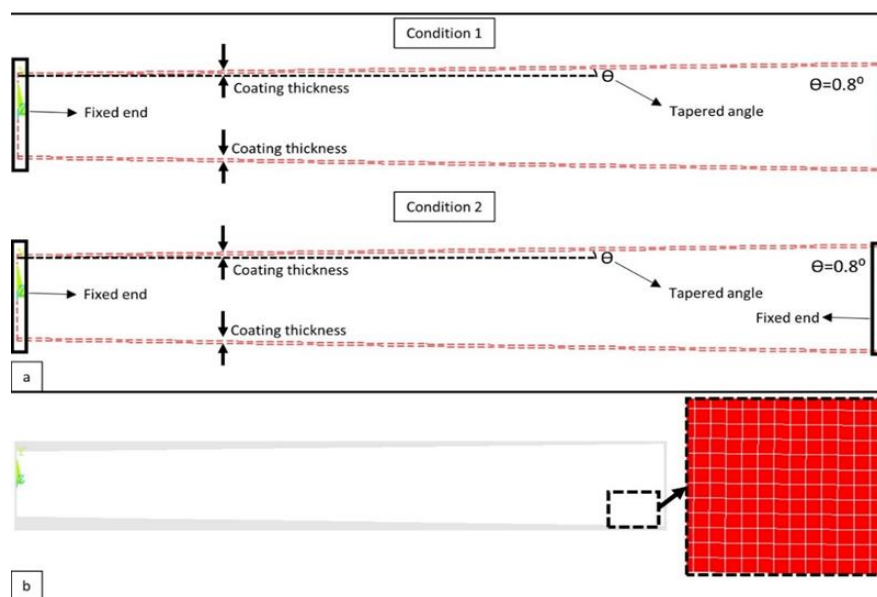
Designed beams were subjected to homogenously meshing procedure with Quad 4 Node 182 element type with plane thickness option which has four nodes with two degrees of freedom at each node: translations in the nodal x and y directions [29]. In addition, two different test conditions in another name boundary conditions were adjusted. Firstly, the left end of the tapered beam was fixed as a boundary condition. Secondly, both design ends were fixed (Figure 2a). During the meshing procedure, firstly the total model was meshed with an element size of 0.1 mm, 0.2 mm, and 0.3 mm respectively, and solved. However, as a result of mesh optimization, it was observed that the obtained results differ for element sizes of 0.3 mm than others

significantly and no remarkable difference was noted between element sizes of 0.2 mm and 0.1 mm. Therefore, to minimize the solution time, 0.2 mm element size was preferred and the total number of 136656 nodes and 135534 elements were generated. Meshed part can be seen in Figure 2b. What is more, modal analyses were conducted in the Block Lanczos module with active ten-mode. Thus, the first natural frequency of the coated tapered beams and occurred maximum resultant displacement values were obtained depending on coating materials, tapered angles and test conditions.

### 3 Finite element results

For the only left-side fixing condition (Condition 1), the results of the finite element analyses performed with the Ansys APDL 19 program are given in Figure 3 and Figure 4. Figure 3 shows how the type of coating material and the tapered angle of the beam affect the first natural frequency values of the beams.

In the case where the coating material is AlN, the highest first natural frequency occurred at 15.647 Hz when the tapered angle was 0.2°. On the other hand, the lowest first natural frequency value of 15.079 Hz was observed when the tapered angle was 0.8°. In case the tapered angle increases from 0° to 0.2°, an increase was observed in the first natural frequency value of the beam, while the first natural frequency values of the beam decrease when the tapered angle exceeded 0.2° (Figure 3a). In the case where the coating material is Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, it was ascertained that the first natural frequency values of the beam escalated in a range of 2% to 3%, compared to the situation in Figure 3a. The highest first frequency value of 16.105 Hz and the lowest first natural frequency value of 15.498 Hz were found when the tapered angle values were 0.2° and 0.8° respectively (Figure 3b). Moreover, it can be noted that the first natural frequency values dropped slightly from 0.2° to 0.8°.



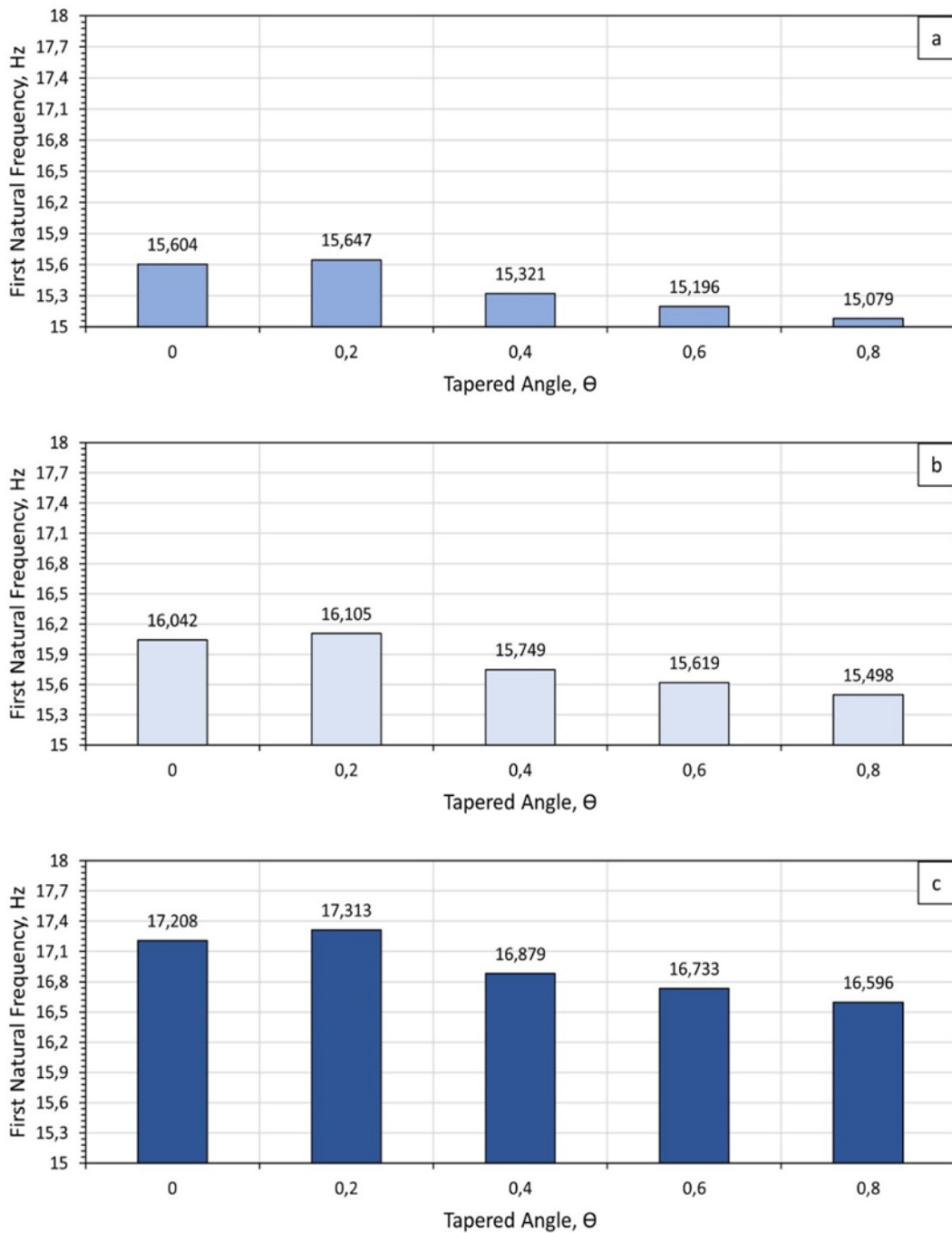
**Figure 2.** An illustrative view of the designed beams with boundary condition and mesh, a) View of the boundary conditions, b) view of the generated mesh



When the coating material type is  $\text{TiB}_2$  (Figure 3c), the first natural frequency value reached its peak value of 17.313 Hz for a  $0.2^\circ$  tapered angle. On the other side, the minimum first natural value was detected as 16.596 Hz for the tapered angle of  $0.8^\circ$ . A similar declining trend that was noticed for other ceramic coating versions was seen for  $\text{TiB}_2$  coated beams between  $0.2^\circ$  and  $0.8^\circ$  tapered angles.

If a general assessment is made with the finite analyses obtained, there is no inconvenience to state that the elastic modulus of the coating ceramics plays an important role in

the natural frequency outcomes. In comparison with the other hard coatings,  $\text{TiB}_2$  coatings had higher levels of frequency and this situation can be attributed to their higher elastic modulus of 562 GPa. Besides, for all kinds of coating types, it can be emphasized that the geometrical factor of the tapered angle also was effective for the natural frequency results. Regardless of the coating material, while a slight frequency increase is present between  $0^\circ$  and  $0.2^\circ$  tapered angle values, a decreasing tendency can be seen from  $0.2^\circ$  and  $0.8^\circ$  tapered angles.

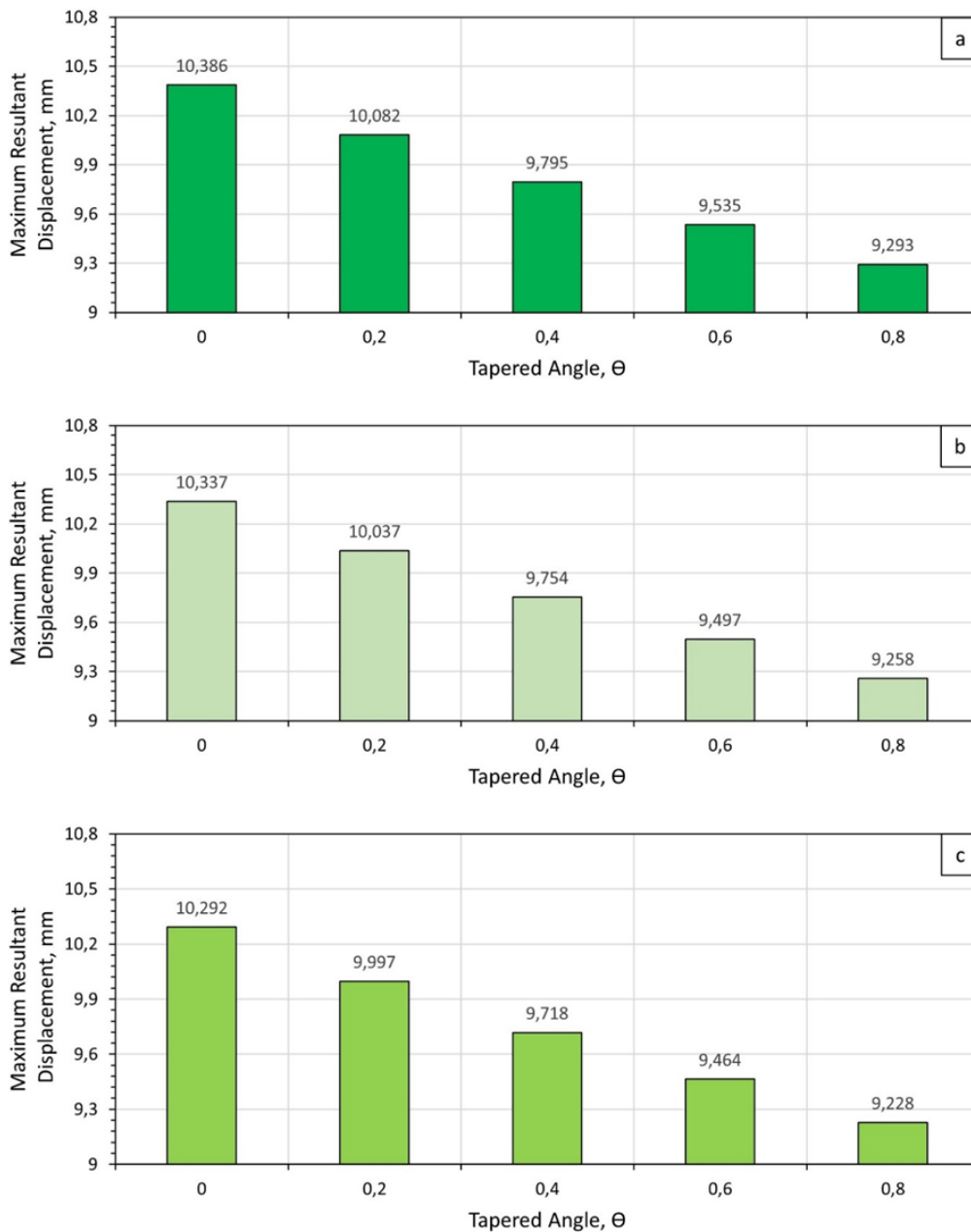


**Figure 3.** First natural frequency values of Ti-6Al-4V beams with different coatings depending on tapered angle for condition 1, a) AlN, b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , c)  $\text{TiB}_2$

Displacement analyses are considerably significant for the design requirements and physical stability of the coating material. Especially for hard and rigid ceramic coating layers, this factor must be taken into the account carefully. In Figure 4, the resultant displacement values of the coating materials are given based on the changing tapered angle values. In addition, it should be pointed out that the obtained displacement values from the finite element analyses can be considered as the relative values due to no acting force on the beams which leads to a deformation in the modal analysis. In Figure 4a, Figure 4b, and Figure 4c, the coating materials of the beams are AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and TiB<sub>2</sub>, respectively. From Figure 4a, the resultant displacement values decrease with the increase of the tapered angle.

According to the analyses, the highest and the lowest resultant displacement values were determined as 10.386 mm and 9.293 mm for AlN and TiB<sub>2</sub> coated beams respectively.

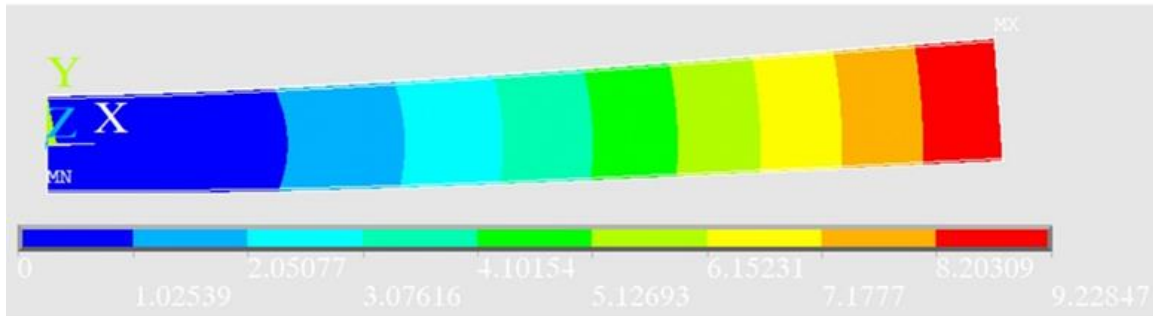
If the graph drawn in Figure 4b is examined, it is seen that the resultant displacement values have a decreasing trend. Similar to the trend in Figure 4a, a diminishment in the resultant displacement values was observed with the increase of the tapered angle in Figure 4b. For Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated beams, the highest resultant displacement value was determined as 10.337 mm when the tapered angle was 0°, and the lowest resultant displacement value was determined as 9.258 mm when the tapered angle was 0.8°.



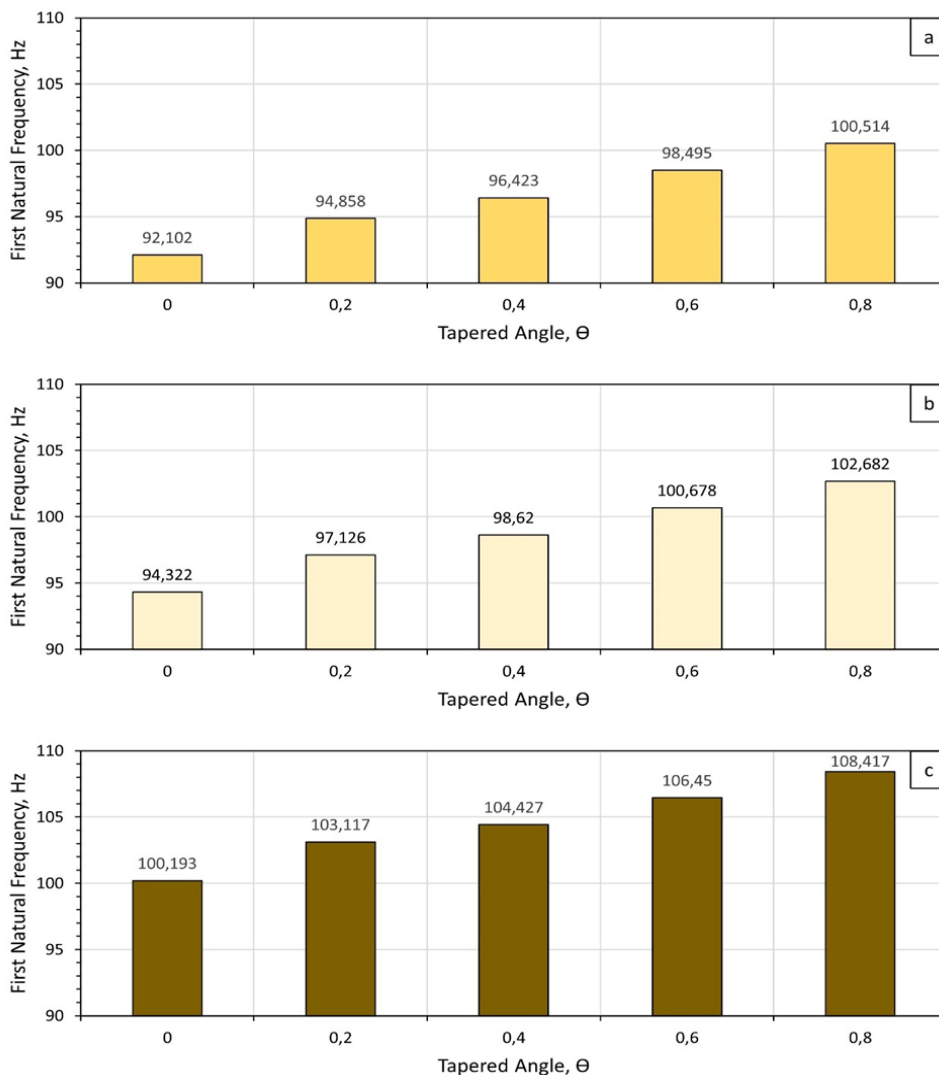
**Figure 4.** Maximum resultant displacement values of Ti-6Al-4V beams with different coatings depending on tapered angle for condition 1, a) AlN, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) TiB<sub>2</sub>

In the case where the coating material is  $TiB_2$ , an apparent decrement was observed in the resultant displacement values similar to the other two cases. From Figure 4c, the highest and lowest resultant displacement values are 10.292 mm and 9.228 mm, respectively. At this point, it is also worth mentioning that when Figure 3 and Figure 4 are examined together, it can be reported that while

the first natural frequency of the beam is high, the resulting resultant displacement value decreases. Furthermore, Figure 5 shows the simulation image of an analyzed sample ( $TiB_2$  coated beam with tapered angle of  $0.8^\circ$ ), and alike results were seen also for all kinds of coating types and tapered angles.



**Figure 5.** An illustrative example for vibrational behavior of the coated tapered beams at condition 1 ( $TiB_2$  coated beam with tapered angle of  $0.8^\circ$ )



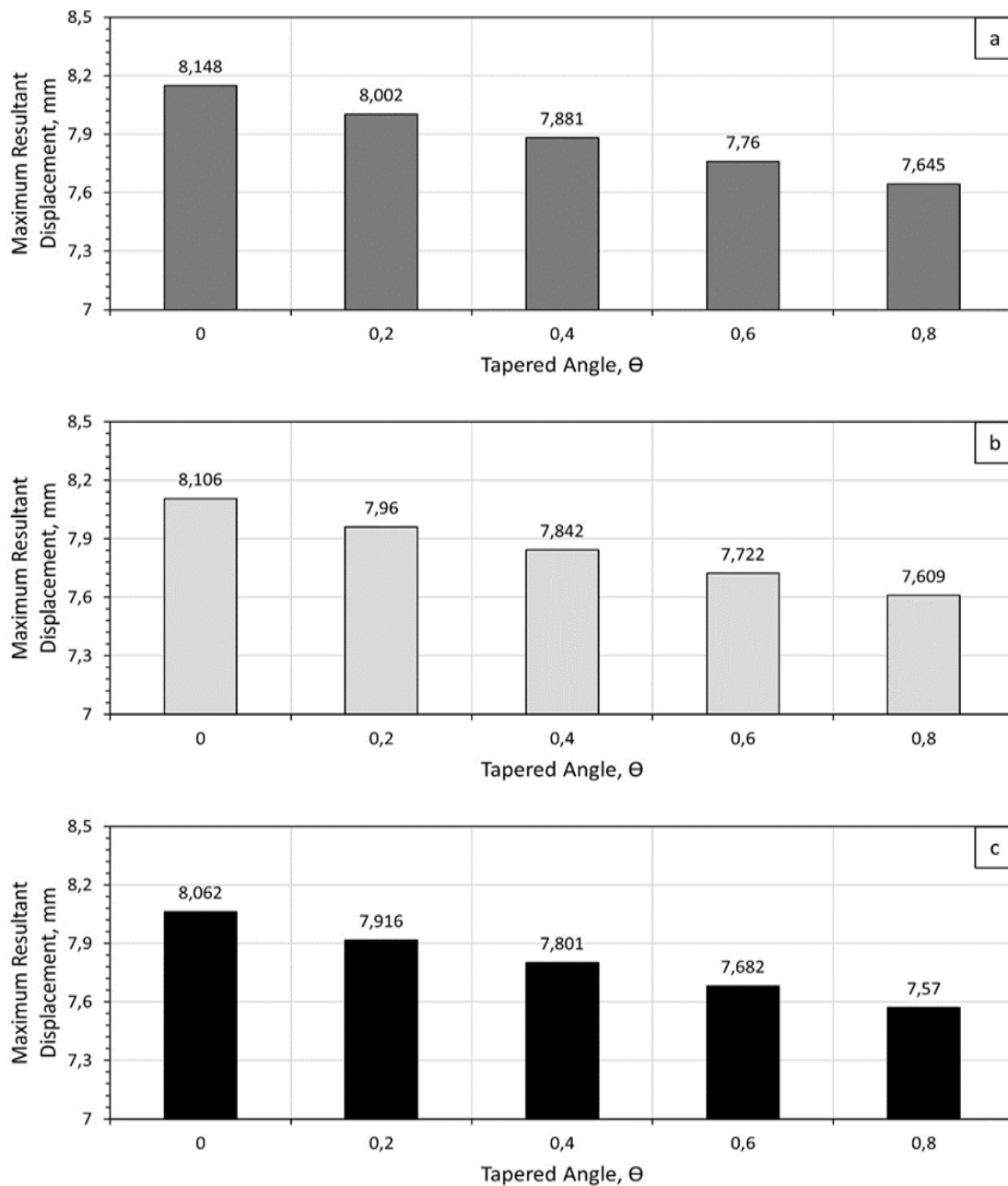
**Figure 6.** First natural frequency values of Ti-6Al-4V beams with different coatings depending on tapered angle for condition 2, a) AlN, b)  $Al_2O_3$ , c)  $TiB_2$

For the two-side fixing condition, the results of the finite element analyses conducted with the Ansys APDL 19 software are shared in Figure 6 and Figure 7. In the case where the coating material is AlN, the maximum first natural frequency value was recorded as 100.514 Hz when the tapered angle was 0.8°. Nevertheless, the minimum first natural frequency value of 92.102 Hz was ascertained when the tapered angle was 0°. It should also be underlined that as tapered angle values go up, calculated natural frequencies exhibit climbing behavior.

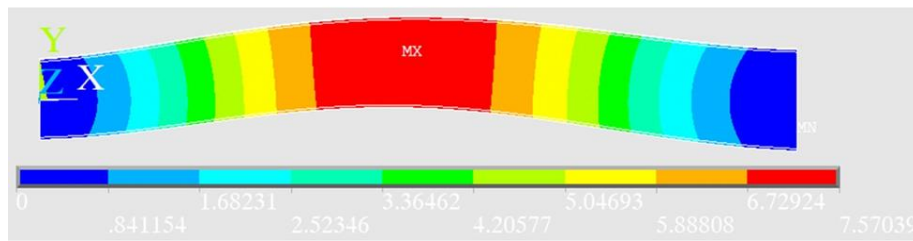
In the case where the coating material is Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, it was found out that natural frequency levels of prepared models showed an incremental trend, compared to the situation detected in Figure 6a. The highest first frequency value of

102.682 Hz and the lowest first natural frequency value of 94.322 Hz were found when the tapered angle values were 0.8° and 0° respectively (Figure 6b). Similar to the outcome seen for the models coated with AlN, it can be put forward that the first natural frequency values raised prominently from 0° to 0.8°.

When the coating layer is TiB<sub>2</sub> (Figure 6c), the peak value of the first natural frequency was 108.417 Hz for a 0.8° tapered angle. On the other hand, the trough value of the first natural value was determined as 100.193 Hz for the tapered angle of 0°. A parallel rising trend that was obtained for other ceramic coatings was noticed for TiB<sub>2</sub> coated beams depending upon the increasing tapered angle values.



**Figure 7.** Maximum resultant displacement values of Ti-6Al-4V beams with different coatings depending on tapered angle for condition 2, a) AlN, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, c) TiB<sub>2</sub>



**Figure 8.** An illustrative example for vibrational behavior of the coated tapered beams at condition 2 (TiB<sub>2</sub> coated beam with tapered angle of 0.8°)

Figure 7 demonstrates the resultant displacement values of the coated models fixed at both ends according to the shifting tapered angles. Figure 7a points that the resultant displacement values descend with the rise of the tapered angle values. As a consequence of the numerical analyses, the highest and the lowest resultant displacement values were calculated as 8.148 mm and 7.57 mm for AlN and TiB<sub>2</sub> coated models respectively. If bar graphs shown in Figure 7a and Figure 7b are assessed together, it can be asserted that the resultant displacement values had a downward trend for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated models.

For Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated models, the maximum resultant displacement value was found as 8.106 mm when the tapered angle was 0°, and the minimum resultant displacement value was determined as 7.609 mm when the tapered angle was 0.8°. In the case where the coating material is TiB<sub>2</sub>, a gradual diminishing was recorded in the resultant displacement values as also detected in the other two cases. From Figure 7c, the highest and lowest resultant displacement values are 8.062 mm and 7.57 mm, respectively.

Additionally, Figure 8 illustrates the simulation view of an analyzed sample, and similar behaviors were observed also for all coating types and tapered angles.

#### 4 Conclusions

From this finite element study, the following results were obtained:

- ✓ Finite element methodology is an effective way for the determination of the natural frequency and displacement results of the hard-ceramic coated titanium alloys. Thanks to numerical analyses, lots of technical information can be attained without conducting expensive coating processes and setting up experimental equipment.
- ✓ Nitrides, oxides, and borides affect differently the natural frequency and displacement behaviors of the Ti-6Al-4V alloy. This outcome can be explicated with their different hardness and rigidity levels.
- ✓ For both fixing conditions, TiB<sub>2</sub> coated beams have higher first natural frequency levels than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN coated beams.
- ✓ For only left-side fixed condition, independently from the coating material type, taper angle influences the natural frequency results negatively, except from between 0° and 0.2°.
- ✓ For the two-sided fixing condition, as long as the taper angle values increase, the natural frequencies of the models go up irrelevant to the coating material type.

- ✓ From the data collected from the finite element analyses, it can be brought forward that there is a negative relationship between the taper angle values and resultant displacement values. This trend is valid for both fixing conditions.
- ✓ For both fixing conditions, resultant displacement levels of AlN coated beams are higher than Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiB<sub>2</sub> coated beams.

#### Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

**Similarity rate (iThenticate):** 9%

#### References

- [1] N. Gupta, D. D. Luong and K. Cho, Magnesium Matrix Composite Foams—Density, Mechanical Properties, and Applications, *Metals*, 2, 238-252, 2012. <https://doi.org/10.3390/met2030238>.
- [2] S. Ferraris and S. Spriano, Antibacterial titanium surfaces for medical implants, *Materials Science and Engineering: C*, 61, 965-978, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.062>.
- [3] J. Chen, L. Tan, X. Yu, I. P. Etim, M. Ibrahim, K. Yang, Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 87, 68-79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.07.022>.
- [4] Ç. Bolat, İ. C. Akgün and A. Göksenli, On the Way to Real Applications: Aluminum Matrix Syntactic Foams, *European Mechanical Science*, 4(3), 131-141, 2020. <https://doi.org/10.26701/ems.703619>.
- [5] V. P. Leonov, I. V. Gorynin, A. S. Kudryavtsev et al., Titanium alloys in steam turbine construction, *Inorg. Mater. Appl. Res.* 6, 580–590, 2015 <https://doi.org/10.1134/S2075113315060076>.
- [6] B. Ergene, Simulation of the production of Inconel 718 and Ti6Al4V biomedical parts with different relative densities by selective laser melting (SLM) method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(1), 469-484, 2022. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.934143>.
- [7] B. Ergene and B. Yalçın, A finite element study on modal analysis of lightweight pipes, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(3), 268-278, 2021. <https://doi.org/10.14744/sigma.2021.00016>.
- [8] S. Liu and Y. C. Shin, Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review, *Materials & Design*, 164,

- 107552, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>.
- [9] I. Inagaki, T. Takechi, Y. Shirai and N. Ariyasu, Application and features of titanium for the aerospace industry, Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report (2014), pp. 22-27.
- [10] P. Singh, H. Pungotra and N.S. Kalsi, On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications, Mater. Today Proc., 4(8), 8971-8982, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.249>.
- [11] B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao and C. Coddet, Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V, Materials & Design, 35, 120-125, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.051>.
- [12] J. Alcisto, A. Enriquez, H. Garcia, Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V, J. of Materi Eng and Perform., 20, 203-212, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9670-9>.
- [13] H. K. Rafi, T. L. Starr and B. E. Stucker, A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting, Int J Adv Manuf Technol., 69, 1299-1309, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5106-7>.
- [14] J. R. Zhao, F. Y. Hung, T. S. Lui, Y. L. Wu, The Relationship of Fracture Mechanism between High Temperature Tensile Mechanical Properties and Particle Erosion Resistance of Selective Laser Melting Ti-6Al-4V Alloy, Metals, 9, 501, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9050501>.
- [15] B. Aksakal, M. Gavkali and B. Dikici, The Effect of Coating Thickness on Corrosion Resistance of Hydroxyapatite Coated Ti6Al4V and 316L SS Implants, J. of Materi Eng and Perform., 19, 894-899 2010. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9559-7>.
- [16] A. A. El Hadad, E. Peón, F. R. García-Galván, V. Barranco, J. Parra, A. Jiménez-Morales and J. C. Galván, Biocompatibility and Corrosion Protection Behaviour of Hydroxyapatite Sol-Gel-Derived Coatings on Ti6Al4V Alloy, Materials, 10, 94, 2017. <https://doi.org/10.3390/ma10020094>.
- [17] M. F. M. Yusoff, M. R. A. Kadir, N. Iqbal, M. A. Hassan and R. Hussain, Dipcoating of poly ( $\epsilon$ -caprolactone)/hydroxyapatite composite coating on Ti6Al4V for enhanced corrosion protection, Surface and Coatings Technology, 245, 102-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.02.048>.
- [18] H. Asgar, K.M. Deen, Z. U. Rahman, U. H. Shah, M. A. Raza, W. Haider, Functionalized graphene oxide coating on Ti6Al4V alloy for improved biocompatibility and corrosion resistance, Materials Science and Engineering: C, 94, 920-928, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.10.046>.
- [19] B. N. Mordyuk, S. M. Voloshko, V. I. Zakiev et al. Enhanced Resistance of Ti6Al4V Alloy to High-Temperature Oxidation and Corrosion by Forming Alumina Composite Coating. J. of Materi Eng and Perform., 30, 1780-1795, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05492-y>.
- [20] S. Kumar, A. Mandal, A. K. Das and A. R. Dixit, Parametric study and characterization of AlN-Ni-Ti6Al4V composite cladding on titanium alloy, Surface and Coatings Technology, 349, 37-49, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.053>.
- [21] B. Ergene and Ç. Bolat, Determination of thermal stress and elongation on different ceramic coated Ti-6Al-4V alloy at elevated temperatures by finite element method, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38(4), 2013-2026, 2020.
- [22] N. Lin, X. Huang, X. Zhang, A. Fan, L. Qin and B. Tang, In vitro assessments on bacterial adhesion and corrosion performance of TiN coating on Ti6Al4V titanium alloy synthesized by multi-arc ion plating, Applied Surface Science, 258(18), 7047-7051, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.163>.
- [23] T. Gao, Z. Li, K. Hu, Y. Bian and X. Liu, Assessment of AlN/Mg-8Al Composites Reinforced with In Situ and/or Ex Situ AlN Particles, Materials, 14, 52, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14010052>.
- [24] H. D. V. Mejia, A. M. Echavarría and G. G. Bejarano, Detailed study of the electrochemical behavior of low-reflectivity TiAlN coatings, Surface Innovations, 9(5), 296-307, 2021. <https://doi.org/10.1680/jsuin.20.00079>.
- [25] B. Ergene and Ç. Bolat, A review on the recent investigation trends in abrasive waterjet cutting and turning of hybrid composites, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 37(3), 989-1016, 2019.
- [26] Ç. Bolat, İ. C. Akgün and A. Gökşenli, Effect of aging heat treatment on compressive characteristics of bimodal aluminum syntactic foams produced by cold chamber die casting, International Journal of Metalcasting, 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00629-0>.
- [27] A. Bhowmik, D. Dey and A. Biswas, Comparative Study of Microstructure, Physical and Mechanical Characterization of SiC/TiB<sub>2</sub> Reinforced Aluminium Matrix Composite, Silicon, 13, 2003-2010, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00591-2>.
- [28] S. V. Chertovskikh, L. S. Shuster and G. S. Fox-Rabinovich, Study of TiB<sub>2</sub> Coated Hard Alloy Tool Wear Resistance During Titanium Alloy Machining, Chem Petrol Eng., 57, 690-695, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00993-y>.
- [29] M. K. Thompson and J. M. Thompson, Ansys Mechanical APDL for Finite Element Analysis, Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2017, DOI: 10.1016/B978-0-12-812981-4.00001-0.





## Co-injection filling characterization of the polypropylen packaging by 3-D simulation

### Polipropilen ambalajın eş-enjeksiyon dolum karakteristiğinin 3-B simülasyonu

Bekir Yalçın<sup>1,\*</sup> , Ahmet Yılmaz<sup>2</sup> , Zübeyir Gök<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Afyon Kocatepe University, Mechanical Engineering Department, 03204, Afyonkarahisar, Turkey

<sup>2,3</sup> Şekeroğlu Chemistry and Plastic Industry, Konya Organized Industrial Zone, 42050, Konya, Turkey

#### Abstract

Polypropylene (PP) is a crystalline thermoplastic widely used in many industrial applications such as medical devices, automotive parts, battery cases, household products, or packaging trays due to its high chemical resistance, processability and impact/stiffness balance, well barrier property, lightness and toughness respectively. However, researchers and engineers have focused on new injection methods to reduce the cost of products and production time. After doing a literature survey about the new injection methods in this study, the co-injection simulation conducted with the Moldex 3-D program using properties of both virgin PP and scrap PP. By the way, the effect of co-injection parameters such as injection pressure, closing force, mod and melt temperatures on co-injection filling characterization investigated. As a result that when the core temperature of the first injected virgin PP is higher than its nucleation temperature, the core of the wall goes on the wall with the second injection of scrap PP until cooling of nucleation temperature. End of co-injection, the second injected scrap PP after first injected virgin PP replaced the advancing virgin PP on the wall core, and a three-layered wall consisting of original PP, scrap PP, original PP obtained.

**Keywords:** Co-injection simulation, Injection parameters, Moldex 3-D

#### 1 Introduction

Polypropylene is one of the thermoplastics commonly used in automotive [1], medical, packaging [2, 3], and industrial product applications and is expected to increase its market share to 90 billion dollars in 2022, from the market share of 70 billion dollars in 2016 [3]. Besides, a wide portfolio of use in many manufacturing methods such as extrusion [4], injection molding, blow molding [5] and additive manufacturing [6] due to its lightness and low cost [7], lead to the rapid development of its market share. Injection molding process has two main units as injection and clamping given in Figure 1 [7]. Figure 1 demonstrates the all parts in this manufacturing system and its known that injection parameters affect the injection period and quality of the product significantly [8]. Therefore, machine and

#### Öz

Polipropilen (PP), hafiflik ve tokluk, yüksek kimyasal dayanım, şekillendirilebilirlik, darbe ve rijitliği dengelenmiş iyi bariyer özelliklerinden dolayı medikal ve otomotiv parçaları, ev eşyaları ve gıda ambalajlarının imalatında yaygın kullanılan kristalin termoplastik malzemedir. Bu bağlamda, araştırmacılar ve mühendisler üretim zamanı ve ürün maliyetini azaltmak için yeni enjeksiyon metotları üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmada yeni enjeksiyon metotlarıyla ilgili literatür araştırmasından sonra, üretim hurdası PP ve orijinal PP' nin özellikleri kullanılarak 3-B Moldex programıyla eş enjeksiyon simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Böylece, enjeksiyon zamanı, enjeksiyon basıncı, kapama kuvveti, kalıp ve enjeksiyon sıcaklığı gibi eş-enjeksiyon parametrelerinin dolum karakteristiğine etkisi araştırılmaya çalışılmıştır. İlk enjekte edilen orijinal PP' nin yolluk merkezindeki sıcaklığı çekirdeklenme sıcaklığından yüksek olduğunda, eş zamanlı ikinci enjekte edilen üretim hurdası PP'nin orijinal PP katılana kadar yolukta ilerlemekte olduğu sonucuna varılmıştır. Eş-enjeksiyon simülasyon sonunda, ilk enjekte edilen ve ilerleyen orijinal PP' nin yerini ikinci enjekte edilen üretim hurdası PP almış ve orijinal PP, hurda PP, orijinal PP' den oluşan üç katmalı cidar elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Eş-enjeksiyon simülasyon, Enjeksiyon parametreleri, Moldex 3-B

injection molding parameters have been special area of investigate to obtain a product with optimum quality and desired final shape [9]. Moreover, it strongly recommended that diverse factors affecting the typical plastic injection process must be analysed properly before deciding the applicability of manufacturing a product with the desired quality and complexity. By the way, these factors are classified into three categories as follows [10]:

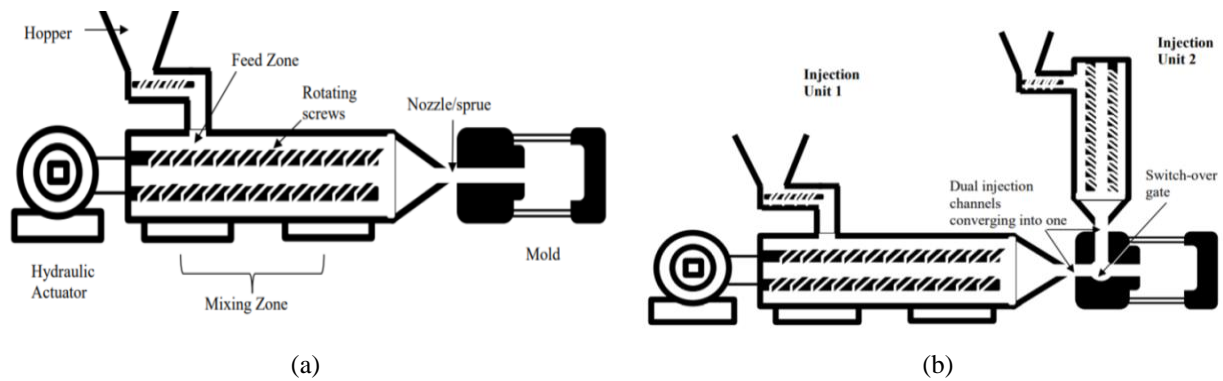
Independent machine parameters: Barrel and nozzle temperatures, coolant temperature, packing and holding pressures, back and injection pressure, sequence and motion, injection speed, screw speed, shot volume, cushion.

Dependent injection parameters: Mold and melt temperatures, cooling temperature, melt pressure, melt-front advancement, shear stress, injection and filling times,

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bekiryalcin@aku.edu.tr (B. Yalçın)

Geliş / Received: 07.03.2022 Kabul / Accepted: 27.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1083285



**Figure 1.** (a) Schematic of the typical injection molding process, (b) schematic of co-injection molding process [7]

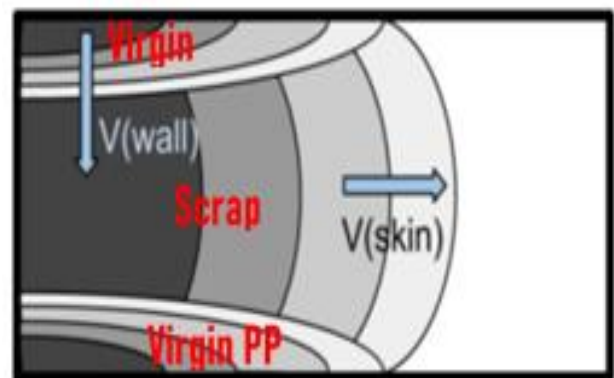
packing and holding times, cooling and mold open times, injection rate, material flow rate, rate of heat dissipation and cooling, pressure switch-over.

Final quality responses: Part dimension, shrinkage, warpage, sink marks, appearance and strength at weld lines, and other aesthetic defects such as burn marks, gate blushes, surface texture, etc. [10].

Furthermore, though machine parameters controls with using sensors in the machine or by upgrading diverse machine components, the injection parameters are mostly dependent on material properties, mold design, and process conditions. Lastly, quality indices are goals to produce desired shape and complexity [7]. Nowadays, machines with better control over parameters puts on the market. However, it is still a compelling and expensive procedure to understand the relationship between process parameters and output variables because of the necessity of quite many experiments. That is why; some important approaches like using the Taguchi method [11], artificial neural network [10], or finite element software [12] needed to minimize the number of experiments, provide self-learning, and predict the outcomes of the production respectively. It was reported that some commercial software packages were developed which use the finite element method to estimate stages of injection molding [13]. One of finite element programs: Moldflow is mainly used to determine the important parameters affecting the shrinkage of molded components [14] or estimate the injection period time easily. New co-injection molding is presented in Figure 1 in which two separate polymer materials combined to produce a sandwich structure. Co-injection molding or double action molding was originally patented in 1972 and 1973 by Garner and Oxley who worked for ICI now this method is known as a dual injection or sandwich injection or co-injection [14, 15]. Under this process, two separate polymer or polymeric materials injects into the same mold cavity in such a way that one material takes the form of the skin while the other material fills the center of the mold. The ability of co-injection molding to produce layered polymer structures leads largely with the phenomenon of parabolic flow front [7]. Moreover, a polymer consisting of a mixture of scrap and virgin polymers having different melt flow indexes can be injected by the co-injected method. This innovation provides the recycling facility of valuable production scraps in the

plastic injection sector. However, in order to do co-injection; different runner designs, second barrel, injection parameters, and injection period are required from typical injection molding.

Typical differences in the co-injection process schematizes in Figure 1b. As a principle of co-injection in Figure 1; one plasticized polymer from generally from virgin PP is injected from Unit I of a machine, another polymer from virgin or scrap PP is injected by Unit 2 to mold gate after then the parabolic flow is largely created due to viscosity differences in the polymer. The schematic of parabolic flow in co-injection is given in Figure 2. As the first injected polymer (virgin PP) moves farther away from the core of the melt and towards the mold wall it begins to cool down. In co-injection, the channel is created from the initially injected polymer by injecting a second polymer (scrap/recycled PP) [7].



**Figure 2.** The schematic of parabolic flow in co-injection [7]

In this study, the effect of injection parameters on the ejection period of packaging product virgin and mixing PP materials were analysed by using the Moldflow finite element analysis program. After these co-injection 3-D simulations, the temperature distribution, glass transition temperatures and times, injection time, flow rate, scrap utilization rate on the wall of the packaging product obtained. By the related results evaluating; the amount of the valuable scrap in the product, insight for injection mold



design, and information about injection period before manufacture are gained with this working.

## 2 Material and method

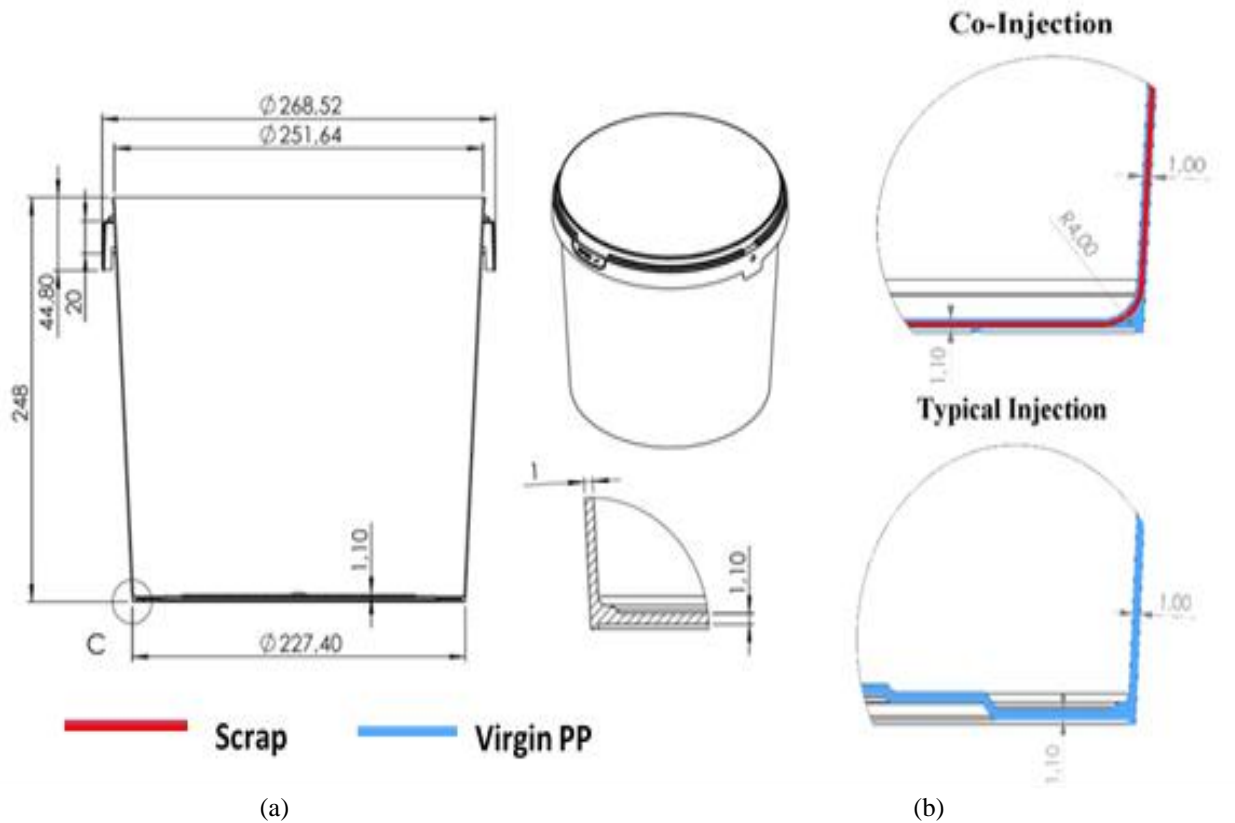
After doing a literature survey about typical injection and co-injection, 3-D simulation workings focus on the packaging product having 10-liter capacity, which showed in its geometrical properties in Figure 3. This product is made from 240 g virgin PP. In Figure 3a, the wall thickness of PP packaging is mm of 1, base wall thickness is 1.1 mm, the height of the product is 248 mm and base diameter is 227.4 mm and mouth diameter is 268.52 mm. The aim of co-injection is to provide use of scrap PP together with virgin PP along the 1 mm and 1.1 mm wall and to ensure that 1 mm wall is three-layered respectively from the inside surface to outer surface: virgin PP, scrap PP, virgin PP which can be seen in Figure 4. By the Scrap PP occurs during the typical injection of various packaging from virgin PP. Material flow rate (MFR) is a property of virgin polymer, which determines injection parameters and die design. Scrap PP MFR depends on MFR values of virgin PP materials used in manufacturing. With this context, the average scrap PP material's MFR is proportionally calculated as 70 and the average virgin PP's MFR as 37 to 3-D co-injection simulations. In simulations, Properties of PP material suitable to 37 MFR and 70 MFR values defined in the Moldex program given in Table 1 and Table 2 respectively.

After doing this preparation, 3-D co-injection simulation is realized for this model, which is seen in Figure 3. According to Figure 4, virgin PP injected in the first step, and

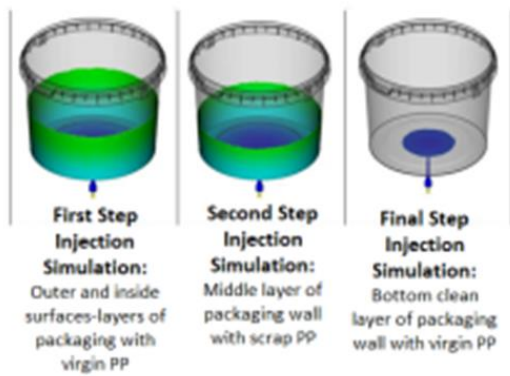
after solidification of virgin PP on mold surfaces, scrap PP was injected into the same gate in simulations. The scrap PP continues the flow and replaces the virgin PP in the channel when virgin PP has solidified at the wall, the scrap PP travels through the channel and continues to push material to the flow front. After doing polymer properties, geometrical and materials properties of mold and sample, co-injection simulations are carried out by Moldex 3D program. After then, some important results about the mold design and injection period are predicted with 3D co-injection simulation. Solid 3 layer BLM quadric element type, around 267500 element number are used in simulations.

**Table 1.** PP 412MN40 Polypropylene (37 MFR) some technical properties [16]

Properties	Unit (Si)	Values
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	dg/min	37
Density	kg/m <sup>3</sup>	905
stress at yield	MPa	25
strain at yield	%	5
tensile modulus	MPa	1300
Izod impact notched at 23 °C	kJ/m <sup>2</sup>	8
Izod impact notched at 0 °C	kJ/m <sup>2</sup>	6.5
Izod impact notched at -20 °C	kJ/m <sup>2</sup>	5
Hardness Shore D	-	63
Heat deflection temperature at 1.80 MPa (HDT/A)	°C	55
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	150
Vicat softening temperature at 50 N (VST/B)	°C	75



**Figure 3.** (a) Co-injection simulation applied for packaging design, (b) packaging walls by typical injection and co-injection



**Figure 4.** Co-injection simulations steps for 10 liter of packaging product

**Table 2.** BJ368MO Polypropylene (70 MFR) some technical properties [16]

Properties	Unit (SI)	Values
Density	kg/m <sup>3</sup>	903
Melt flow rate at 203 °C and 2.16 kg	dg/min	70
Hardness, Rockwell R	-	86
Tensile Strength, Yield	MPa	25
Elongation at Yield	%	4
Tensile Modulus	GPa	1.45
Charpy Impact, Notched at -20 °C temperature	J/cm <sup>2</sup>	0.400
Charpy Impact, Notched at 23 °C temperature	J/cm <sup>2</sup>	0.550
Deflection Temperatures at 0.46 MPa	°C	102
Melt Temperature	°C	210 - 260
Mold Temperature	°C	10 - 30
Hold Pressure	MPa	20 - 50

### 3 Results and discussion

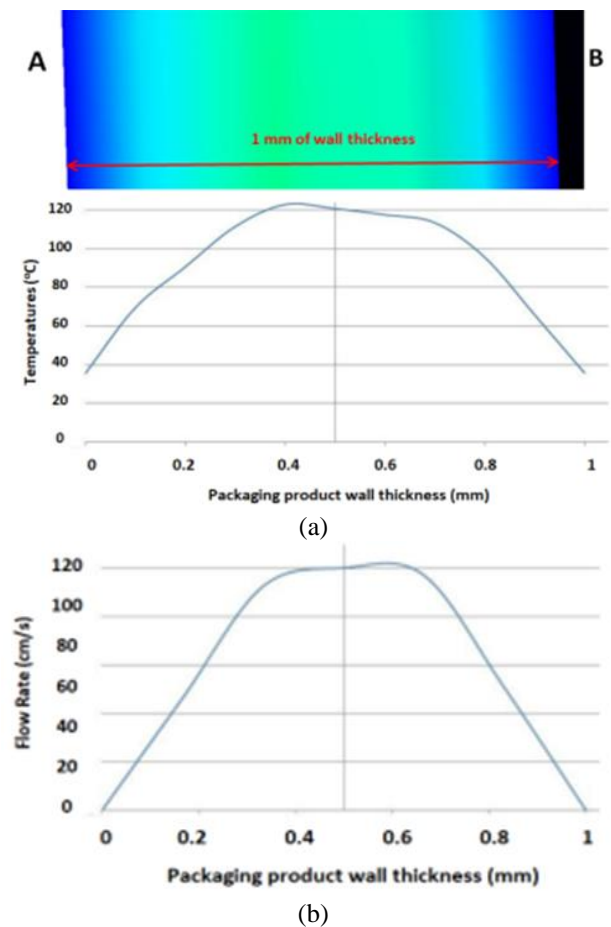
The temperature distribution on wall thickness after the end of the first polymer injection filling is very important in co-injection. Because the initial injected virgin PP moves farther away from the core of the melt and towards the mold wall. The melt virgin PP begins to cool down when it contacts the mold surfaces close to the cooling channels.

The first aim is to predict the temperature changing on the wall thickness depending on the filling time. By the way, it will be determined when the first injected virgin PP reaches the nucleation temperature on a cold mold surface where is in 60 °C temperature. A temperature distribution result on wall thickness in the first injected virgin PP from Unit 1 during co-injection simulations is given in Figure 5a. The 1 mm wall is divided into ten equal parts, which can be seen in Figure 5a. The distance between each pint is 0.1 mm. According to Figure 5, the initial injected virgin PP temperature from cold mold surfaces (A and B) to the center of thickness varies between 35.27 °C and 120.8 °C after 3.06 s of filling.

According to Figure 5b, around 0.3 mm of the wall thickness is below the nucleation temperature of virgin PP. Around 0.2 mm virgin PP from the walls nucleated and it is interpreted that it solidified virgin PP tends to adhere on the wall during 3.06 s injection period. It is mentioned that the cooling rate, temperature gradient, shear condition, pressure distribution, and many other injection parameters strongly affect the distribution of crystallization behaviour of PP,

frozen, and the surface quality and mechanical properties of plastic parts [17].

It is obvious that with the increase of mold cavity surface temperature, the thickness of the frozen layer gradually decreases. One research reported that when the mold cavity surface temperature is 60 °C, PP nucleation starts [18]. Another result is predicting of flow rate by 3-D simulation which was given in Figure 5b. According to Figure 5b, while the flow rate is around 25 cm/s in the first injected polymer core, it comes to standstill at the mold contact surface. Thence, the polymer velocity at the skin surface closes to zero, in the lower layer towards the center gradually increasing to the 25 cm/s during 3.06 s injection period. Lou et al. [19] studied the effect of material viscosity on core melt depth during co-injection. When the viscosity of the core is much smaller than that of the skin. It interpreted that a decrease in virgin PP temperature in the runner of die causes decreasing in its flow rate. On the other hand, as the core temperature of virgin PP in the runner increases, flows in the core go on until filling. In order to solve the defects of co-injection products, it is necessary to consider the viscosity changes of the two polymer materials during the changes of temperature and shear rate, pressure [20].



**Figure 5.** The temperature distribution (a) and flow rate (b) on 1 mm of packaging product wall thickness after 3.06 s of the first virgin PP injection filling obtained from 3-D simulations

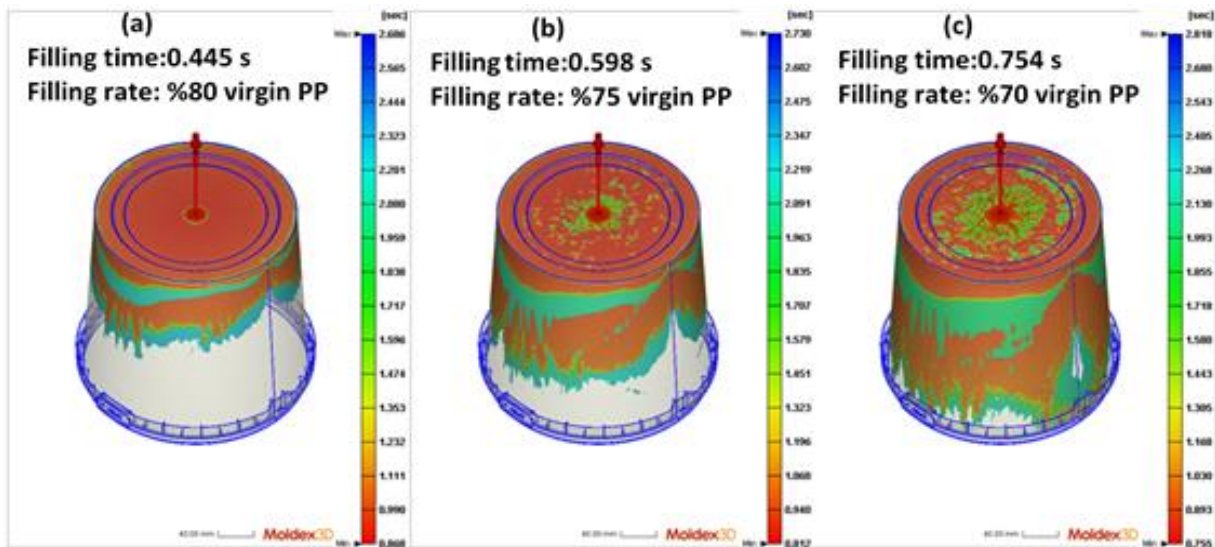


Figure 6. Simulation screens of packaging product with respect of filling time and filling ratio

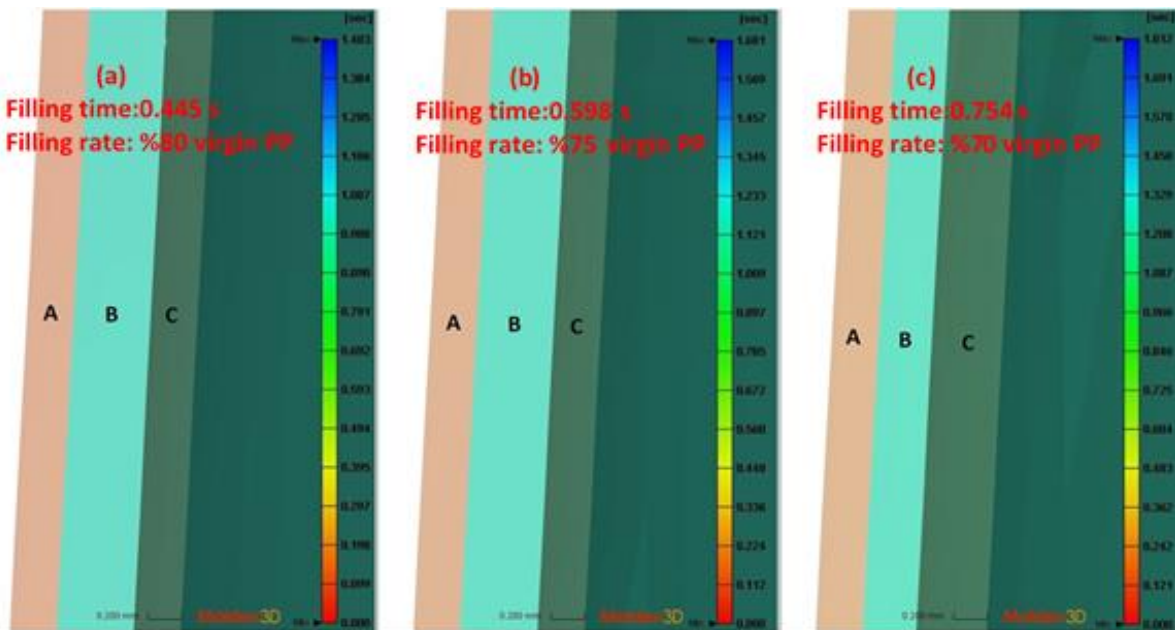
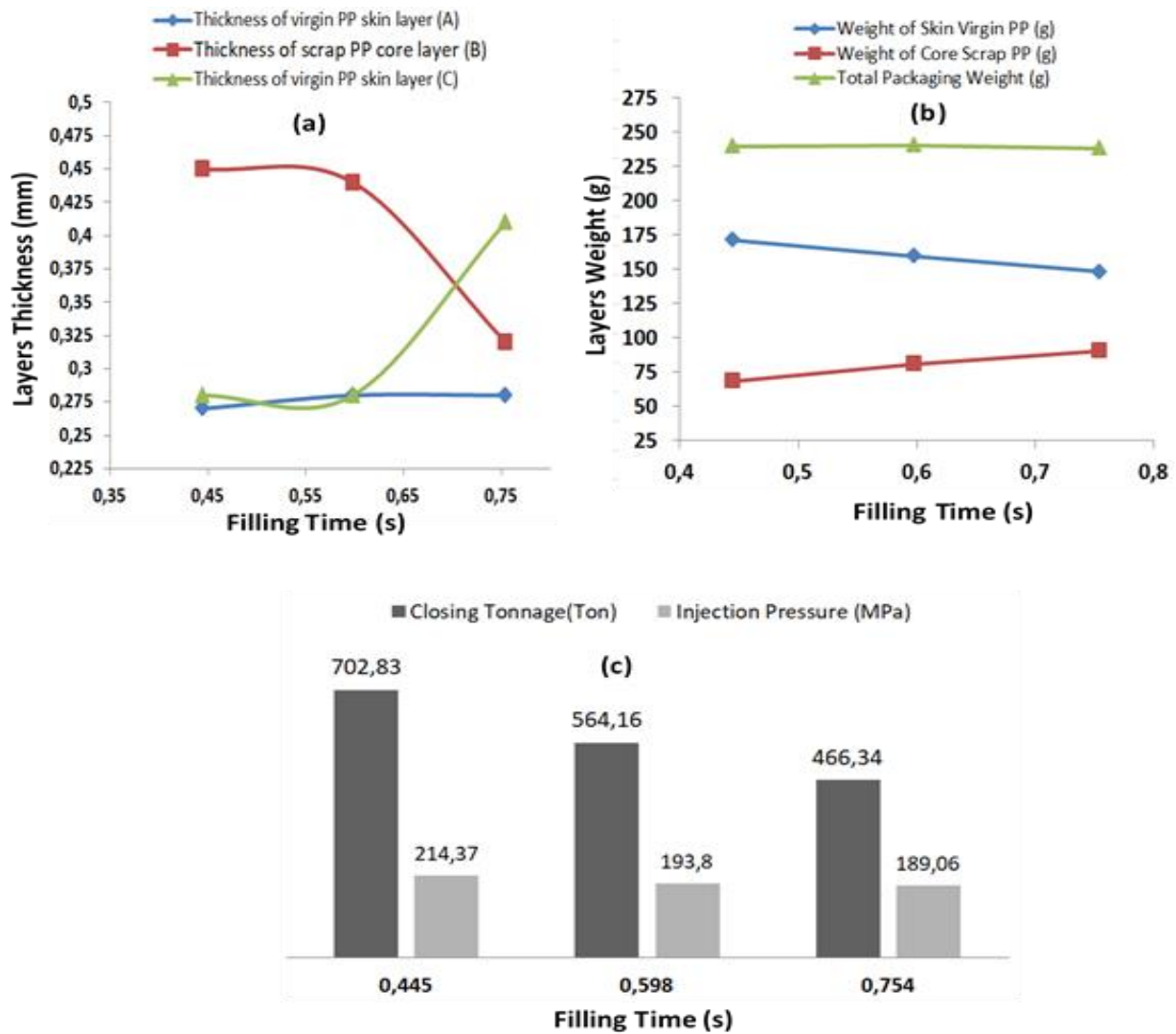


Figure 7. Virgin (A and C) and scrap (B) layer on wall of packaging product with respect of filling time and filling ratio

After the first injection filling is completed, a certain thickness/amount of virgin PP in the core of the packaging wall can progress if the second injections of scrap PP to the same die runner. For example, the level of 0.4 to 0.5 mm thickness in the core of the packaging wall seen in Figure 5 is expected to progress to filling, then it is predicted by simulation that the second injection of scrap PP replaces the advancing virgin PP. A there different co-injection simulation was realized by the Moldex 3D simulation program. In the simulation, their different filling time and filling ratio are respectively selected as 0.445 s, 0.598 s, 0.754 s and %70, %75, %80.

Virgin PP skin layers weight/thickness and core layer weight/thickness of wall thickness and total product weight,

closing tonnage, injection pressure are predicted by co-injection simulations, which can see in Figure 6. Scrap PP using rate is %20 of total product weight in Figure 6a, in 6b is %25, in 6c is %30, respectively. Figure 7 shows the layers of the packaging wall concerning filling time. As can be seen, the layer thickness is changing with three different co-injection simulations. The highest thickness of the scrap layer obtained from the Figure 7b simulation screen. Therefore, co-injection simulations result in Figure 7b is important for the evaluation of scrap PP. Graphics about simulations results given in Figure 8. When evaluating Figure 8, the higher scrap PP core layers thickness values are obtained from 0.455 s and 0.598 s of filling times which can be seen in Figure 9a.



**Figure 8.** Co-injection simulation results about layers thickness (a), their weights (b), closing tonnage and pressures of injection (c)

In addition, an increase in filling time enables more scrap PP use in the packaging wall. He et al [21], the core layer distribution in the simulation results is consistent with the experimental results. As comparing Figure 8a, Figure 8b, and Figure 8c, 0.598 s of co-injection filling time, 193.8 MPa injection pressure, and 564.16 ton of injection closing are determined as the optimum condition. 0.44 mm of core thickness on packaging wall with co-injection simulation consists of scrap PP, which contributes 25% to the weight of the packaging product by this optimum condition. Thence, around 80.8 g of scrap PP will evaluate by a special co-injection method in the manufacture of a 10 liter capacity of packaging product. It will contribute to reducing the use of virgin PP.

#### 4 Conclusion

Some following co-injection simulation results obtained from this study. By the way, these results give information

about co-injection mold design and co-injection simulation parameters to be applied.

- The initial injected virgin PP temperature from cold mold surfaces to the center of packaging wall temperatures varies between 35.27 °C and 120.8 °C after 3.06 s of filling. As the core temperature of the first injected virgin PP is higher than its nucleation temperature, the core of the wall goes on the wall with the second injection of scrap PP.
- The virgin PP flow rate at the skin surface contacting the cold mold surface closes to the zero, in towards the core of wall gradually increased to the 25 cm/s in 3.06 s injection period. This means that the virgin polymer solidifies upon contacting the cold mold surfaces and the virgin polymer has the temperature and flow at the core of the wall.
- 193.8 MPa of injection pressure and 564.16 ton of injection closing force, 60 °C of mold surfaces, and 120 °C to 130 °C of first injected virgin PP core temperature

at the wall during 3.06 s of co-injection filling time are determined as an optimum co-injection condition.

- A three-layered wall consisting of original PP, scrap PP (core layer), original PP was obtained by optimum co-injection simulation. The optimum 0.44 mm of core layer thickness on packaging wall obtained from simulations.
- 25% to all weight of the packaging product consists of Scrap PP. Thence, around 80.8 g of scrap PP will be evaluated by the special co-injection method in the manufacture of a 10 liter capacity of packaging product. It will contribute to reducing use of valuable virgin PP.

#### Acknowledge

This paper was produced with the support of the TUBITAK 1501 university-industry corporation project code 3292423. Authors thank TUBITAK and ŞEKEROĞLU Chemistry and Plastic Industry and Trade I.C.

#### Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

**Similarity rate (iThenticate):** 12%

#### References

- [1] Y. Ssrethep, A study on material distribution, mechanical properties, and numerical simulation in co-injection molding. Degree of Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University, USA, 2008.
- [2] H. A. Maddah, Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 1, 1-11, 2016.
- [3] Dental 3D Printing Market by Product, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polypropylene-market-64103589.html#:~:text=The%20polypropylene%20market%20size%20was,5.6%25%20between%202017%20and%202022>. Accessed 3 March 2022.
- [4] K.G. Harutun, Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites. New York: Marcel Dekker, 1999.
- [5] L. Baltés, L. Costiuc, S. Patachia and M. Tiorean, Differential scanning calorimetry—a powerful tool for the determination of morphological features of the recycled polypropylene, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138, 2399–2408, 2019.
- [6] I. Ituarte, O. Wiikinkoski and A. Jansson, Additive manufacturing of polypropylene: A screening design of experiment using laser-pased powder fed fusion, *Polymers*, 10, 1293, 2018.
- [7] M. Zaverl, A study on skin/core optimization in co-injection molding of biopolyester blends. Degree of Master of Applied Science in Engineering, Guelph, Ontario, Canada, 2013.
- [8] M.C. Huang and C.C. Tai, The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature, *J Mater Process Tech* 110(1), 1–9, 2001.
- [9] Z. Chen and L.S. Turng, A review of current developments in process and quality control for injection molding, *Adv Polym Technol* 24(3), 165–182, 2005.
- [10] S. Kashyap and D. Datta, Process parameter optimization of plastic injection molding: a review. *Int J Plast Technology*, 19, 1–18, 2015.
- [11] T.C. Chang and E. Faison, Shrinkage behaviour and optimization of injection molded parts studied by the Taguchi method, *Polym Eng Sci*, 41(5), 703–710, 2001.
- [12] X.P. Dang, General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters, *Simulation Model Pract Theory*, 41, 15–27, 2014.
- [13] V.W. Wang, C.A. Hieber and K.K. Wang, Dynamic simulation and graphics for the injection molding of three-dimensional thin parts. *J Polym Eng*, 7(1), 21–45, 1986.
- [14] M. Kadota, M. Cakmak and H. Hamada, Structural hierarchy developed in co-injection molded polystyrene/polypropylene parts, *Polymer*, 40, 3119 – 3145, 1999.
- [15] J.C. Viana, Co-injection molding of immiscible polymers: skin-core structure and adhesion studies, *Poly Eng & Sci*, 51: 2398 – 2407, 2011.
- [16] Boraalis catalog, <https://www.borealisgroup.com/search?search-global-search&index-search=products&id-search=13799>, Accessed 3 March 2022.
- [17] H.B.H. Salah, H.B. Daly, J. Denault and F. Perrin, Morphological aspects of injected polypropylene/clay nanocomposite materials, *Journal of Polym Eng Sci*, 53(5), 905–913, 2013.
- [18] W. Wang, G. Zhao, Y. Guan, X. Wu and Y. Hui, Effect of rapid heating cycle injection mold temperature on crystal structures, morphology of polypropylene and surface quality of plastic parts, *Journal of Polym Res*, 22, 84, 2015.
- [19] J. Lou, Y. Li, H. He, D. Li, G. Wang, J. Feng and C. Liu, Interface development and numerical simulation of powder co-injection moulding. Part. I. Experimental results on the flow behaviour and die filling process, *Powder Technol.* 305, 405–410, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.015>.
- [20] G. Bernardes, N. Luiz, R. Santana and M. Forte, Rheological behavior and morphological and interfacial properties of PLA/TPE blends, *J. Appl. Polym. Sci.* 136, 1–9, 2019. <https://doi.org/10.1002/app.47962>
- [21] W. He, J. Yang, Y. Chen, P. Liu, C. Li, M. Xiong, X. Niu and X. Li, Study on co-injection molding of poly(styrene-ethylene-butylene-styrene and polypropylene: Simulation and experiment, *Polymer Testing* 108, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107510>





## CdSO<sub>4</sub>-CdS Composite nanowires synthesized by arc discharge method

### CdSO<sub>4</sub>-CdS Kompozit nanotellerin ark deşarj yöntemi ile sentezi

Tugay Üstün<sup>1,\*</sup>, Volkan Eskizeybek<sup>2</sup>, Omar Toumiat<sup>3</sup>, Ahmet Avcı<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Başkent University, Kahramankazan Vocational School, 06980, Ankara, Turkey

<sup>2</sup> Çanakkale Onsekiz Mart University, Department of Materials Science and Engineering, 17100, Çanakkale, Turkey

<sup>3</sup> University of Constantine, Department of Physics, 25000, Constantine, Algeria

<sup>4</sup> Necmettin Erbakan University, Department of Biomedical Engineering, 42090, Konya, Turkey

#### Abstract

Herein, we successfully carried out the of CdS nanowires doped with CdSO<sub>4</sub> nanoparticles by arc discharge method. For this, two cadmium rods with high purity as anode and cathode electrodes were submerged in a liquid nitrogen medium. The cathode electrode was filled with micro-sized sulfur powder to synthesize CdS nanowires. CdS nanowires were obtained by oxidation using low temperature with CdSO<sub>4</sub> nanoparticles. After the arc discharge process, the resultant product was characterized to reveal structural and morphological properties. XRD and electron EDX analyses exposed the coexistence of the CdS and CdSO<sub>4</sub> phases. Scanning electron microscopy (SEM) investigations revealed that the synthesized nanostructures formed in a 1D wire nanostructure morphology with a diameter of less than 10 nm and several micrometers in length. Besides, the transmission electron microscopy (TEM) analysis was utilized to monitor the CdSO<sub>4</sub> nanoparticles located on CdS nanowires surface. It has been found that the absorption band blue-shifted with 0.53 eV. This blue shift originated from the quantum confinement in the nanoparticles.

**Keywords:** CdS, Nanowire, Arc-discharge, Photoluminescence

#### 1 Introduction

Metal-based nanostructures such as CdO, CdS, ZnS, and ZnO have become a crucial area of interest in nanotechnology due to their vital role in developing smart devices and functional materials in recent years. The most important physical properties of these materials were the carrier's spatial confinement and the discrete density of energy. These attractive physical properties enable tailoring their roles in engineering applications such as photocatalysis, luminescent materials, and light-emitting diodes (LEDs), and solar cells [1]. Among these nanostructures, cadmium sulfide (CdS) is considered a vital semiconductor with a bandgap in the visible range of 2.5 eV [2]. It has been reported that CdS nanostructures were sensitized into various nanocrystalline morphologies such as nanotubes [2], nanoparticles [3], nano-cluster [4], nanorods, and nanospheres [5]. Due to advances in nanotechnology, the

#### Öz

Bu çalışmada, CdSO<sub>4</sub> nanopartikülleri ile doplanmış CdS nanotellerinin sentezini ark deşarj yöntemi ile başarıyla gerçekleştirdik. Bunun için anot ve katot elektrotlar olarak yüksek saflıkta iki kadmiyum çubuk sıvı nitrojen ortamına daldırıldı. Katot elektrotu, CdS nanotellerini sentezlemek için mikro boyutlu kükürt tozu ile doldurulmuştur. CdS nanotelleri düşük sıcaklıkta oksitleme işlemi ile CdSO<sub>4</sub> nanoparçacıkları da elde edildi. Ark deşarj işleminden sonra, elde edilen ürün yapısal ve morfolojik özellikleri ortaya çıkarmak için karakterize edildi. X-Işını Kırınımı (XRD) ve elektron dağılımı spektroskopisi (EDS) analizleri, CdS ve CdSO<sub>4</sub> fazlarının bir arada varlığını açıkça ortaya koymuştur. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) incelemeleri, sentezlenmiş nano yapıların 10 nm'den küçük bir çapa ve birkaç mikrometre uzunluğa sahip bir 1B tel nano yapı morfolojisinde oluştuğunu ortaya çıkardı. Ayrıca, geçirimli elektron mikroskopu (TEM) analizi, CdS nanotellerinin yüzeyinde bulunan CdSO<sub>4</sub> nanopartiküllerini izlemek için kullanıldı. Absorpsiyon bandının maviye kaydığı 0.53 eV ile bulunmuştur. Bu maviye kayma, nanopartiküllerdeki kuantum sınırlamasından kaynaklandı.

**Anahtar kelimeler:** CdS, Nanotel, Ark deşarj, Fotoluminesans

importance of one-dimensional nanoparticles, such as nanotubes, nanowires, and nanobelts, has increased in recent years. At most, the discovery of the room temperature excitonic laser emission in CdS nanowires at room temperature by Anlian et al. [5] and Agarwal et al. [6] paves the way to the laser sources with a low threshold. On the other hand, a promising way to efficient energy harvesting from solar light is the combination of nanomaterials properties to enhance the UV light absorption from solar light due to its broad bandgap (5.2 eV) and its relative facile ability to be obtained 1D nanostructure [7]. On the other hand, based on the synthesis method and process parameters, phase transition of CdS might occur, leading to the formation of CdO, CdSO<sub>4</sub>, or complex CdO composites (CdOSO<sub>2</sub> and CdOs), which is notably affected by temperature and environment [8]. The presence of two or more phases enables CdS nanostructures to be tuned electrical properties, and in particular, to change their band gap. Furthermore,

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tugayustun@baskent.edu.tr (T. Üstün)

Geliş / Received: 06.11.2020 Kabul / Accepted: 17.05.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.820329

CdSO<sub>4</sub> is a well-known ionic crystal that has been used in thermoluminescent phosphors, gas sensors, electrolytes, and optical applications. As a result, producing self-assembled nanostructured semiconductors with different morphologies and complicated phase elements for further exploitation of their underlying photoelectric capabilities appears to be quite promising. In this work, we developed a facile synthesis method of CdS-CdSO<sub>4</sub> nanocomposites by a modified arc-discharge technique submerged in liquid nitrogen medium.

Arc-discharge (AD) in the liquid environment has been known as one of several methods to synthesize nanomaterials such as WO<sub>3</sub> [9], CuO [10] and CdO [11]. AD process submerged in a liquid medium has shifted an efficient nanostructures production technique with various vital benefits such as large-scale production, high efficiency, and cost-effectiveness. This technique particularly needs a dc power supply and an open vessel filled with a liquid medium. Like all other well-known techniques, it requires no vacuum environment, a high-temperature furnace, and reacting gases [11]. In this process, an electrical arc-discharge is formed between two highly pure crystalline metallic electrodes. The formed arc plasma evaporates the metal wires, and the evaporated matter is cooled in the liquid medium to produce nanomaterials through a self-assembling process.

In this study, we present the synthesis of CdS nanowires doped with CdSO<sub>4</sub> phase embedded on the nanowire surface by AD process submerged in liquid nitrogen environment. The resulting nanostructures were physically characterized to reveal their structural, morphological and optical properties.

## 2 Materials and methods

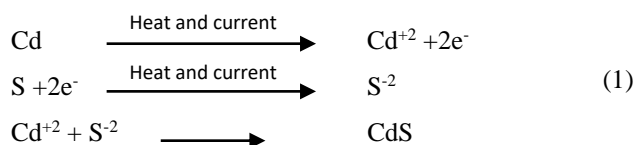
### 2.1 Synthesis of cadmium sulfide nanowires

Cd rods with diameters of 6 and 10 mm (99.99%) were employed and purchased from Alfa Aesar as anode and cathode electrodes. The chemical reactants have been of analytical grade and utilized as received.

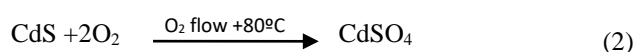
Lab-made arc-discharge equipment was employed, as introduced in our previous works [12]. It consists of two cadmium electrodes with high purity. A cadmium rod with a 10 mm diameter and 20 mm length was used as the cathode. It was manufactured to have a smooth surface, wanted to retain uniform arc-discharge throughout the process. Anode electrode was machined from another cadmium rod with a 6 mm diameter and 60 mm in length. A 4 mm hole was machined in the anode and loaded with high purity sulfur powder. The arc current was provided (50 A, 20-30 V) by a direct current power supply. The arc discharge was started with the contact of electrodes. For a stable arc-discharge, the gap was controlled by measuring the voltage during the experiment. The products were transferred into de-ionized water. Following the settling process, the particles separated into two phases, one floating at the water's surface, the second precipitate at the bottom. The floating product was gathered on a silicon substrate and dried at 80 °C in the air, subsequently [13].

### 2.2 Growth mechanism

The coalescence of nanostructures is the most critical factor in the production of the CdS nanowires. During the arc discharge, pulverization of the Cd anode and sulfur powder occurred in the arc region, leading to the growth of nanoscale CdS according to the following Equation 1;



The sharp temperature gradient from the arc zone to the liquid nitrogen medium plays a vital role in producing different nanoparticles with various morphologies [13]. In the hot plasma region, the formation of the molecular CdS may be more probable. These molecules are ejected from the hot plasma zone to the liquid nitrogen medium. At this time, these CdS molecules transfer their energy to the medium and condensed to form CdS nanoparticles, which is the critical process step for forming the nanowires. A similar phenomenon has been observed by [10] for Cd(OH)<sub>2</sub> nanowires addressing the oriented attachment of nanoparticles in nanowire morphology to reduced their total surface energy [14]. The coalescence may start with one particle acting as a seed for the nanowire's growth, as shown in Figure 2c. This growth phenomenon suggests the irreversible and perfectly aligned nanoparticles to form 1D nanostructures [15]. The complete oxidation of bulk CdS may have been achieved by according to following Equation 2;



As can be seen from Equation (2), the complete oxidizing of the bulk CdS only occurs under O<sub>2</sub> flow at high temperatures. However, the oxidation occurs even at low temperature (80 °C) and inadequate oxygen amount due to the comparatively smaller particle size and high mismatch between the assembled particles in our case (Figure 2d). As a result, these conditions may become favorable to the CdSO<sub>4</sub> phase formation as the XRD pattern, and EDS analysis confirms it. Also, the different contrasted regions in Figure 2b may be attributed to the CdSO<sub>4</sub> nanoparticles embedded in the CdS nanowire.

### 2.3 Characterization

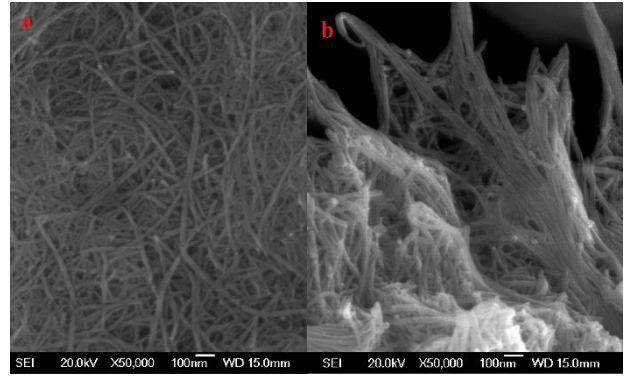
The obtained products were dispersed in alcohol ultrasonically for morphological and structural examinations. X-ray diffraction (XRD) spectrum was obtained on Shimadzu XRD-6000. The diffractometer was performed at 0.15405 nm CuK $\alpha$  radiation. Scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS) analyses were carried out by JEOL/JSM6335F-EDS SEM. Transmission electron

microscopy (TEM) and selected area electron diffraction (SAED) patterns were taken by a JEOL 2100 HRTEM at 300 kV. The optical properties were examined using an Ocean Optics HR4000 UV–VIS–NIR spectrophotometer equipped with xenon and deuterium lamps. The fluorescence emissions were obtained with a Perkin Elmer LS 50 B spectrometer with an optical way of 1 cm, at room temperature, and 0.2 g/L concentration in ethanol solution.

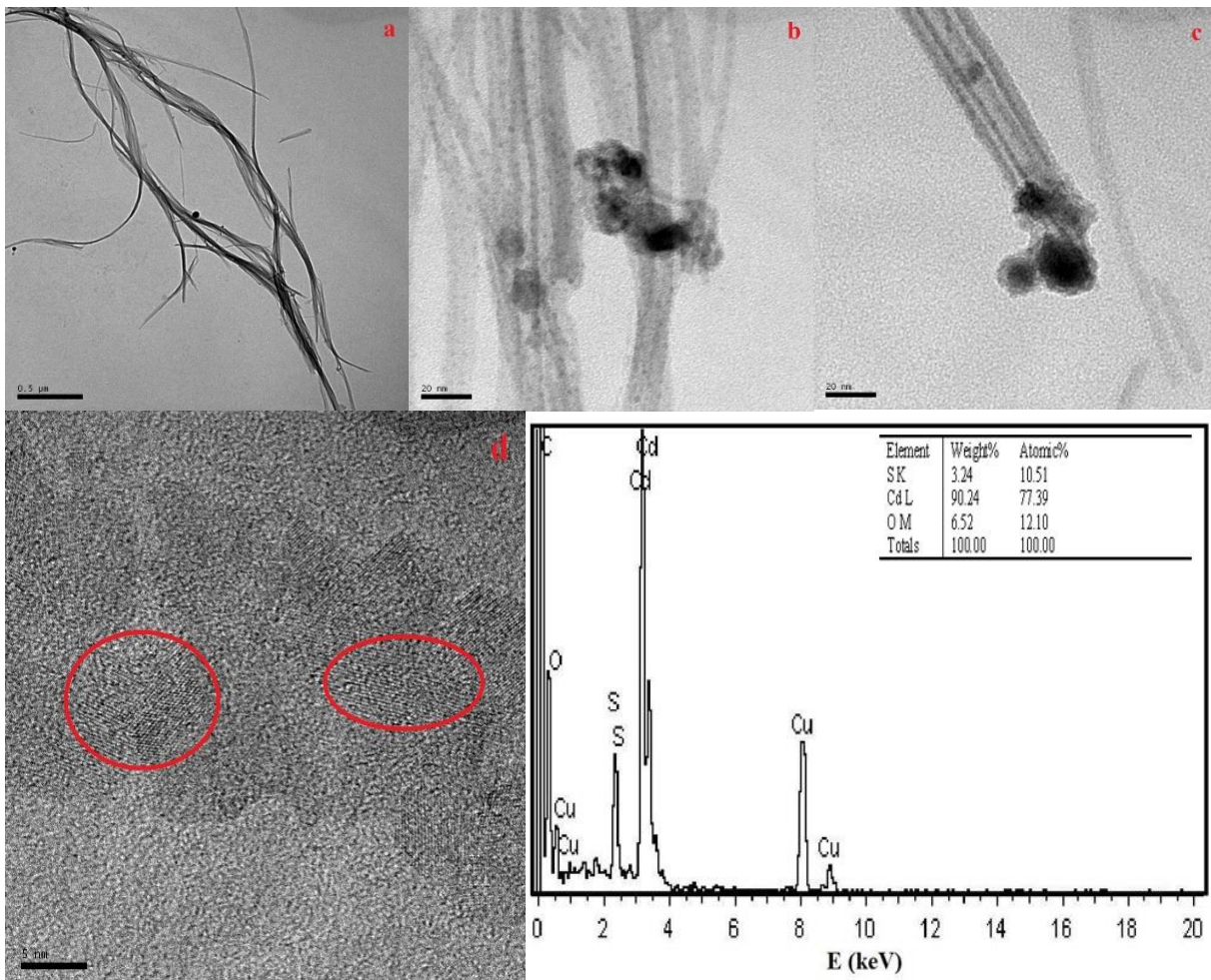
### 3 Result and discussion

#### 3.1 Morphology

Figure 1a shows a typical SEM image of CdS nanowires. As seen, the obtained nanostructures are in the nanowire form while they are in entangled form in bundles. The nanowires have a regular diameter of 10 nm, and their length is up to several micrometers. It is seen in Figure 1b that there is no other morphology rather than the nanowire form, which shows the effectiveness of the production technique to synthesize uniform nanostructures [12].



**Figure 1.** SEM images of the as prepared nanocomposites showing mean diameter around 10 nm of the obtained nanowire with several micrometer in length (a) Homogenous field and (b) Nanowire form in entangled form in bundles.



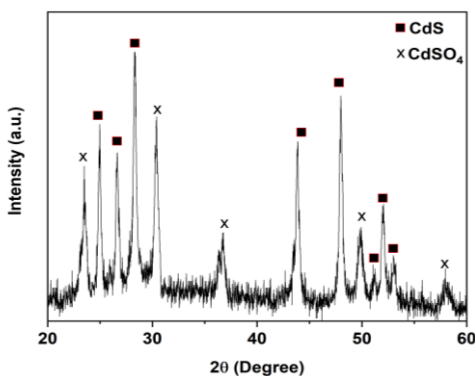
**Figure 2.** TEM images of the nanocomposite (a) nanowire structures (b) high magnification of the corresponding nanowire structures with embedded Q dots (diameter about 5 nm) (c) monitoring a nanowire with nanoparticles at the tip, which may act as a seed (d) high resolution TEM image of a polycrystalline nanowire showing the well-crystallized nanoparticles. The scale bars are 0.5 μm, 20 nm, 20 nm and 5 nm for (a), (b), (c) and (d) respectively (e) energy dispersive spectra of nanocomposite showing only the presence of oxygen, Cd and S with the atomic ratios of elements.



The TEM images of the nanocomposite are presented in Figure 2. Figure 2a presents the nanowire morphology of the resultant nanocomposite with a mean diameter of around 10 nm and several micrometers in length. This observation is in good agreement with FE-SEM results. In Figure 2b, the high-resolution TEM (HRTEM) image is presented. The image exhibits the presence of small nanoparticles, with different contrast embedded on the nanowire. This figure also reveals a hexagonal-shaped nanostructure at the tip of the nanowire with the same contrast. In particular, HRTEM image of the tip of one nanowire presented in Figure 2c exhibits a nearly hexagonal-shaped nanoparticle with the same diameter as the nanowire. Similarly, the HRTEM image of a portion of the nanowire (Figure 2d) shows the nanowire's polycrystalline nature, with well-crystallized nanoparticles assembled with different crystalline orientations. Similar observations have been reported elsewhere [11] for the Cd(OH)<sub>2</sub> nanowires, where most of the nanoparticles coalesced and formed the CdS nanowire. We confidently believe that the nanowire morphology is not smooth due to this formation mechanism. This observation may be useful in increasing the specific surface of the obtained nanocomposite. Moreover, EDS shows only the presence of oxygen, sulfur, and cadmium in our samples in excellent agreement with XRD results, as shown in Figure 2e. The carbon and copper peaks in the EDS spectrum arise from the carbon coating and copper grid used for TEM sample preparation.

### 3.2 Structural properties

The XRD pattern of the as-synthesized nanostructures is illustrated in Figure 3. The XRD pattern reveals the presence of CdS as a major phase due to the sharp peaks of hexagonal wurtzite CdS (JCPDS 41-1049) structure with lattice parameters as a=b=4.12 Å and c=6.68 Å. The diffraction peaks at 2θ=24.95, 26.62, 28.36, 36.78, 43.85, 48.03, and 52.06 are attributed to (100), (002), (101), (102), (110), (103) and (112) planes of hexagonal CdS nanostructures. In addition, CdSO<sub>4</sub> (JCPDS 85-0673) nanostructures as a minor phase are also identified with cell parameters as a= 4.71 Å and b = 6.55 Å addressing the orthorhombic space group Pn21m.



**Figure 3.** XRD pattern of the prepared nanocomposite presenting the coexistence of two phases; hexagonal CdS and orthorhombic CdSO<sub>4</sub>

The diffraction peaks at 2θ=23.51, 30.38, 38.2 and 49.83 can be indexed to (101), (111), (112) and (002) planes of CdSO<sub>4</sub> nanostructures. However, it is apparent from figure that CdSO<sub>4</sub> phase represents peak broadening compared to CdS phase. This peak broadening indicates the nanometer scaled grain size of the CdSO<sub>4</sub> phase, which indicates that the mean grain size of the CdSO<sub>4</sub> phase is comparatively small. According to the Scherer formula, the calculated mean crystalline size is 2-10 nm. A probable formation of this phase can be due to the diffusion of oxygen in the sulfur vacancies sites of CdS matrix. The surface of CdS nanowires possess rich vacancies due to the rapid synthesis process, which causes a high internal stress in the lattice. Therefore, after the CdS nanowire formation, CdSO<sub>4</sub> nanoparticles are formed with the oxygen diffusion in the sulfur vacancies on the surface of nanowires. At the same time, the relaxation of the lattice is achieved.

### 3.3 Optical properties

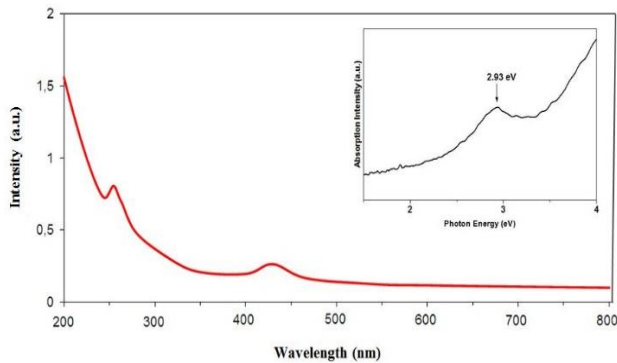
Figure 4 presents the optical absorption spectra of CdS-CdSO<sub>4</sub> nanowires. Two characteristics are apparent from this spectrum: discrete excitonic absorption broadband and a shift of the excitonic absorption band towards a lower wavelength than bulk CdS. The increase in absorption at lower wavelengths is attributed to the electron-hole photogeneration. Furthermore, the excitonic absorption is evident, revealing a visible increase in bandgap energy. The increment in the bandgap energy (~0.53 eV) can be related to the reduction in nanowires' average diameter and CdSO<sub>4</sub> nanoparticles existence as the second phase on the nanowire. The theoretical explanation addressing the bandgap increase based on quantum confinement is given by [16];

$$E_g \approx E_{g0} + (h^2\pi^2\mu/2d^2) - (1.8e^2/\epsilon d) \quad (3)$$

E<sub>g0</sub> is the energy gap for bulk material, i.e., 2.45 eV, d is the mean grain size, μ is the exciton effective mass, and ε is the dielectric constant. For CdS, μ = 0.18 m<sub>0</sub>, and ε = 8.58. This formulation can be employed to estimate the increase in the bandgap energy when the grain size reaches the nanowire's diameter. The estimation yields a value of 0.04 eV, notably different from the obtained value of 0.53 eV. The estimated mean grain size giving the exact shift value was 6-7 nm, which was closed to the measured value of the nanoparticles' mean diameter. Based on these results, the bandgap shift is governed by the absorption of the CdSO<sub>4</sub> phase. However, substantial quantum confinement is presumed to occur in CdSO<sub>4</sub> nanoparticles with a grain size of around 2.4 nm in the order of the exciton Bohr radius [16]. Additional impacts responsible for bandgap shift are strain, crystallinity [17], and exciton longitudinal optical phonon interaction [5].

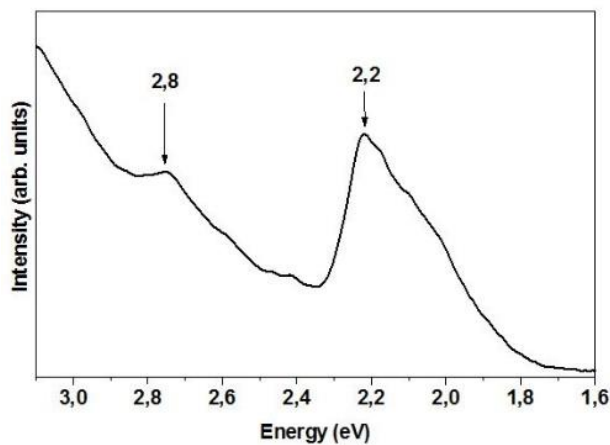
The photoluminescence spectrum of the CdS-CdSO<sub>4</sub> nanocomposite is given in Figure 5. As seen in the figure, there is a robust and broad luminescence band around 2.2 eV, which may be related to the defect emission in CdS. The other band located 2.8 eV is assigned to the band-to-band emission of CdS. The change in PL emissions can be

explained with the crystal defects triggered by the CdSO<sub>4</sub> nanoparticles existence as the second phase on the nanowire.



**Figure 4.** UV-Visible absorption spectra of CdS-CdSO<sub>4</sub> nanocomposite presenting a broad band

The CdSO<sub>4</sub> phase In comparison to the CdS sample, the absorption edge of the CdSO<sub>4</sub> phase shifts to a higher wavelength [18]. Banerjee et al. [19] reported the size induced phase transformation of CdS nanoparticles, indicating that the deformation fault configuration is responsible for the structural transition. This phenomenon occurs by slipping one part of the crystal past another, parallel to the close-packed basal planes of the hexagonal unit cell of CdS.



**Figure 5.** Photoluminescence spectrum of the prepared nanocomposite showing a broad luminescence band around 2.2 eV related to defect emissions and band around 2.8 eV that is attributed to the band-to-band emission of CdS

#### 4 Conclusions

In summary, CdS-CdSO<sub>4</sub> nanomaterials have been synthesized by the arc discharge process followed by heating at 80 °C in air. The bulk CdS nanowires transform to CdSO<sub>4</sub> by oxidation under the suitable temperature and atmosphere. The XRD pattern of CdS-CdSO<sub>4</sub> nanomaterials confirm to CdSO<sub>4</sub> nanoparticles embedded in the CdS nanowire. CdS nanowire shows the hexagonal crystal structure while CdSO<sub>4</sub> nanoparticles present an orthorhombic crystal structure. Also, the high magnification TEM revealed the embedded

CdSO<sub>4</sub> nanoparticles at the CdS nanowires surface. These nanocomposites exhibit a substantial blue shift ~0.5 eV due to nanoparticle absorption. This optical behavior may be due to the UV absorption of nanoparticles and the nanowires visible absorption. The synthesized nanocomposite is suitable for optoelectronic device, sensors and photocatalysis applications.

#### Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

**Similarity rate (iThenticate):** 17%

#### References


- [1] S. Yuvaraj, A. C. Fernandez, M. Sundararajan, C. S. Dash, and P. Sakthivel, Hydrothermal synthesis of ZnO–CdS nanocomposites: Structural, optical and electrical behavior. *Ceram. Int.*, 46(1), 391–402, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.274>.
- [2] A. Pan et al., Stimulated emissions in aligned CdS nanowires at room temperature. *J. Phys. Chem. B*, 109(51), 24268–24272, 2005. <https://doi.org/10.1021/jp055164m>.
- [3] M. Salavati-Niasari, F. Davar, and M. R. Loghman-Estarki, Long chain polymer assisted synthesis of flower-like cadmium sulfide nanorods via hydrothermal process. *J. Alloys Compd.*, 481(2), 776–780, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.03.086>.
- [4] R. Agarwal, C. J. Barrelet, and C. M. Lieber, Lasing in single cadmium sulfide nanowire optical cavities. *Nano Lett.*, 5(5), 917–920, 2005. <https://doi.org/10.1021/nl050440u>.
- [5] G. Nagaraju, S. Ashoka, C. N. Tharamani, and G. T. Chandrappa, A facile low temperature hydrothermal route to CdSO<sub>4</sub> nanotubes/rods. *Mater. Lett.*, 63(3), 492–495, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.11.032>.
- [6] T. Üstün, V. Eskizeybek, and A. Avci, Selectively Nanocube Formation of Tungsten Oxide (WO<sub>3</sub>). *Celal Bayar Univ. J. Sci.*, 16(2), 149–153, 2020. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.677407>
- [7] T. Üstün, V. Eskizeybek, and A. Avci, CuO Nanoparçacıkların Kolay ve Amorf Yapıda Sentezi. *Konya J. Eng. Sci.*, 7(4), 696–704, 2019. <https://doi.org/10.36306/konjes.654449>.
- [8] Z. Li, F. Davar, J. Chen, Z. Li, and X. Fang, CdS/CdSO<sub>4</sub> nanoflower-based photodetector with enhanced photoelectric performances. *ACS Applied Nano Materials*, 3(10), 10190–10199, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02166>.
- [9] V. Eskizeybek, A. Avci, and M. Chhowalla, Structural and optical properties of CdO nanowires synthesized from Cd(OH)<sub>2</sub> precursors by calcination. *Cryst. Res. Technol.*, 46(10), 1093–1100, 2011. <https://doi.org/10.1002/crat.201100221>.
- [10] V. Eskizeybek, O. Demir, A. Avci, and M. Chhowalla, Synthesis and characterization of cadmium hydroxide nanowires by arc discharge method in de-ionized water.

- J. Nanoparticle Res., 13(10), 4673–4680, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0430-z>.
- [11] V. Eskizeybek, E. S. Karabulut, and A. Avci, Synthesis of carbon nanostructures and CaCO<sub>3</sub> nanoparticles by arc discharge in mineral water. J. Nano Res., 15, 57–67, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.15.57>.
- [12] T. Charinpanitkul, N. Sano, P. Muthakarn, and W. Tanthapanichakoon, Enhancing effect of monoolein surfactant on carbon nanoparticle synthesis by arc discharge in liquid. Mater. Res. Bull., 44(2), 324–327, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.05.017>.
- [13] N. Sano et al., Properties of carbon onions produced by an arc discharge in water. J. Appl. Phys., 92(5), 2783–2788, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1498884>.
- [14] M. Ye, H. Zhong, W. Zheng, R. Li, and Y. Li, Ultralong cadmium hydroxide nanowires: Synthesis, characterization, and transformation into CdO nanostrands. Langmuir, 23(17), 9064–9068, 2007. <https://doi.org/10.1021/la070111c>.
- [15] D. F. Zhang, L. D. Sun, J. L. Yin, and C. H. Yan, Low-temperature fabrication of highly crystalline SnO<sub>2</sub> nanorods. Adv. Mater., 15(12), 1022–1025, 2003. <https://doi.org/10.1002/adma.200304899>.
- [16] D. Redfield and W. J. Burke, Optical absorption edge of LiNbO<sub>3</sub>. J. Appl. Phys., 45(10), 4566–4571, 1974. <https://doi.org/10.1063/1.1663089>.
- [17] R. Venugopal, P. I. Lin, C. C. Liu, and Y. T. Chen, Surface-enhanced Raman scattering and polarized photoluminescence from catalytically grown CdSe nanobelts and sheets. J. Am. Chem. Soc., 127(32), 11262–11268, 2005. <https://doi.org/10.1021/ja044270j>.
- [18] S. Yılmaz, İ. Polat, M. A. Olgar, M. Tomakin, S. B. Törelı, and E. Bacaksız, Physical properties of CdS: Ga thin films synthesized by spray pyrolysis technique. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 28(4), 3191–3199, 2017.
- [19] R. Banerjee, R. Jayakrishnan, and P. Ayyub, Effect of the size-induced structural transformation on the band gap in CdS nanoparticles. Journal of Physics: Condensed Matter, 12(50), 10647, 2000.





## Usage of acetic acid for boric acid production from boron wastes Bor atıklarından borik asit üretiminde asetik asidin kullanımı

Emine Yoğurtcuoğlu<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir University, Mining Engineering Department, 51240, Niğde, Turkey

### Abstract

Turkey's boric acid production has the highest production share among refined boron products. This production is takes place at the Bandırma (Balıkesir) and Emet (Kütahya) Boric Acid Plants of ETİ Maden Operations. Concentrated ore (by physical processes) and high-grade wastes accumulated in waste ponds/dams are obtained from boron production plants. In this study, slime size ( $d_{80}=52.70\mu\text{m}$ ) wastes belonging to the Bigadiç field with 9-12%  $\text{B}_2\text{O}_3$  (ulexite-colemanite) content have been evaluated. Due to the small size of feeding without the need for grinding, the sample was subjected to leaching of acetic acid at  $60^\circ\text{C}$  for 1 hour, at a mixing speed of 1500 rpm, at 7% solids. In addition to the recovery of 90%  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (at 4% acid concentration) after the leaching process, different compounds such as  $\text{Na}_2\text{O}$ , and  $\text{CaO}$  were also obtained. Similar peaks were found in the FT-IR analyzes of boric acid and the product obtained. This study is an important output in terms of evaluating the %  $\text{B}_2\text{O}_3$  content in the wastes of both this plant and other boron plants.

**Keywords:** Boron waste, Boric acid, Ulexite, colemanite, Acetic acid

### 1 Introduction

Turkey's boron reserves are in the first place, as it has 73.6% of the world's reserves [1, 2]. The most abundant minerals are tincal, colemanite, and ulexite [3]. The densest minerals in terms of  $\text{B}_2\text{O}_3$  content are tincal, colemanite, and ulexite, and they also have the same trade names (Table 1) [4-7]. Among these minerals, ulexite is mostly found and processed in the Balıkesir-Bigadiç field. In addition to this field, it is also obtained as a by-product in Bursa-Kestelek [8-10, 24]. Although the colemanite mineral is found in most areas (Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç, Bursa-Kestelek), it is extensively obtained from Hisarcık and Espey fields within the Emet Operation Plant [11-13]. The tincal mineral is mostly found in the Eskişehir-Kırka plant [2, 14-16]. The products obtained after physical processes are called concentrated/run-out boron products. The products obtained after chemical processes are called refined boron products. Boron products refined within Eti Maden include boric acid, borax pentahydrate, borax decahydrate, boron oxide, ground colemanite, ground ulexite, and agricultural boron, anhydrous borax, zinc borate, and calcined tincal [2, 5, 17].

### Öz

Türkiye'nin borik asit üretimi rafine bor ürünleri arasında en yüksek üretim payına sahiptir. Söz konusu bu üretim ETİ Maden İşletmelerinin Bandırma (Balıkesir) ve Emet (Kütahya) Borik Asit Tesislerinden üretilmektedir. Bor üretim tesislerinden konsantre cevher (fiziksel işlemlerle) ve atık havuzlarında/barajlarda biriktirilen yüksek tenörlü atıklar elde edilmektedir. Bu çalışmada, Bigadiç sahasına ait %9-12  $\text{B}_2\text{O}_3$  (üleksit-kolemanit) içeriğine sahip şlam boyutundaki ( $d_{90}=81.94\mu\text{m}$ ) atıklar değerlendirilmiştir. Numune, öğütülmeye ihtiyaç duyulmadan küçük besleme boyutundan dolayı  $60^\circ\text{C}$ 'de 1 saat, 1500 rpm karıştırma hızında, %7 katı oranında asetik asit liç işlemine tabi tutulmuştur. Liç işlemi sonrasında %90  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (%4 asit konsantrasyonunda) veriminin yanı sıra  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$  gibi farklı bileşikler de elde edilmiştir. Borik asit ve elde edilen ürünün FT-IR analizlerinde benzer pikler bulunmuştur. Bu çalışma, hem bu tesisin hem de diğer bor tesislerinin atıklarındaki %  $\text{B}_2\text{O}_3$  içeriğinin değerlendirilmesi açısından önemli bir çıktıdır.

**Anahtar kelimeler:** Bor atığı, Borik asit, Üleksit, kolemanit, Asetik asit

**Table 1.** Commercial boron minerals [2, 6, 7]

Minerals	Formula	$\text{B}_2\text{O}_3$ Content (% wt)
Colemanite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	50.8
Borax/Tincal	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$	43.0
Ulexite	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	35.5
Kernite	$\text{Na}_2\text{B}_{14}\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	51.0
Probertite	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	50.5
Pandermite	$\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_9\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	49.8
Hydroboracite	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{11}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50.5

In general, the usage areas of boron products are glass and glass fiber production, cleaning and whitening, ceramic and enamel industry, textile, metallurgy-material, agriculture, wood protection, insulation, health, and energy industries. Boron, which can be used in concentrated as well as refined form, can be consumed in the military and armored vehicles, glass, electronics - computers, energy, photography and vision systems, pharmaceuticals, cosmetics, communications, construction, agriculture, plastics, chemistry, paper, metallurgy, textiles, automobiles. It finds

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eyogurtcuoglu@ohu.edu.tr (E. Yoğurtcuoğlu)  
Geliş / Received: 15.03.2022 Kabul / Accepted: 26.04.2022 Yayınlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1088309

use in many different sectors such as space, aviation, and energy [2, 3, 5, 18, and 19].

Boric acid is a strategically and industrially important boron compound used in many different fields such as glass, ceramics, the pharmaceutical industry, and nuclear energy [18]. In the Bigadic (Balıkesir) Operation Plant, the production of boron has been carried out with ulexite and colemanite minerals since 1950. The B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> densities and contents of these minerals are 1.98 g/cm<sup>3</sup> for 43% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-and 2.4 g/cm<sup>3</sup> for 50.8% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively [1, 3, 13, 20-23]. Besides these minerals, the side rocks are composed of carbonate and silicate minerals and their densities are generally 2.6-2.7 g/cm<sup>3</sup> [22].

While concentrated boron products (raw boron products) are produced from the concentrator plants, wastes with high B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content (9-22% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at varying rates) accumulate in waste ponds/dams every year [9, 10, 25, 26]. Besides being an economic loss, these wastes attract attention in terms of many environmental factors such as waste dam/pond area insufficiency, and wastewater problems [27, 28]. Boron wastes have been examined from three different aspects: proper storage of waste, recovery of valuable contents, and evaluation of clay minerals [29]. The production of boric acid has been conducted with a dissolution efficiency of approximately 97% in a study that investigating the application of bioleaching (*aspergillus niger* pure culture) to colemanite wastes of the Kütahya Emet Plant. This dissolution efficiency has obtained at a 3% (wt) solid ratio, -75 µm grain size, 3.98 pH, 25±2 °C, and 15 days [12, 30].

In the heap leaching studies of Bigadiç Plant's colemanite and ulexite wastes, boric acid has been obtained at a concentration of 4.7% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (95%) at room temperature with 80% efficiency in 6 hours [9]. In the tank leaching process containing sulfuric acid applied to a similar sample, the production of boric acid has been performed at 85-90% recovery efficiency at 60-65°C, 7% solid ratio, and 1-6% acid concentration [26]. In a different study on the leaching of citric acid, 58-71% recovery efficiencies were achieved in the experiments performed under similar conditions with sulfuric acid at 2-9% acid concentration [10]. Reverse flotation tests on Bigadiç Plant wastes (+75 µm) were carried out with Sulfanate type Cyanamid R801 and R825 under natural pH (9-9.5) conditions. The best result was a product with 60% efficiency and 17% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grade [8].

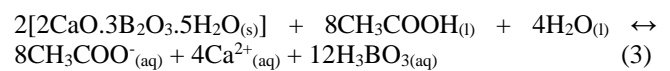
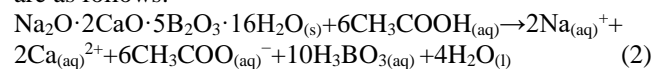
In the study of Ediz and Özdağ, the physical enrichment process of tincal ore and its wastes were investigated using a helical transporter. As a result of the tests, it was obtained as 88.66% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from the ore sample. The test conditions of this sample are 70°C temperature, 15° slope, 7 r/min rotation speed and 1/8 solid/liquid ratio. The recovery efficiency of the waste sample is 87.83% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The test conditions of the waste sample are 50°C temperature, 10° slope, 12 rpm rotation speed and 1/12 solid/liquid ratio [31].

Another study shows that, in dissolving ulexite with acetic acid, the dissolution rate was positively affected by solution concentration and temperature, while solid-liquid ratio and particle size were negatively affected [32]. Similar dissolution results were also found in the acetic acid solution of colemanite [11]. A similar situation was observed by

Bayca in the production of boric acid by sulfuric acid leaching of Balıkesir Bigadiç's colemanite waste [33]. The boric acid has also been obtained from colemanite using propionic acid and sulfuric acid. This solution produced has been more pure and efficient because it prevents sodium and potassium transfer [34-36]. The decomposition of acetic acid into its ions in an aqueous medium is as follows (1) [37, 38]:



The general dissolution reactions of ulexite mineral (2) [32] and colemanite mineral (3) [11, 39] in acidic medium are as follows:



Dissolution studies have been carried out on the reactions of colemanite and ulexite with many organic such as sulfuric acid [6, 9, 26, 33] and inorganic acids such as oxalic [6, 9, 26, 33], citric [10, 30], acetic [11, 32, 37-38], propionic acid [34, 36].

In this study, recovery efficiencies of the process that dissolving sludge waste taken from the waste ponds of Bigadiç Plant Concentrator Plant with acetic acid as an organic acid were evaluated.

## 2 Material and methods

The sample used in the experiments is the slime wastes of the waste ponds of Bigadiç Boron Operations (Eti Maden). Approximately 55-60 kg of samples were dried, blended, divided, and packaged.

The chemical (Rigaku ZSX Primus X-Ray Fluorescence) and particle size (Malvern Mastersizer 3000) analyses of the test sample were performed in Bigadiç Plant Laboratories. % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content analyses on all samples were carried out by titration method. XRD analysis was performed to determine mineral structures with a Panalytical-Empyrean model device. In order to understand the mineral structure changes by examining the bond structures, FT-IR analyses (wavelength range of 4000-400 cm<sup>-1</sup>) was performed with Bruker Vertex 70 spectrometer in NOHU Central Research Laboratory.

According to the particle size distributions given in Table 2, it has been determined that 80% of the sample is below 52.7 µm, while 10 % of it is below 2.19 µm.

**Table 2.** The particle size distribution [9, 10, 26]

size	µm
d <sub>90</sub>	81.94
d <sub>80</sub>	52.70
d <sub>50</sub>	16.49
d <sub>30</sub>	6.36
d <sub>10</sub>	2.19

The experiment samples were weighed in at approximately 130 g and prepared at a 7% solid ratio. The water used in all stages of the experiments (such as filter washing water) is distilled water. The acid used is Tekkim brand acetic acid with 99% purity. The experiments were carried out in a fume hood and using stirrers with magnetic heaters. Experimental parameters are the temperature of 60 °C, leaching time of 1 hour, stirring speed of 1500 rpm, at 7% solids, and acid concentration of 2-22%. After the experiment, solid-liquid separation was done by the filtering process. Each filter cake was washed and dried. XRF analyses were made from the leaching wastes obtained. Recovery efficiencies were calculated according to the dissolved solids.

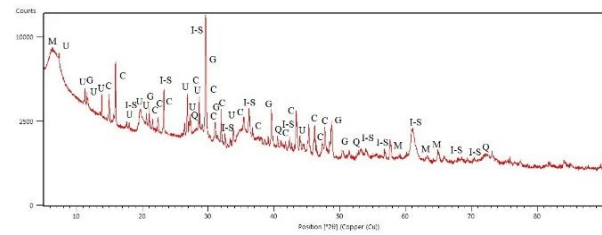
The chemical analysis of the sample used in the experiments is given in Table 3. The B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content is also between 8-12%. According to the table, the contents of some compounds in the waste are 1.16% Na<sub>2</sub>O, 16.61% CaO, and 0.26% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [9, 10, 26].

**Table 3.** Chemical analysis of test material

Compound	% Content
SiO <sub>2</sub>	32.11
CaO	16.61
Na <sub>2</sub> O	1.16
MgO	25.23
SO <sub>3</sub>	0.27
SrO	0.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26

In the XRD analysis of the test sample (Figure 1), colemanite, ulexite, montmorillonite (Al<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>12</sub>Si<sub>4</sub>), illite-

smectite ((K, H<sub>3</sub>O)(Al, Mg, Fe)<sub>2</sub>(Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>[(OH)<sub>2</sub>·(H<sub>2</sub>O)]), quartz (SiO<sub>2</sub>), and gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) minerals were detected.



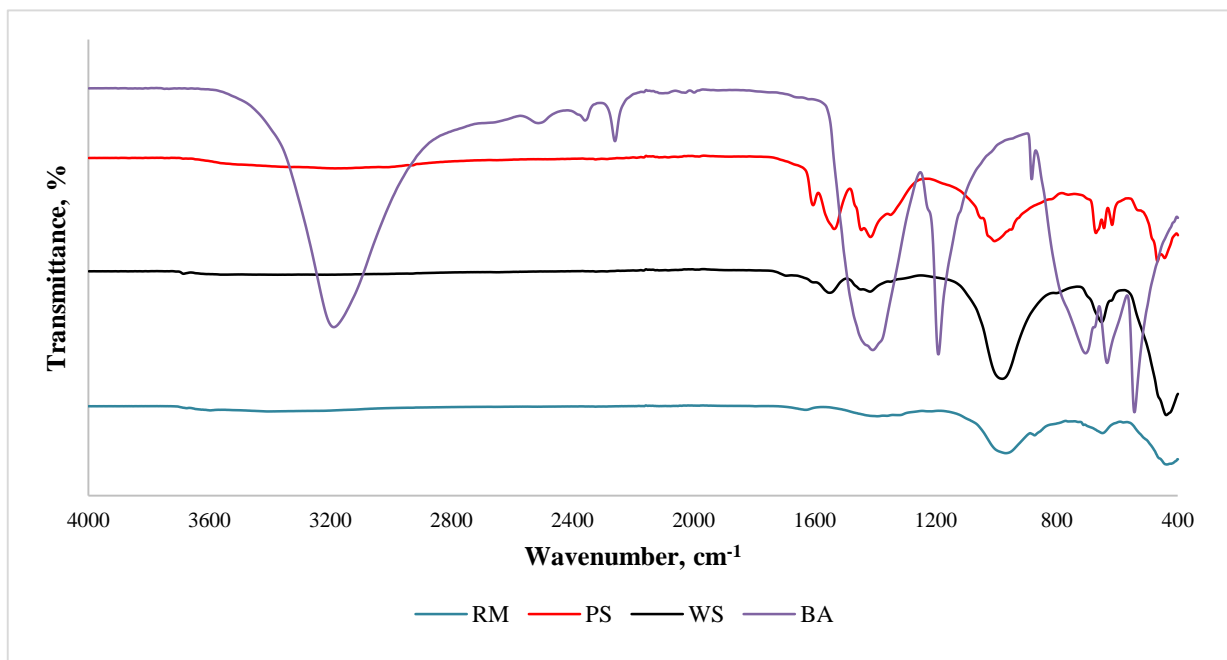
**Figure 1.** XRD Analysis of the raw material [M: Montmorillonite; C: Colemanite; U: Ulexite; I-S: Illite-Smectite; G: Gypsum; Q: Quartz]

### 3 Result and discussion

In order to investigate the mineral bond structure, FT-IR analyzes were performed on raw material (RM), waste (WS), product (PS), and boric acid (BA) samples (Figure 2). In the test sample, 3674, 3597, 3404 cm<sup>-1</sup> peaks indicate O-H bonds of clay structures such as illite minerals [40-44]. The 1626 cm<sup>-1</sup> peak of this sample indicates the existence of an H<sub>2</sub>O structure [41] and C=O bonds [44]. Apart from these, CaCO<sub>3</sub> (1393-872-711 cm<sup>-1</sup>), and Si-O or other carbon bonds (1225-579 cm<sup>-1</sup>) were also observed in this sample [42, 44, 45].

The peaks of 3185, 1415, 670, and 643 cm<sup>-1</sup> determined in the product sample are similar to the peaks of boric acid. In addition, the presence of B<sub>3</sub>-O, and B<sub>4</sub>-O bond peaks belonging to ulexite and colemanite minerals are also observed in the test and product samples. These boron-containing peaks are 1360, 1349, 1321, 1005, 967, 761, 748, 728, and 711 cm<sup>-1</sup> [45, 46].

When the peaks of the waste sample were examined, carbon bonds such as C-H (1550-1416 cm<sup>-1</sup>) and the presence of boric acid leaks were observed [18, 47-49].



**Figure 2.** FT-IR Analyses of samples [RM: The raw material, PS: The product sample, WS: The waste sample, and BA: The boric acid sample]

As a result of the acetic acid leaching process, different compounds, especially boric acid, were also recovered. According to Figure 3, the recovery yield values of boric acid were between 68.2-90.2%, and the highest recovery was obtained from the 4% acetic acid leaching process similarly to other dissolutions.

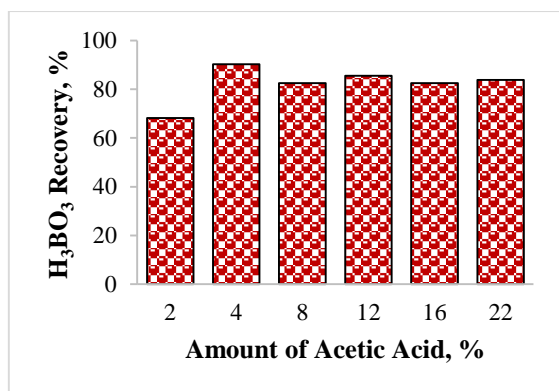


Figure 3. Boric acid % recovery after acetic acid leaching

Dense clay-containing minerals determined by chemical and XRD analyses of the sample were important in determining the solid amount percentage of the experiments. Because these minerals generally swell by gaining volume in the aquatic environment. Therefore, the mixing speed of the experiments was kept high (1500 rpm). Thus, in the experiments after the 4% acid concentration ratio, the acid could not affect the mineral structure anymore. Therefore, these test results are in the range of 83-85%. Although acetic acid is a weak acid, the amount of solid dissolved after the experiment is also high. In order to determine the % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (remaining dissolution) amount in the XRF analysis of the waste samples obtained as a result of the experiments, it could not be carried out at solid rates lower than 7%.

In addition, the % amounts of other compounds (except for B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) obtained after dissolution are also shown in Figures 4 and 5. Among these compounds, CaO was dissolved in the range of 52-80%, and almost all of MgO (95-97%) was. SO<sub>3</sub> and SrO dissolution were also found to be 28-73% and 34-73%, respectively.

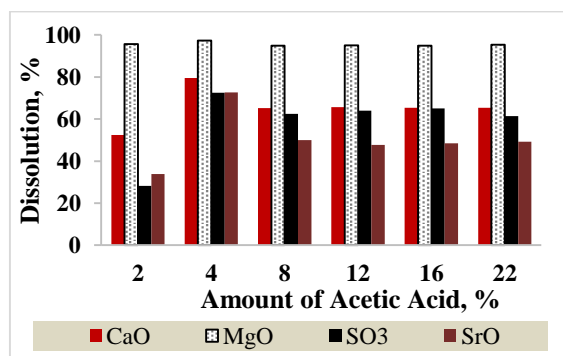


Figure 4. The dissolution of the compounds of CaO, MgO, SO<sub>3</sub>, and SrO after acetic acid leaching

The lowest percentage of dissolution of these compounds was seen at a 2% acid concentration. In particular, the dissolved CaO compound shows that the content of ulexite and colemanite minerals can be degraded. On the other hand, dissolution of other compounds showed that gangue mineral structures such as clay and calcite were also affected. In addition, as in B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the highest resolutions of these compounds have been performed at a 4% acid concentration.

Similarly, the highest solubility of Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> compounds at 4% acid concentration was determined as 58.6%, 64.5%, and 65.3%, respectively. The lowest dissolution percentages of these compounds were found at different acid concentrations. However, the highest acid concentration has resulted as in the other two graphs above (4%). Na<sub>2</sub>O dissolution demonstrates that the ulexite mineral structure is decomposed, as in CaO. Compared to inorganic solvents such as HCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, acetic acid is more advantageous, especially since impurities such as iron dissolve to a lesser extent [50]. As a result of this study, the solubility percentage/rate of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> has been obtained at low values.

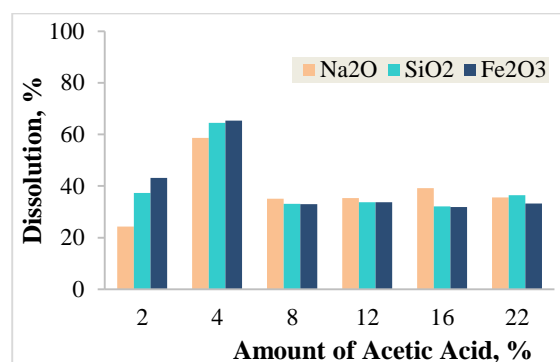


Figure 5. The Dissolution of the compounds of Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> after acetic acid leaching

It has been stated that the solubility or crystallization of silica occurs either in high pH, high ionic strength, or acidic solution pH<9 and at high temperature. Therefore, when Ca and Si in calcium-rich blast furnace slag are dissolved with acetic acid, 5% acid is completely dissolved in 30 minutes at room temperature. In addition to these elements, Al and Mg elements were also extracted [51-52]. As a result of this research, similar outcomes have been obtained in an acetic acid environment.

As a general principle, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> obtained by dissolving sulfuric acid in boric acid plants is filtered by filtration processes and crystallized at 85-90 °C. Then, the moisture of crystallized boric acid with 5% moisture content at 46 °C is dried in fluid bed dryers. The remaining weak solution is fed back to the plant [19]. In the case of evaluation of this research, crystalline boric acid can be obtained by similar processes.

#### 4 Conclusions

The amount of boron waste with high B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content is increasing every year, especially in the Bigadiç Plant's, and

this situation seriously affects the waste stock capacity. This research makes it possible to evaluate the boron wastes of this plant with acetic acid, an organic acid. There are ulexite-colemanite minerals containing highly  $B_2O_3$  in this plant's wastes. As seen in this study, it is possible to obtain these contents in the form of boric acid. This result also provides the undermentioned advantages.

1. The experiments have been performed at low temperatures ( $60^\circ C$ ), acid concentrations (2-22 %), and time (1 hour). Consequently, the recoveries have reached around 90%.

2. This research issue is important in terms of obtaining wastes with less impurity by dissolving them with low-cost acetic acid.

3. It is a remarkable output that the valuable %  $B_2O_3$  content in the waste of this concentrator plant is recoverable. This result is also important in terms of its application in other boron concentrator plant wastes.

4. After the valuable boron content is recovered, the remaining clay-containing wastes will be more suitable for use in many areas (such as ceramics, bricks, cement, glass, silica, refractory).

5. After the  $B_2O_3$  content is obtained, the wastes can also be used in mining, apart from the sectors mentioned above. In this sector, it has applicability as a filling material in open pit and underground mining.

6. Besides all these contributions, the evaluation of valuable % $B_2O_3$  wastes will also help with new stock problems and the search for pools/dams.

#### Acknowledgments

I would like to thank Bigadiç Boron Operations Directorate for their contribution to sample supply and analyses.

#### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %10

#### References

- [1] V. Arslan and O. Bayat, "Kolemanit Cevherinden Oksalik Asit Liçi ile Borik Asit Eldesi (in Turkish), Production of Boric Acid From Colemanite Ore by Oxalic Acid Leaching," *J. Undergr. Resour. Altı Kaynakları Derg.*, no. 10, pp. 11–20, 2016, Accessed: Dec. 07, 2021. [Online]. Available: [www.mtbilimsel.com](http://www.mtbilimsel.com).
- [2] BSR, "Bor Sektör Raporu/Boron Sector Report 2020," Ankara, Turkey, 2020.
- [3] T. Guyaguler, "Türkiye bor potansiyeli," in *4. Industrial Mineral Symposium*, 2001, pp. 18–27.
- [4] S. G. Ozkan, "Comparison of Magnetic Separation and Flotation Results for Beneficiation of Emet Colemanite Ores," *Magn. Electr. Sep.*, vol. 10, no. 4, pp. 213–221, 2001, doi: [10.1155/2001/10257](https://doi.org/10.1155/2001/10257).
- [5] N. Acarkan, "Boron Products and Their Uses/Bor ürün çeşitleri ve kullanım alanları (in Turkish)," *I. Uluslararası Bor Sempozyumu*, pp. 1–5, 2002.
- [6] C. Bilal, "Kolemanitin Sülfürik Asit ile Reaksiyon Kinetiğinin İncelenmesi/The reaction kinetics of colemanite with sulfuric acid (in Turkish)," ITU, Istanbul, 2003.
- [7] C. Helvacı, "Turkish borate deposits: Geological setting, economic importance and boron policy/Türkiye Borat Yatakları: Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası (in Turkish)," in *5th Industrial Minerals Symp.*, 2004, pp. 11–27.
- [8] F. Göktepe, "Bigadiç bor atıklarının flotasyonla zenginleştirilebilirliğinin ön araştırması/Concentration Study of Bigadiç Boron Tailings by Flotation (in Turkish)," in *2nd International Boron Symposium*, 2004, pp. 81–86.
- [9] E. Yoğurtcuoğlu and O. Dalgacı, "Evaluation of Bigadiç Colemanite and Ulexite Slurry Wastes by Heap Leach/Bigadiç kolemanit ve üleksit şlam atıklarının yığın liçi ile değerlendirilmesi (in Turkish)," in *International Boron Symposium*, 2019, pp. 102–106.
- [10] E. Yoğurtcuoğlu, "Bigadiç Bor Atıklarından Sitrik Asit ile Borik Asit Elde Edilmesi/The Production of Boric Acid with Citric Acid from Bigadic Bor Wastes (in Turkish)," in *1st International Conference on Environment, Technology and Management (ICETEM)*, 2019, pp. 1054–1060.
- [11] C. Ozmetin, M. M. Kocakerim, S. Yapıcı, and A. Yartaşı, "A Semiempirical Kinetic Model for Dissolution of Colemanite in Aqueous  $CH_3COOH$  Solutions," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 35, no. 7, pp. 2355–2359, 1996.
- [12] G. Sertkaya and B. Bayat, "Kolemanit Atıklarından Biyoliç Yöntemi ile Borik Asit Eldesi/Production of Boric Acid From Colemanite Wastes by Bioleaching tailings," *Ç.U. Sci.*, vol. 17, no. 7, pp. 1–10, 2008.
- [13] C. Helvacı, "Borate deposits: An overview and future forecast with regard to mineral deposits," *J. Boron*, vol. 2, no. 2, pp. 59–70, 2017, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/boron/issue/31236/302668>.
- [14] Y. Erdoğan, A. Olgun, F. Özmal, and B. Zeybek, "Utilization of Boron Industry Wastes, Fly Ash, Bottom Ash and Alunite Mineral in Cement Production as an Additive Material," 455-461, 2nd International Boron Symposium, 2004.
- [15] A. T. Baydır and Y. Erdoğan, "Dissolution Of The Rubidium From Eti Mine Kırka Boron Management Waste," *Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 13–20, 2013, doi: [10.5578/fmbd.6511](https://doi.org/10.5578/fmbd.6511).
- [16] B. Yaman and N. Çalış Açıkbay, "Dry Sliding Behaviour of Boron Waste Reinforced Epoxy Matrix Composites," *J. Boron*, vol. 3, no. 2, pp. 63–70, 2018, doi: [10.30728/boron.343608](https://doi.org/10.30728/boron.343608).
- [17] R. Boncukcuoğlu, M. M. Kocakerim, E. Kocadağistan, and M. T. Yılmaz, "Recovery of boron of the sieve reject in the production of borax," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 37, no. 2, pp. 147–157, 2003, doi: [10.1016/S0921-3449\(02\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00072-1).
- [18] I. Y. Elbeyli, "Production of crystalline boric acid and sodium citrate from borax decahydrate," *Hydrometallurgy*, vol. 158, pp. 19–26, 2015, doi: [10.1016/j.hydromet.2015.09.022](https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.09.022).
- [19] H. Tüzün, S. Ün, and Ş. Buğdaycı, "Konsantre ve



- Rafine Bor Ürünler,” in *International Symposium on Boron*, 2019, pp. 63–70.
- [20] C. Helvacı, “Türkiye Borat Yatakları Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası,” *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 5, no. 1, pp. 4–41, 2003.
- [21] C. Helvacı, “Bor madenciliğinde işletme, zenginleştirme ve pazarlama sorunları, Mining, Dressing and Marketing problems of Borate Minerals (in Turkish),” in *3rd International Boron Symposium*, 2006, pp. 559–571.
- [22] Ö. Gülsoy, L. Ergün, M. Can, A. Mergen, T. Ergül, and T. Aydın, “Bigadiç bor konsantratörü için alternatif zenginleştirme yöntemi (in Turkish),” in *3. International Boron Symposium*, 2006, pp. 307–313.
- [23] C. Helvacı, “Bor Yataklarını İçeren Neojen Havzalarının Jeolojik Özellikleri: Yatakların Genel Değerlendirmesi ve Gelecek Öngörüsü,Türkiye,” *Maden Tetk. ve Aram. Derg.*, vol. 0, no. 151, 2015, doi: [10.19076/mta.75175](https://doi.org/10.19076/mta.75175).
- [24] Boron as the Rising Value of Turkey <https://www.etimaden.gov.tr/en/boron-in-turkey> Accessed 18.01.2022
- [25] M. Özdemir and N. U. Öztürk, “Utilization of clay wastes containing boron as cement additives,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1659–1661, 2003, doi: [10.1016/S0008-8846\(03\)00138-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00138-8).
- [26] E. Yoğurtcuoğlu, “Üleksit-Kolemanit İçeren Bor Şlam Atıklarından Borun Geri Kazanımı/Recovery of Boron from Boron Slurry Wastes Containing Ulexite-Colemanite (in Turkish),” in *International Turkic World Congress on Science and Engineering*, 2019, pp. 1262–1267.
- [27] T. Batar, S. Bayça, Ö. Solak, E. Sayın, E. Can, and B. Kahraman, “Effects of boron ore and its tailings to the ceramic wall tile structure (in Turkish),” in *6th International Industrial Minerals Symposium*, 2007, pp. 328–333.
- [28] E. Sayın, T. Batar, Ö. Solak, A. Yamık, and M. B. Tufan, “Use of tincal ore and boron tailings in ceramic paste and water insulating mortar (in Turkish),” in *6th International Industrial Minerals Symposium*, 2007, pp. 428–437.
- [29] İ. Bentli, O. Özdemir, M. S. Çelik, and N. Ediz, “Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri Boron Tailings and Evaluation Strategies,” in *The First International Boron Symposium*, 2001, pp. 250–258.
- [30] G. Sertkaya, “Kolemanit atıklardan biyoliç yöntemi ile borik asit eldesi/Production of boric acid from colemanite wastes by bioleaching tailings (in Turkish),” Çukurova University, 2007.
- [31] N. Ediz and H. Özdağ, “Etibor A.Ş. Kırka Boraks İşletmesi Tincal Cevheri ve Atıklarının Doğrudan Zenginleştirilmesi/Direct Processing of Tincal Ores and the Wastes of the Etibor A.S. Kırka Borax Mine,” *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, vol. 26, pp. 107–116, 2002.
- [32] A. Ekmekyapar, N. Demirkiran, and A. Künkül, “Dissolution kinetics of ulexite in acetic acid solutions,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 86, no. 9, pp. 1011–1016, 2008, doi: [10.1016/j.cherd.2008.04.005](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.04.005).
- [33] S. U. Bayca, “Recovery of Boric Acid From Colemanite Waste by Sulfuric Acid Leaching and Crystallization,” pp. 793–804, 2007.
- [34] A. N. Bulutcu, C. O. Ertekin, and M. B. Kuskay Celikoyan, “Impurity control in the production of boric acid from colemanite in the presence of propionic acid,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 47, no. 12, pp. 2270–2274, 2008, doi: [10.1016/j.cep.2007.12.012](https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.12.012).
- [35] B. Kuşay Çelikoyan and A. N. Bulutcu, “Kolemanitten yeni bir yöntemle borik asit üretim prosesinin geliştirilmesi/Development of a new method for the boric acid production process from colemanite ore (in Turkish),” *İTU J.*, vol. 9, no. 2, pp. 15–26, 2010.
- [36] B. Kuskay and A. N. Bulutcu, “Design parameters of boric acid production process from colemanite ore in the presence of propionic acid,” *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 50, no. 4, pp. 377–383, 2011, doi: [10.1016/j.cep.2011.02.013](https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.02.013).
- [37] O. Laçın, B. Dönmez, and F. Demir, “Dissolution kinetics of natural magnesite in acetic acid solutions,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 75, no. 1–2, pp. 91–99, 2005, doi: [10.1016/j.minpro.2004.05.002](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.05.002).
- [38] B. Dönmez, F. Demir, and O. Laçın, “Leaching kinetics of calcined magnesite in acetic acid solutions,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 15, no. 6, pp. 865–869, 2009, doi: [10.1016/j.jiec.2009.09.014](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.014).
- [39] K. Bay, “Kolemanitten Zayıf Asitlerle Borik Asit Üretimi,” İstanbul Technical University, 2002.
- [40] F. G. Cirujano and F. X. Llabrés I Xamena, “Tuning the Catalytic Properties of UiO-66 Metal-Organic Frameworks: From Lewis to Defect-Induced Brønsted Acidity,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 4879–4890, 2020, doi: [10.1021/acs.jpcclett.0c00984](https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c00984).
- [41] J. Pironon, M. Pelletier, P. De Donato, and R. Mosser-Ruck, “Characterization of smectite and illite by FTIR spectroscopy of interlayer NH<sub>4</sub><sup>+</sup> cations,” *Clay Miner.*, vol. 38, no. 2, pp. 201–211, 2003, doi: [10.1180/0009855033820089](https://doi.org/10.1180/0009855033820089).
- [42] B. B. Zviagina, V. A. Drits, and O. V. Dorzhieva, “Distinguishing features and identification criteria for K-dioctahedral 1M micas (Illite-aluminoceladonite and illite-glaucanite-celadonite series) from middle-infrared spectroscopy data,” *Minerals*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: [10.3390/min10020153](https://doi.org/10.3390/min10020153).
- [43] C. M. Muller, B. Pejčić, L. Steban, C. D. Piane, M. Raven, and B. Mizaikoff, “Infrared Attenuated Total Reflectance Spectroscopy An Innovative Strategy for Analyzing Mineral Components in Energy Relevant Systems.pdf.” 2014, DOI: [10.1038/srep06764](https://doi.org/10.1038/srep06764).
- [44] E. Aliyari, M. Alvand, and F. Shemirani, “Modified surface-active ionic liquid-coated magnetic graphene oxide as a new magnetic solid phase extraction sorbent for preconcentration of trace nickel,” *RSC Adv.*, vol. 6, no. 69, pp. 64193–64202, 2016, doi: [10.1039/c6ra04163a](https://doi.org/10.1039/c6ra04163a).
- [45] A. Budak and M. Gönen, “Extraction of boric acid from colemanite mineral by supercritical carbon dioxide,” *J.*

- Supercrit. Fluids*, vol. 92, pp. 183–189, 2014, doi: [10.1016/j.supflu.2014.05.016](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.05.016).
- [46] G. G. Hacıosmanoğlu, S. Genç, and Z. S. Can, “Efficient removal of methyl orange from aqueous solutions using ulexite,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, p. 101466, 2021, doi: [10.1016/j.eti.2021.101466](https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101466).
- [47] Y. Lu, J. Drelich, and J. D. Miller, “Oleate adsorption at an apatite surface studied by ex-situ FTIR internal reflection spectroscopy,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 202, no. 2, pp. 462–476, 1998, doi: [10.1006/jcis.1998.5466](https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5466).
- [48] R. Ragupathi Raja Kannan, R. Arumugam, and P. Anantharaman, “Fourier Transform Infrared Spectroscopy Analysis of Seagrass Polyphenols,” *Curr. Bioact. Compd.*, vol. 7, no. 2, pp. 118–125, 2011, doi: [10.2174/157340711796011142](https://doi.org/10.2174/157340711796011142).
- [49] G. F. Mohamed, M. S. Shaheen, S. K. H. Khalil, A. M. S. Hussein, and M. M. Kamil, “Application of FT-IR Spectroscopy for Rapid and Simultaneous Quality Determination of Some Fruit Products,” *Nat. Sci.*, vol. 9, no. 11, pp. 21–31, 2011.
- [50] F. Demir, O. Laçın, and B. Dönmez, “Leaching Kinetics of Calcined Magnesite in Citric Acid Solutions,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 1307–1311, 2006, doi: [10.1016/j.jiec.2009.09.014](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.014).
- [51] K. Song, S. Park, W. Kim, C.W. Jeon, J.W. Ahn, Effects of experimental parameters on the extraction of silica and carbonation of blast furnace slag at atmospheric pressure in low-concentration acetic acid, *Metals (Basel)*. 7 (2017). <https://doi.org/10.3390/met7060199>.
- [52] B. Terry, The acid decomposition of silicate minerals part II. Hydrometallurgical applications, *Hydrometallurgy*. 10 (1983) 151–171. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(83\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0304-386X(83)90003-8).





# GaAs yarıiletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilmesi ve FLIM tekniği ile yüzey karakterizasyonu

## Fabrication of the micro grooves on GaAs semiconductor surfaces and surface characterization via FLIM technique

Sabriye Acikgoz<sup>1,\*</sup> , Hasan Yungevis<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 70200, Karaman, Türkiye

### Öz

Farklı üretim koşulları altında gerçekleştirilen çift hücreli elektrokimyasal aşındırma metodu ile p-tipi Galyum arsenik (GaAs) yarıiletken üzerinde paralel mikro yarıklar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Mikro yarıkların yüzey morfolojisini analiz etmek için alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. GaAs yüzeyinde derinliği 210 ile 30 nm arasında değişen mikro yarıklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, mikro yarıkların kimyasal yapısı enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) tekniği ile belirlenmiştir. EDS analizi mikro yarıkların yaklaşık olarak 1:1 atomik oranlarda galyum (Ga) ve arsenik (As) elementlerini içerdiğini doğrulamıştır. Mikro yapılı GaAs yüzeyin zaman uyumlu foto ışınma özelliklerini incelenmek için floresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskopi (FLIM) tekniği uygulanmıştır. 210, 70 ve 30 nm derinliğe sahip olan mikro yarıkların üzerindeki taşıyıcı ömürleri sırasıyla 0.70, 0.37 and 0.25 ns olarak ölçülmüştür. Taşıyıcı rekombinasyon ömrünün, yüzey rekombinasyonlarından dolayı yarıkların derinliğine güçlü bir şekilde duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı zamanda, GaAs mikro yarıkların yüzey rekombinasyon hızı  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$  olarak hesaplanmıştır. Üretilen mikro yarıklar optoelektronik aygıt uygulamaları için ilgi çekici görünmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Galyum arsenik, Elektrokimyasal aşındırma, Mikro yarıklar, FLIM mikroskobu, Taşıyıcı rekombinasyon ömrü haritası

### 1 Giriş

Yüksek elektron mobilitesi, doğrudan geçişli bant yapısı, düşük güç tüketimi ve yüksek kırılma alanı gibi nadir özelliklere sahip olan GaAs modern optoelektronik aygıt teknolojisinde en çok tercih edilen malzemelerden biri haline gelmiştir [1-4]. Örneğin; foto detektörler [5], yüksek performanslı lazerler [6], kuantum bilgi işlenmesi [7] gibi pek çok aygıt için GaAs yarıiletkeni mükemmel bir alttaş malzemesi olmuştur. Aynı zamanda, GaAs yarıiletken yüzeyinde üretilen nano ve mikro boyuttaki homojen yapılar bu yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik özelliklerinin doğrudan kontrol edilebilmesine imkân sağlamaktadır. Yasak bant aralığı mühendisliğinin de devreye girmesi ile

### Abstract

Paralel micro grooves were successfully fabricated on p-type gallium arsenide (GaAs) substrate by double cell electrochemical etching method under various growth conditions. The field emission scanning electron microscopy (FESEM) was used to analyze surface morphology of micro grooves. It is observed that micro grooves with a depth size ranging from 210 to 30 nm are formed on GaAs surface. Moreover, the chemical composition of micro grooves was determined by energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) technique. The EDS analysis confirmed that the prepared grooves were composed dominantly of gallium (Ga) and arsenide (As) with atomic ratio of approximately 1:1. In order to probe time-resolved photoluminescence properties of micro structured GaAs surface, fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM) technique has been employed. The carrier lifetimes on microgrooves with varying dept 210, 70 and 30 nm are measured as 0.70, 0.37 and 0.25 ns, respectively. It has been concluded that the carrier recombination lifetime was strongly sensitive to the depth of grooves due to surface recombinations. Moreover, surface recombination velocity of GaAs micro grooves is calculated as  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$ . The grown micro grooves seem to be interesting for applications in optoelectronic devices.

**Keywords:** Gallium arsenide, Electrochemical etching, Micro grooves, FLIM Microscope, Carrier recombination lifetime map

GaAs temelli nano ve mikro yapılar ile üretilen optoelektronik aygıtların sayısı her geçen gün artmaktadır. Enerji bant yapısı ve yasak bant aralığının kontrollü bir şekilde ayarlanabildiği GaAs kuantum kuyular diyot lazer [8] ve ışık saçan diyot (LED) [9] uygulamalarında çokça karşımıza çıkmaktadır. Doğrudan geçişli bant yapısına sahip GaAs yarıiletkeni ile üretilen güneş hücreleri diğer yarıiletkenler ile üretilenlere göre oldukça yüksek verimlilik göstermektedir. Ancak GaAs kristalin yüksek maliyeti bu malzemenin güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılabilmesine engel teşkil etmektedir. Bu engeli bertaraf etmek ve daha az malzeme ile daha geniş aktif yüzey alanı elde edilmek için GaAs yüzeyinde nano teller üretilmiş ve

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sabriyeacikgoz@kmu.edu.tr (S. Acikgoz)  
Geliş / Recieved: 03.03.2022 Kabul / Accepted: 09.05.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1082122

güneş hücrelerinin verimlilikleri araştırılmıştır. Han ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada GaAs nano teller ile üretilen ve esnek yapıya sahip olan güneş hücrelerinin %16 civarında verimlilik gösterdiği tespit edilmiştir [10]. Ayrıca, düz GaAs yüzeyler ile kıyaslandığında çok daha düşük reflektans ve iyileştirilmiş absorptans değerleri sergileyen GaAs nano sütunlar, güneş hücresi [11], LED [12] ve lazer [13] uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Nano boyuttaki GaAs yüzeylerin yanı sıra mikro boyutta işlenmiş GaAs yüzeylerinde pek çok optoelektronik ve fotonik aygıt tasarımında avantaj sağladığı görülmektedir. GaAs mikro disk yapılarının lazer uygulamalarında tercih edildiği söylenebilir. Küçük oyuk hacmi ve yüksek kalite faktörüne sahip olan mikro disk lazerler, kendiliğinden ışımaya olanak sağlama nedeniyle olarak fısıldayan galeri modları (whispering gallery modes) açısından büyük bir avantaj oluşturmaktadır [14]. Ayrıca mikro boyutta üçgen şeklinde aşındırılan GaAs'ın yüzeyine doğru gelen ışığı tuzaklayarak anti-yansıtıcı yüzey gibi davrandığı söylenebilir [15]. Yansıtıcılık özelliğinin azalması ile birlikte, mikro boyutta yarıklar ihtiva eden GaAs yüzeyler ile üretilen güneş hücrelerinin verimliliğinin arttığını gösteren pek çok çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde, düz ve mikro yarıklar içeren GaAs yüzeyleri ile üretilen güneş hücreleri kıyaslanmış ve GaAs yüzeyinde var olan yarıkların yüzey yansıtıcılığını azalttığı için güneş hücresinin kısa devre akımını %13 oranında artırdığı rapor edilmiştir [16].

Yarıiletken malzemelerin yüzeyinde mikro boyuttaki yarıklar odaklanmış iyon demeti litografisi, elektron demeti litografisi, lazer ablasyonu ve kimyasal aşındırma gibi farklı yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir [17-21]. Söz konusu bu yöntemlerin her birinin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin, yüksek homojenliğe sahip yüzey üretiminin sağlanabildiği litografi teknikleri uzun süreli çalışmalar ve yüksek maliyetli cihazlar gerektirmektedir. Lazer ablasyonu ve kimyasal aşındırma yöntemlerinde ise üretilen yüzey morfolojisini doğrudan etkileyen kontrol parametrelerinin sayısı oldukça azdır. Son yıllarda düşük maliyetli ve kontrol parametreleri açısından oldukça zengin olan elektrokimyasal aşındırma tekniği de yarıiletken yüzeylerde nano ve mikro yapılar oluşturulması için kullanılabilmektedir [22-24].

Yarıiletken yüzeyinde nano ve mikro boyutta yüzeyler oluşturulması, yarıiletken malzeme yüzeyindeki taşıyıcı rekombinasyon ömrünün (carrier recombination lifetime) değişmesine neden olur. Taşıyıcı (elektron-boşluk) rekombinasyon süresi, yarıiletken malzemeleri karakterize eden ve bu malzemeler ile üretilen optoelektronik aygıtların verimliliği hakkında bilgi verebilecek olan en önemli parametrelerden biridir. Taşıyıcı ömrünü belirlemek için mikrodalga yansıması ile geçici fotoiletkenlik (Transient Photoconductivity by Microwave Reflection) [25], yarı kararlı durum fotoiletkenlik (Quasi-Steady-State Photoconductivity) [26], rezonans bağlantılı fotoiletkenlik bozunma eğrisi (Resonant Coupled Photoconductivity Decay) [27], iletim modülasyonlu fotoiletkenlik bozunma eğrisi (Transmission Modulated Photoconductivity Decay) [28] ve zaman uyumlu foto ışımaya ölçümleri (Time resolved

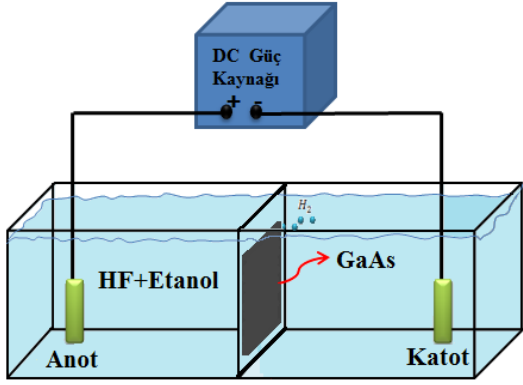
Photoluminescence) [29] gibi pek çok farklı yöntem kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada GaAs yarıiletken yüzeyinde çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile mikro boyutta yarıklar oluşturulmuştur. Bu yöntemin tercih edilmesinin nedenleri ise düşük maliyetli, oldukça hızlı ve çok fazla kontrol parametresine sahip olan bir yöntem olmasıdır. Akım yoğunluğu, aşındırma süresi ve aydınlatma kaynağı gibi kontrol parametrelerinin yüzeyde oluşan yarıkların genişliği, derinliği ve yarıklar arasındaki mesafeye etkisi incelenmiştir. Literatürde, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi aracılığıyla GaAs yarıiletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilebileceğini gösteren bir bilimsel çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmamız, doğrudan geçişli bir yarıiletken olan GaAs yüzeyinde hızlı ve basit bir şekilde homojen ve farklı boyutlarda mikro yarıklar üretilebileceğini ispatlayarak literatüre özgün bir katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, üretilen GaAs yüzeyler üzerindeki elektron-boşluk rekombinasyon süresi zaman uyumlu fotoışımaya tekniği ile incelenmiştir. Floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) ile GaAs yarıiletken yüzeyinin iki boyutlu yaşam ömrüne bağlı FLIM haritaları elde edilmiştir. Literatürde ilk kez, GaAs yüzey morfolojisinin yük taşıyıcıların rekombinasyon hızını nasıl değiştirdiği iki boyutlu FLIM haritaları kullanılarak belirlenmiştir. Yarıiletken yüzeylerde elektron-boşluk sürelerinin belirlenmesi, bu yarı iletken ile üretilen optoelektronik aygıtın performansı ve verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, bu çalışmamızdan elde edilen sonuçlar GaAs yarıiletken ile üretilen aygıt teknolojisi için önemli bir ön çalışma niteliğindedir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Elektrokimyasal aşındırma ile mikro yarıkların üretilmesi

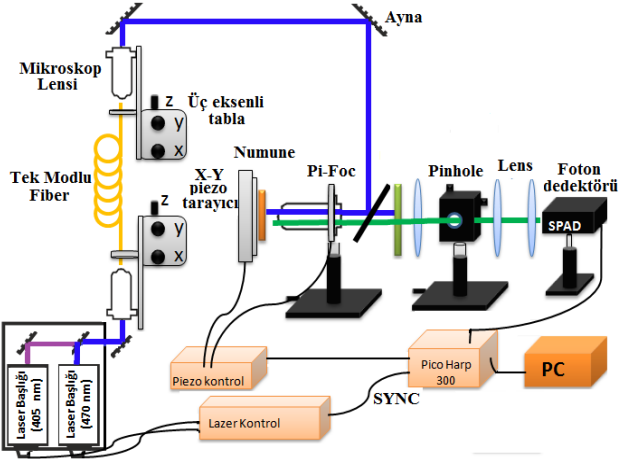
P-tipi (100) kristal yönelimli GaAs yüzeyindeki mikro yarıklar çift hücreli elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu yöntemde kullanılan deneysel düzenek Şekil 1'de verilmiştir. Aşındırma işlemi için yan yana yerleştirilmiş iki eşit asit hücresi kullanılır.  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  yüzey alanına sahip numuneler iki hücre arasında kalan yüzeye yerleştirilir. Hacimce (1:3) oranında HF ve Etanol ile hazırlanan elektrolit çözeltisinden her iki hücreye eşit miktarda konulur. Hücrelere özdeş platin elektrotlar yerleştirilir ve elektrotlardan biri güç kaynağının (-) kutbuna diğeri ise (+) kutbuna bağlanır. Elektrolit içeren asit hücreleri birbirinden izole edilmiştir. Bu nedenle, güç kaynağından sağlanan akım iki hücre arasındaki bölgeye yerleştirilen numunelerin üzerinden geçer ve elektriksel iletim numune üzerinden sağlanmış olur. Yarıiletken plaka yüzeyinde gerçekleşecek anodik çözünme yüzeyde bulunan pozitif yüklü boşlukların konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluk yoğunluğunu attırmak ve çözülmeye hızlandırmak için, elektrokimyasal aşındırma boyunca GaAs yarıiletkeninin yüzeyi bir ışık kaynağı ile aydınlatılabilir. Yarıiletken yüzeyinden geçen akım miktarı, aşındırma süresi ve aydınlatma kaynağının kullanımına göre, yarıiletken plaka yüzeyinde farklı boyutlarda mikro yarıklar oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma düzeneği

## 2.2 Floresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu

Elektron-boşluk rekombinasyon süresi ölçümlerinde zaman uyumlu tek foton sayma (Time-correlated single Photon Counting, TCSPC) tekniği kullanılmıştır. GaAs yarıiletken yüzeyindeki rekombinasyon süresi ölçümleri hem tek nokta ölçümleri ile hem de floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) aracılığıyla ard arda pek çok noktadan alınan verilerin birleştirilmesi ile yapılabilir. FLIM mikroskobu ile numune yüzeyinde seçilen özel bir bölgenin ışına şiddetine ve taşıyıcı yaşam ömrüne bağlı iki boyutlu yüzey haritaları elde edilebilmektedir. Ticari bir mikroskop kullanmaksızın çeşitli ayna, lens, filtreler ve foton sayma cihazları ile kurulan FLIM mikroskobunun şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. FLIM mikroskobunun deneysel düzeneği

FLIM mikroskobunda, dalga boyu 405 (Picoquant, LDH-C-D-405) ve 470 nm (Picoquant, LDH-C-D-470) olmak üzere iki farklı piko saniye atımlı darbeli lazer ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. Böylece, uyarılma spektrumları birbirinden farklı olan çok sayıda floresan malzeme ile çalışabilme olanağı sağlanmıştır. Geometrilere bağlı olarak yarıiletken malzemelerden üretilen darbeli lazerlerin sağladıkları ışın demeti elips şeklindedir. Mikroskop düzeneğinde kullanılacak ışın demetinin Gauss formunda olması gerekmektedir. Lazer ışını tek modlu bir fiber içinden geçirilerek kolayca elipsten Gauss ışını formuna dönüştürülebilir. Bu amaçla lazer çıkışına tek modlu fiber

(Thorlabs, PAF-X-11-PC-A) yerleştirilmiş ve lazer ışığının bu fiberden geçmesi sağlanmıştır. Elde edilen Gauss formundaki lazer ışınının yönlendirilmesi için ise çeşitli aynalar kullanılır. Numuneye lazer ışını yönlendiren son ayna olarak ise özel bir ayna olan iki renkli ayna (Thorlabs, Dichroic mirror MD-498) kullanılır. Bu özel aynanın iki ayrı işlevi bulunmaktadır. Birinci işlevi, ışığın geliş doğrultusuna göre 45°'lik açı ile konumlandırıldığında üzerine düşen lazer ışını düzlem ayna gibi davranarak numune üzerine yansıtmaktır. İkinci işlevi ise floresan malzeme üzerinde oluşan foto ışınımı içinden geçirerek foton dedektörüne kadar ulaşmasına imkân sağlamaktır. Büyütme oranı 100X olan bir mikroskop objektifi (Nikon, CFI L Plan Epi SLWD) numunenin hemen önüne yerleştirilir ve numuneye doğru gelen lazer ışını numune üzerine odaklanır. Düzeneğe eklenen objektifin odak uzaklığı (WD) 1 mm ve nümerik açıklığı (NA) 0.7'dir. Odak ayarının hassas bir şekilde yapılabilmesi için mikroskop objektifi z ekseninde nanometre mertebesinde hareket edebilen Pi-Foc (PI, P-721.CDA) piezo tabla üzerine yerleştirilmiştir. Maksimum odaklanma piezo tablanın SymphoTime bilgisayar programı kullanılarak hareket ettirilmesi ile sağlanır. Böylece, FLIM mikroskobunun çözünürlüğü iyileştirilmiş olur.

Numuneler iki boyutlu olarak maksimum 100X100µm genişliğinde tarama yapabilen ve bilgisayar programı ile nanometre mertebesinde kontrol edilebilen özel bir piezo tabla (PI, P-733.2CD) üzerine yerleştirilir. Bu özel tablanın yapısında, boyutları X ve Y eksenlerine uygulanan gerilim değerlerine bağlı olarak artıp azalabilen piezo elektrik malzemeler kullanılmaktadır. Numune piezo tabla üzerine yerleştirildikten sonra, kontrollü bir şekilde tablaya elektriksel gerilim uygulanarak numunenin konumu değiştirilebilir. Foton sayma cihazı (Picoquant, PicoHarp-300) ile piezo tabla arasındaki iletişim SymphoTime bilgisayar yazılımı (Picoquant, SymphoTime 64) sayesinde kurulabilmektedir. FLIM analizi yapılacak bölgenin yüzey alanı ve ölçüm yapılacak adım aralığı SymphoTime bilgisayar yazılımı ile kolayca ayarlanabilmektedir.

Numunenin yüzeyi lazer ile aydınlatıldığı zaman, aynı anda numune üzerindeki pek çok farklı düzlemde ışın meydana gelecektir. Net bir FLIM görüntüsü elde edilebilmesi için, odak düzlemi dışından gelen bu ışınların yok edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, FLIM mikroskobu konfokal bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Farklı düzlemlerden gelen görüntüyü bertaraf edebilmek ve mikroskop objektifinin ön odak düzleminde gelen sinyali ayırt edebilmek için objektifinin arka odak düzlemine üzerinde mikron mertebesinde dairesel açıklık bulunan soğurma filtresi (Thorlabs, P75S) yerleştirilmiştir.

Yüzey taraması ve FLIM analizi yapılacak bölge ilk olarak SymphoTime 64 programı ile çok küçük parçalara (piksel) ayrılır. Ayrılan piksellerin konum bilgileri piezo tablaya elektriksel gerilim olarak iletilir. Tarama başlatıldığında, ilk pikselde bulunan molekül lazer tarafından uyarılır ve oluşan ışımın şiddeti ile foton dedektörüne ulaşma süresi (yaşam ömrü) zaman uyumlu tek foton sayma tekniği ile ölçülür. FLIM mikroskobumuzda, fotonların tespiti için tek foton çığ dedektörü (MPD, SPAD) tercih edilmiştir. Foton dedektörüne ulaşan optik sinyal

öncelikle elektriksel bir sinyale dönüştürülür ve daha sonra tek foton sayma cihazına gönderilir. Farklı piksellerdeki moleküller de peş peşe uyarılır ve her bir moleküle ait konum bilgisi ile numune yüzeyinde oluşan fotonların detektöre varma süresi (lifetime) kaydedilir. Her bir piksel de ölçülen yaşam ömrü ve ışımaya şiddeti değerleri SymphoTime 64 programı ile 2 boyutlu bir FLIM resmi şeklinde birleştirilir. FLIM resimleri ile numune üzerinde her noktada ışımaya şiddeti ve yaşamömrü değerleri görsel olarak ifade edilmiş olur.

### 2.3 Yarıiletkenlerde rekombinasyon süreçleri ve taşıyıcı ömrünün hesaplanması

Bir yarıiletkeni uygun şiddete sahip bir ışık kaynağı ile uyardığımızda, yarıiletkenin değerlik bandında bulunan elektronlar kazandıkları ekstra enerjiyi kullanarak iletim bandına geçebilir. İletim bandında bir süre kalan elektron değerlik bandındaki bir boşluk ile birleşerek değerlik bandına geri döner. Yığımsal (bulk) haldeki yarıiletkenlerde elektron-boşluk rekombinasyon süreci üç farklı şekilde meydana gelebilmektedir. Bu süreçlerden birincisi *ışımali (radiative) rekombinasyon* sürecidir. Bu süreçte, iletim bandındaki elektron doğrudan değerlik bandına geçiş yapar ve boşluk ile birleşir. Süreç sonunda iletim ve değerlik seviyeleri aradaki enerji farkına karşılık bir foton yayınlanır. İkinci rekombinasyon süreci ise *Shockley-Read-Hall (SRH)* olarak adlandırılır. SRH sürecinde ise yarıiletkenin kristal yapısında bulunan kusurlar ve düzensizliklerin oluşturduğu yeni tuzak enerji seviyeleri (trap states) etkin rol oynar. Kusurlar tarafından oluşturulan bu tuzak enerji seviyeleri sayesinde yarıiletkenin mevcut enerji bant yapısı modifiye edilmiş olur ve elektron-boşluk çiftleri bu tuzak enerji seviyelerini kullanarak ışımaya yapmadan birleşebilirler. Enerji farkı ise madde içindeki fononlar aracılığı ile örgü titreşimlerine yani termal enerjiye dönüştürülür. Kristal içindeki kusur yoğunluğu arttıkça yeniden birleşim yaşam ömrü de kısalmır. Aynı zamanda, yarıiletkenin ön ve arka yüzey atomları iç kısımlarındaki diğer atomlar ile aynı bağ yapısına sahip değildir. Yüzeydeki atomların komşu bağlarında eksiklik vardır ve bu eksiklik yarıiletkenin yüzeyinde bağ kusurlarının oluşmasını sağlar. Bağ kusurlarının yoğunluğu nedeniyle yığımsal yarıiletkenlerin yüzeye yakın kısımlarında SRH rekombinasyon süreci daha baskın olarak gerçekleşir. Üçüncü elektron-boşluk rekombinasyon süreci ise *Auger*'dir. Işımsız bir süreç olarak nitelenen Auger rekombinasyon süreci gerçekte ışımali rekombinasyona benzer bir şekilde gerçekleşir. Ancak enerji farkının bir foton olarak yayınlanması yerine başka bir yük taşıyıcıya (elektron ya da boşluk) aktarılması söz konusudur. Bu yük taşıyıcı ise daha sonra termal olarak eski enerji seviyesine geri dönmektedir. Auger rekombinasyon süreci genellikle yüksek katkılanma oranına sahip (heavily doped) yarıiletkenlerde görülmektedir. Bu durumda yığımsal yarıiletkenler için etkin rekombinasyon yaşam ömrü ( $\tau_b$ ) **Denklem (1)**'de ki gibi yazılabilir [30-32].

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} \quad (1)$$

Burada  $\tau_{Rad}$ ,  $\tau_{SRH}$  ve  $\tau_{Aug}$  sırasıyla ışımali, *Shockley-Read-Hall* ve Auger rekombinasyon ömürlerini ifade etmektedir. Bir yarıiletkendeki uyarılan elektronun iletim bandında kalma süresi ya da elektronun-boşluk rekombinasyon yaşam ömrü (electron-hole recombination lifetime), bu yarıiletken ile tasarlanacak optoelektronik aygıtın verimliliği için önemli bir parametredir.

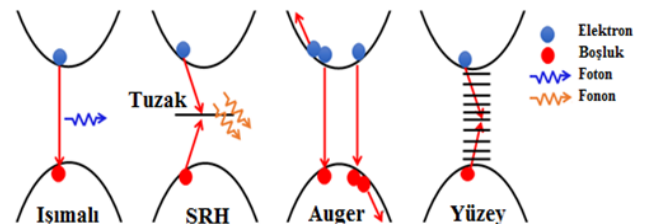
Elektron-boşluk rekombinasyon süresi yarıiletken yüzeyin boyutlarına bağlı olarak da değişkenlik gösterebilir. Özellikle nano yapıli yarıiletkenlerde yük taşıyıcıların difüzyon uzunluğu parçacık boyutu ile kıyaslanabilir olduğunda yüzey rekombinasyonlarının etkisi (surface recombination) ortaya çıkmaya başlar. Yarıiletken yüzeylerin nano ölçekteki boyutlarına bağlı olarak oluşan bu etki, yarıiletken içindeki yük taşıyıcıların oldukça küçük bir hacim içinde sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Kuantum sınırlama etkisinin bir sonucu olarak yarıiletken içinde yük taşıyıcıları tuzaklayan ve yeni elektron-boşluk birleşim merkezleri gibi davranan alt enerji seviyeleri oluşur. Bu yeni alt enerji seviyeleri elektron-boşluk rekombinasyon sürecinin kolaylaşmasını ve taşıyıcı ömrünün kısılmasını sağlayabilir. Alt enerji seviyelerinin oluşumunda yarıiletken nano yüzeyin yüzey/hacim oranı (surface-to-volume ratio) belirleyici rol oynar. Yüzey/hacim oranı azaldıkça enerji seviyelerinin yoğunluğu artar ve yüzey rekombinasyonlarının etkisi daha belirginleşir. Bu durumda nano yapıli yarıiletkenler de etkin taşıyıcı ömrü ( $\tau_{Etkin}$ ) **Denklem (2)**'de ki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\tau_{Etkin}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_s} \quad (2)$$

Burada  $\tau_s$  yüzey rekombinasyon ömrünü ifade etmektedir. Yüzey rekombinasyon oranı yarıiletken yüzeyin kalınlığı ( $d$ ) ve yüzey rekombinasyon hızına ( $S$ ) bağlı olarak değişir. Bu ilişki ise **Denklem (3)**'de verilmiştir [33]. Yarıiletken yüzeyin kalınlığı azaldıkça etkin taşıyıcı yaşam ömrü kısalmaktadır. Yarıiletkenlerde görülen farklı rekombinasyon süreçleri **Şekil 3**'te şematik olarak gösterilmiştir.

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2S}{d} \quad (3)$$

Bu çalışmada, GaAs yüzeylerinde oluşan mikro yapıların şekil ve boyutlarına bağlı olarak etkin taşıyıcı ömrünün nasıl değiştiği detaylı bir şekilde incelenmiştir.



**Şekil 3.** Yarıiletkenlerde elektron-boşluk rekombinasyon süreçleri

### 3 Bulgular ve tartışma

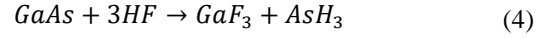
#### 3.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Bir yarıiletkenin asit ile etkileşime girmesi ve anodik çözünme sürecinin gerçekleşmesi için yarıiletken yüzeyinde yeterli miktarda pozitif yükün bulunması gerekmektedir. Yarıiletken yüzeyindeki boşlukların konsantrasyonuna bağlı olarak, asit ve yarıiletken ara yüzeyindeki atomlar çözünerek plakadan ayrılabilir. N-tipi yarıiletken malzemelerde baskın olan yük taşıyıcılar negatif yüklü elektronlardır. Bu tür yarıiletkenlerin anodik olarak çözünmesi için, yüzeydeki artı yüklü boşlukların sayısının çoğaltılması gerekir. Yarıiletken numunenin yüzeyinin uygun bir ışık kaynağı ile aydınlatılması yoluyla, yüzeydeki pozitif yük yoğunluğu kolayca artırılabilir. Fotonlara maruz bırakılan yarıiletken yüzeydeki atomların değerlik bandındaki elektronlar iletim bandına kolayca geçiş yapar ve geçiş yapan her elektron arkasında pozitif yüklü bir boşluk bırakır. Böylece, yarıiletken yüzeyindeki artı yüklerin konsantrasyonu giderek artar ve anodik çözünme koşulu sağlanmış olur. P-tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk yük taşıyıcılar boşluklardır. Bu nedenle yüzey aydınlatması yapılmadan da elektrokimyasal çözünme gerçekleşebilir. Bu çalışmada, p-tipi GaAs yarıiletken yüzeyler hacimce (1:3) oranında HF:Etanol ile hazırlanan asit çözeltisi içinde aşındırılmıştır. İlk olarak, karanlık bir ortamda farklı akım yoğunluklarının oluşacak yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. 15, 30 ve 45 mA/cm<sup>2</sup> olmak üzere üç farklı akım yoğunluğunda numuneler hazırlanmıştır. Karanlık bir ortamda 1 dk. süre ile aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri Şekil 4’de verilmiştir.

Anodik çözünme sürecinde en etkili parametrelerden biri akım yoğunluğudur. Öncelikle GaAs plaka iki özdeş hücre arasına yerleştirilip üzerinden 15 mA/cm<sup>2</sup> yoğunluğa sahip akım geçmesi sağlanmıştır. Şekil 4(a)’ya göre GaAs yüzeyinde çok az miktarda çözünme olmuştur. Akım yoğunluğunun iki katına çıkması (30 mA/cm<sup>2</sup>) durumunda ise çözünme oranının biraz daha fazla olduğu söylenebilir. Şekil 4(b)’de verilen SEM resminde düzenli bir yapı oluşumuna rastlanmamıştır. 45 mA/cm<sup>2</sup>’lik yüksek akım yoğunluğunda ise Şekil 4(c)’de görüldüğü gibi GaAs plaka yüzeyinde birbirine paralel mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe, yarıkların derinliği ve genişliği Image J programı kullanılarak belirlenmiştir. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.3 µm, yarık derinliği 180 nm ve yarık genişliği 270 nm olarak ölçülmüştür. Beklenildiği gibi, p-tipi GaAs plaka yüzeyinde herhangi bir yüzey

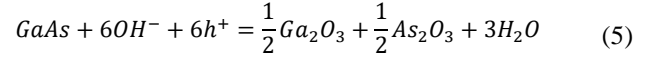
aydınlatılması yapılmadan anodik çözünme sağlanmış ve numune yüzeyinde homojen bir mikro yapı elde edilmiştir.

GaAs numuneler HF asit çözeltisi içine daldırıldığı zaman, ilk olarak senkron bağ değişim mekanizması aracılığı ile kimyasal çözünme başlar. Bu çözünme mekanizmasında Ga-As yüzey bağları birbirinden ayrılır ve ayrılan atomlar yeni Ga-F ve As-H bağlarını oluştururlar. Senkron bağ değişim mekanizması aşağıdaki kimyasal denklem ile verilir [34].

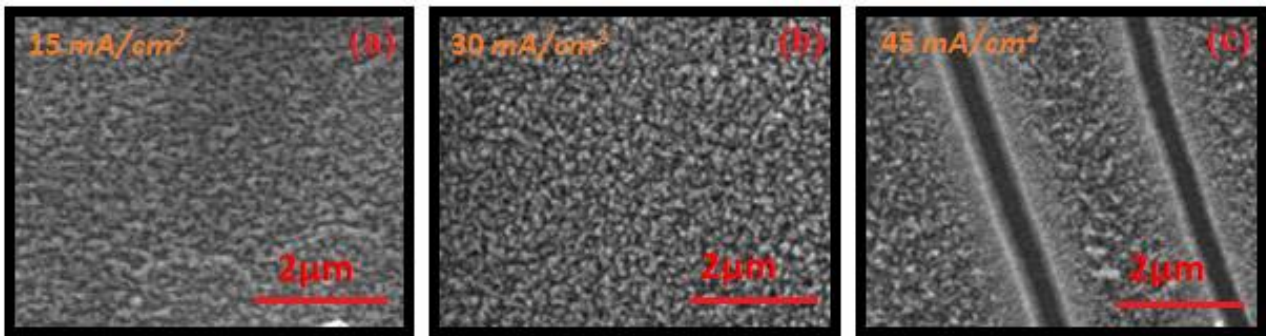


İkinci aşama ise yarıiletken yüzeyinden geçen akımın yol açtığı anodik çözünmedir. Bu aşamada asit çözeltisi içinde bulunan etanol ve yarıiletken içindeki boşluklar devreye girer. GaAs numune üzerinden geçen akım yarıiletken içindeki boşlukların yüzeye yakın bölgelerde birikmesini sağlar ve aşağıda verilen kimyasal reaksiyona göre yüzeydeki Ga ve As atomları anodik olarak çözünür. Bu sırada etanol oksitleyici bir ajan olarak davranır ve yüzeyde oksit bileşikleri de oluşabilir.

Anodik çözünme ile ilgili kimyasal reaksiyon ise Denklem (5)’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karanlık ortamda aşındırılan GaAs yüzeylerinde oksit oluşumuna rastlanmamıştır. 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğuna kadar yüzey aşınmasının başlamaması ve yüzeyde oksit oluşumuna rastlanmaması, yüzeydeki boşluk miktarının anodik çözünme reaksiyonunun gerçekleşmesi için yeterli olmadığının bir göstergesidir.

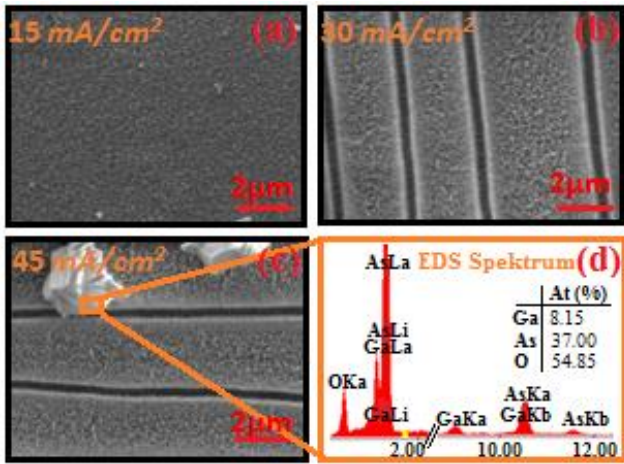


Anodik çözünme gerçekleşirken, yarıiletken yüzeyin kristal yönelimi de önem arz etmektedir. Bu çalışmada (100) kristal yönelimine sahip GaAs kullanılmıştır. Düşük aktivasyon enerjileri nedeniyle, (100) düzlemindeki atomların yüzeyden ayrılma oranı diğer düzlemlerdeki atomların ayrılma oranından daha fazladır [35]. Weber ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada GaAs yüzeyinde açılan yarıkların birbirine paralel olması, yarıiletkenin (100) olan kristal yönelimi ile ilişkilendirilmiştir [36]. HF asit çözeltisi içinde aşındırdığımız GaAs yüzeyinde birbirine paralel şekilde yerleşmiş mikro yarıkların oluşması literatürde verilen bilgiler ile uyum içindedir.



Şekil 4. Karanlıkta (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri

P-tipi yarıiletken yüzeyindeki boşluk konsantrasyonunu arttırmak ve mikro yapı oluşumunu biraz daha hızlandırmak için, yarıiletken yüzeyi halojen lamba ile aydınlatılmış ve özdeş elektrokimyasal aşındırma parametreleri kullanılarak yeni numuneler üretilmiştir. Halojen lamba ile 1 dk. boyunca 15, 30 ve 45 mA/cm<sup>2</sup> olacak şekilde üç farklı akım yoğunluğunda aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5(a)'da verilen SEM resmine göre, 15 mA/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğunun uygulanması durumunda yine GaAs yüzeyinde düzenli bir yapı oluşumu gerçekleşmemiştir. Akım yoğunluğunun 30 mA/cm<sup>2</sup> değerine artması durumunda ise Şekil 5(b)'de görüldüğü gibi yüzeyde mikro yarıkların oluşmuştur. Halojen lamba ile yüzeyin aydınlatılması, daha düşük akım yoğunluğunda mikro yarıklar elde edilmesine imkân sağlamıştır. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.0 µm, yarıkların derinliği 160 nm ve yarıkların genişliği 220 nm olarak ölçülmüştür. 45 mA/cm<sup>2</sup>'lik bir akım uygulandığında ise Şekil 5(c)'de görüleceği üzere, benzer mikro yarıklar tekrar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe aynı (2.0 µm) kalırken, yarıkların genişliği 175 nm'ye azalmış ve daha homojen bir yüzey elde edilmiştir. (100) kristal yönelimine sahip düzlemlerden kopan atomlar nedeniyle mikro yarıklar oluşur. Akım yoğunluğundaki artış anodik çözünmenin gerçekleştiği düzlemlerin sayısının artmasına ve dolayısıyla da daha homojen bir yüzey oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, akım yoğunluğuna bağlı olarak GaAs yüzeyinde mikro boyutta kristal yapıların oluştuğu da gözlemlenmiştir. Bu kristallerin kimyasal yapısının belirlenebilmesi için EDS spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Mikro kristallerin EDS spektrumu Şekil 5'te verilmiştir.



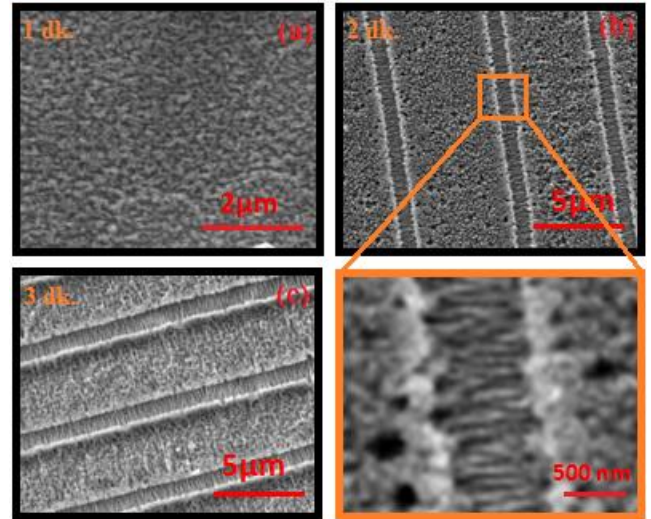
Şekil 5. Halojen lamba ile aydınlatılarak (a) 15, (b) 30 (c) 45 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda üretilen GaAs yüzeylerin SEM resimleri ve (d) mikro kristallerin EDS spektrumu

EDS spektrumunda sadece Ga, As ve O elementlerine ait pikler görülmüş ve bu elementlerin atomik yüzdeleri ise sırasıyla 8.15, 37.00 ve 54.85 olarak belirlenmiştir. Atomik yüzdeler karşılaştırıldığında mikro kristallerin yüksek oranda arsenik ve oksijen içerdiği açıkça görülmektedir. As ve O elementlerine ait atomik yüzdelerin oranı ise 0.67'dir. Bu

orana göre ilgili mikro kristallerin arsenik trioksit (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bileşik formuna sahip olduğu söylenebilir. Düşük miktardaki görülen Ga piki ise numunenin zemininden kaynaklanmaktadır. Elektrokimyasal aşındırma sürecine tabi tutulan GaAs yüzeyinde oksit bileşiklerinin oluşması olağan bir süreçtir. Smeenk ve arkadaşları, HF asit çözeltisi içinde aşındırılan GaAs yüzeyinde arsenik trioksit mikro kristallerinin oluştuğunu rapor etmiştir [37]. Halojen lamba ile aydınlatılan numunelerin yüzeyinde bu kristallere rastlanması ise, aydınlatma kaynağı kullanılmasıyla yüzeyde biriken boşluk konsantrasyonunu artırarak daha yüksek oranda anodik çözünme ve oksit oluşumuna neden olması ile açıklanabilir. Seyreltilmiş hidroklorik (HCl) asit kullanılarak yüzeyde oluşan bu As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mikro kristaller kolayca temizlenebilir.

### 3.2 Aşındırma süresinin etkisi

İkinci olarak ise aşındırma süresinin GaAs yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. Öncelikle karanlık bir ortamda 1, 2 ve 3 dk. olmak üzere üç farklı sürede elektrokimyasal aşındırma süreci gerçekleştirilmiştir. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 6'da özetlenmiştir.



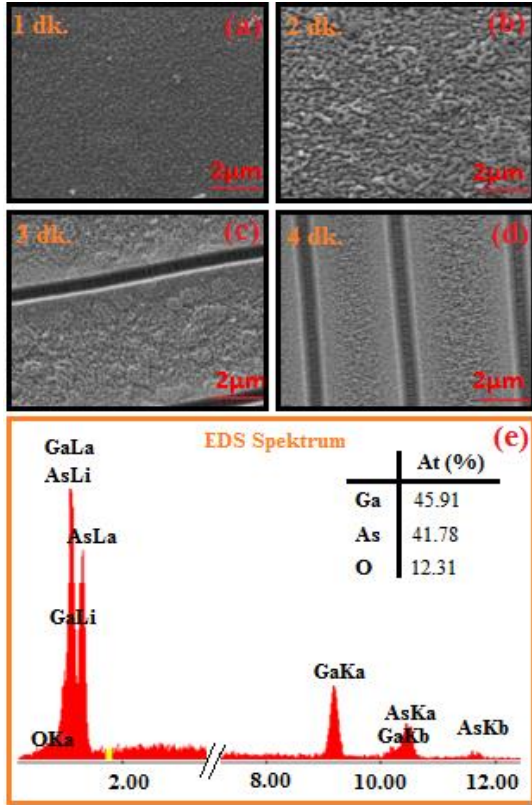
Şekil 6. Karanlık ortamda (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk süreyle aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri

Bütün numuneler hacimce (1:3) oranında HF:Etanol çözeltisi içine yerleştirilmiş ve 15 mA/cm<sup>2</sup> yoğunluğunda akım geçirilmiştir. Anodizasyon süresinin 1 dk. gibi kısa bir süre olarak ayarlanması durumunda, Şekil 6(a)'da görüldüğü üzere yüzeyde mikro yarıkların oluşumu gerçekleşmemiştir. GaAs yüzeyinin 2 dk. süre ile asit çözeltisi içinde aşındırılması durumunda ise Şekil 6(b)'de verilen SEM resminde yüzeyde mikro yarıkların oluştuğu görülmüştür. Yarıkların genişliğinin 800 nm'ye arttığı söylenebilir. SEM resimleri kullanılarak, mikro yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı (yarıkların derinliği) ise 70 nm olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda mikro yarıkların zemininde mikro yarıklara dik olarak yönelen ve genişliği 40 nm olan nano yarıklar oluşmuştur. Aşındırma süresinin 3 dk.'ya çıkarılması durumunda ise Şekil 6(c)'de görüldüğü üzere



yüzeyden kopan atom miktarı ve buna bağlı olarak mikro yarıkların genişliği artmıştır. Aynı zamanda yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı da 30 nm'ye kadar azalmıştır. SEM resimlerine göre yarıklar arasında kalan bölgenin genişliği ise 3.5  $\mu\text{m}$ 'dir. Bu numunenin Şekil 6(c)'de verilen SEM resminde, yarıklar arasındaki bölgelerin daha da aşındığı, nerdeyse yok olmaya başladığı ve altta kalan yeni yüzey morfolojisinin daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Yeni yüzey morfolojisi incelendiğinde birbirine yine paralel olarak dizilmiş nano boyutta yarıklar görülmektedir. Aşındırma süresinin biraz daha uzatılması halinde, bu bölgenin tamamen yok olacağı kesin bir şekilde söylenebilir. Uygun anodizasyon süresinde hazırlanan yüzeylerde mikro yarıklar içeren bir yapıdan nano yarıklar içeren bir yapıya geçiş yapılabileceği de görülmektedir.

Nano yarıklı GaAs yüzeylerin üretilmesinde genellikle ultra hızlı lazer ablasyonu ve iyon ışını bombardımanı teknikleri kullanılmaktadır [38, 39]. Yaptığımız bu çalışma, literatüre GaAs yüzeyinde nano yarıkların çok daha kolay bir şekilde üretilebilmesi için bir alternatif yöntem kazandırmış olacaktır. Nano yarıklar yarıletken yüzeyin yansıtıcılığını önemli ölçüde azaltır ve bu tür yüzeyler güneş hücreleri uygulamalarında daha yüksek verimlilik elde edilmesini sağlayabilir [40]. Aynı zamanda, periyodik yapıya sahip olan nano yarıklar LED uygulamalarında ışık ekstraksiyonunun iyileştirilmesine olanak verir [41]. Aktif yüzey alanının genişlemesi nedeniyle nano yarıklar içeren yüzeyler biyomoleküler sensör uygulamalarında da tercih edilmektedir [42,43].

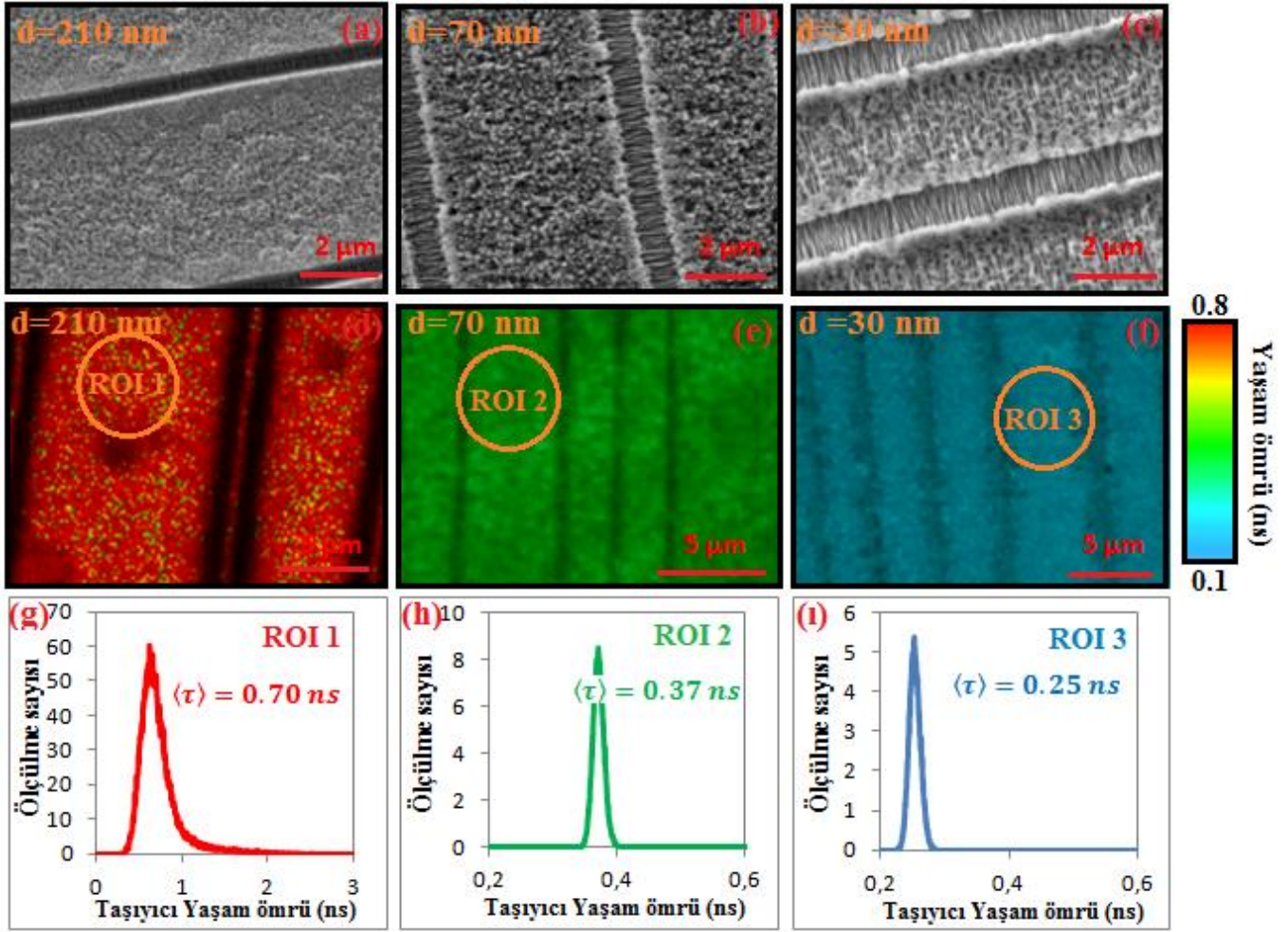


Şekil 7. Halojen lamba ile aydınlatılarak (a) 1, (b) 2, (c) 3 (d) 4 dk süreyle aşındırılan yüzeylerin SEM resimleri ve (e) yüzeyin EDS spektrumu

Aşındırma süresine bağlı olarak yapılan deneysel çalışmalarda yüzey aydınlatmasının anodik çözünme süreci üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Halojen lamba ile aydınlatılan numuneler 1, 2, 3 ve 4 dk olmak üzere dört farklı aşındırma süresi boyunca 15 mA/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunluğuna maruz bırakılmıştır. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri Şekil 7'de verilmiştir. Aşındırma süresinin 1 ve 2 dk olduğu numunelerin yüzeyinde Şekil 7(a) ve (b)'de görüldüğü üzere herhangi bir mikro yarıklar oluşumuna rastlanmamıştır. Aşındırma süresinin 3 dk.'ya çıkması durumunda ise Şekil 7(c)'de görüleceği gibi mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arası mesafe, yarıkların genişliği ve yarıkların derinliği sırasıyla 5  $\mu\text{m}$ , 330 nm ve 210 nm olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal aşındırma süresinin 4 dk.'ya uzatılması halinde ise Şekil 7(d)'ye göre yüzeyde benzer mikro yarıklar oluşmuştur. Ancak aşındırma süresindeki artış, yarıklar arasındaki mesafenin 3.2  $\mu\text{m}$ 'ye kadar azalmasına neden olmuştur. GaAs mikro yarıklar üzerinde de EDS analizi yapılmıştır. Şekil 7(e)'de görülen EDS spektrumuna göre yüzeyde atomik olarak %45.91 Ga, %41.78 As ve %12.31 oranında O elementi bulunmaktadır. Belirlenen atomik yüzdelere göre mikro yarıklar GaAs bileşik yapısına sahiptir.

### 3.3 Mikro yarıklar içeren yüzeylerde rekombinasyon süreci

GaAs yarıletken yüzeyinde birbirine paralel olarak sıralanmış mikro yarıkların iç kısımlarında ve yarıklar arasında kalan bölgelerde ki elektron-boşluk rekombinasyon süreleri zaman uyumlu tek foton sayma tekniğinin kullanıldığı FLIM mikroskobu ile incelenmiştir. Dalgaboyu 470 nm olan piko saniye atımlı lazer ile GaAs yüzeyler uyarılmış ve yüzeyde oluşan foto ışınım verileri FLIM mikroskobu ile kaydedilmiştir. Bu analizler yapılırken farklı yarıkların derinliğine sahip üç numune seçilmiştir. Şekil 8(a), (b) ve (c)'de yarıkların derinliği 210, 70 ve 30 nm olan numunelerin SEM resimleri ve Şekil 8(d), (e) ve (f)'de ise yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri verilmiştir. FLIM resimlerinde görülen renk kontrastı numune yüzeyindeki taşıyıcı yaşam ömrünü temsil etmektedir. FLIM resimleri için 0.1 ve 0.8 ns aralığında değişen renk skalası seçilmiştir. Numuneler üzerinden alınan FLIM resimlerinden en kalın GaAs yüzeyinin ağırlıklı olarak kırmızı (Şekil 8(d)), orta kalınlığa sahip GaAs yüzeyinin yeşil (Şekil 8(e)) ve en ince GaAs yüzeyinin mavi (Şekil 8(f)) renklere sahip olduğu görülmektedir. İlgili renk skalasına göre farklı kalınlıklara sahip GaAs yüzeylerde ki taşıyıcı yaşam ömrünün kalınlığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği söylenebilir. FLIM resimleri üzerindeki ağırlıklı taşıyıcı yaşam ömrünü belirlemek için yaşam ömrü histogramları kullanılabilir. Bu histogramlar numune yüzeyinde hangi yaşam ömrü değerinin kaç kez ölçüldüğü özetleyen grafiklerdir. Kalınlığı 210 nm olan numune yüzeyinden elde edilen histogramda Şekil 8(g)'de görüldüğü gibi pik değeri yaklaşık olarak 0.70 ns'dir. Başka bir deyişle numune yüzeyinde hakim olan taşıyıcı yaşam ömrü 0.70 ns'dir. Diğer numunelere ait histogramlar incelendiğinde ise, pik değerinin orta kalınlığa (70 nm) sahip numune yüzeyinde 0.37 ns (Şekil 8(h)) iken ince yüzeyde (30 nm) 0.25 ns (Şekil 8(i)) kadar düştüğü görülmektedir.



**Şekil 8.** Farklı kalınlıktaki mikro yarıkların (a), (b) ve (c) SEM resimleri, (d), (e) ve (f) yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri ve (g), (h) ve (i) seçilen ROI bölgelerindeki yaşam ömrü histogramları

Her bir yüzey için daha detaylı taşıyıcı yaşam ömrü analizi yapabilmek amacıyla ilgili FLIM resimleri üzerinde ROI (Region Of Interest) bölgeleri seçilmiştir. SymphoTime 64 programı yardımıyla ROI bölgelerindeki ortalama yaşam ömrü eğrileri tespit edilmiştir.

Yarıiletken yüzeylerden alınan ışımaya eğrileri oldukça hızlı bir şekilde azalan üstel fonksiyonlar olduğundan, yaşam ömrü analizi yapılırken bu eğriler iki ya da daha çok parçaya ayrılır. Işıma şiddeti [Denklem \(6\)](#)'te görüldüğü gibi çoklu-üstel (multi-exponential) bir fonksiyon ile verilir.

$$I(t) = \sum_i A_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (6)$$

Bu fonksiyonda,  $\tau_i$  her bir parçanın yaşam ömrünü ve  $A_i$  ilgili parçanın ışımaya genliğini ifade etmektedir. Çoklu üstel

modelin kullanıldığı bu analizler de genellikle iki farklı ortalama yaşam süresi hesaplanır. Bunlardan birincisi, şiddet ağırlıklı (Intensity weighed) ortalama yaşam ömrüdür ve [Denklem \(7\)](#) ile verilir.

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum_i A_i \tau_i^2}{\sum_j A_j \tau_j} \quad (7)$$

İkincisi ise genlik ağırlıklı (Amplitude weighed) ortalama yaşam ömrüdür ve [Denklem \(8\)](#) ile hesaplanabilir.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i A_i \tau_i}{\sum_i A_i} \quad (8)$$

**Tablo 1.** Farklı kalınlığa sahip GaAs yüzeylerde hesaplanan ışımaya eğrisi parametreleri

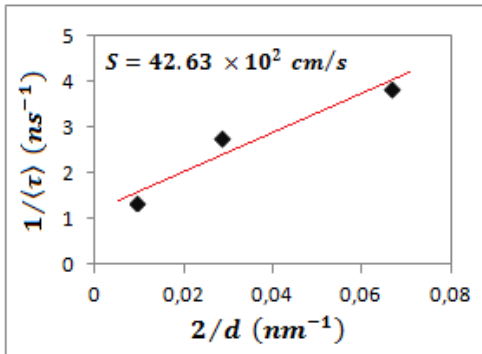
ROI	d (nm)	$A_1$ (kCounts)	$\tau_1$ (ns)	$A_2$ (kCounts)	$\tau_2$ (ns)	$\langle \tau \rangle$ (ns)	$\bar{\tau}$ (ns)	$\chi^2$
1	210	1.783	0.228	0.0915	1.880	0.720	0.309	1.448
2	70	1161	0.281	11.6	1.670	0.359	0.295	1.985
3	30	144.8	0.290	83.2	0.092	0.260	0.218	1.125

Yaşam ömrü hesaplarında, tanımlanan üstel fonksiyon ile gerçek ışına eğrisi arasındaki eşleşmeyi değerlendirmek üzere  $\chi^2$  parametresi tanımlanmıştır ve bu parametre minimize edilerek en iyi eşleşme sağlanır.

ROI bölgelerinden elde edilen ışına eğrileri çift üstel fonksiyonlar ile eşleştirilmiş ve ortalama taşıyıcı yaşam ömrü parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir. ROI analizlerinin ve yaşam ömrü histogramlarından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şiddet ağırlıklı ortalama yaşam ömrü değerleri kalınlıkları 210, 70 ve 30 nm olan numuneler için sırasıyla 0.720, 0.359 ve 0.260 ns olarak hesaplanmıştır. Mikro yarıkların derinliği azaldıkça yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı da buna bağlı olarak azalmaktadır. Yüzey kalınlığındaki değişime ise yüzey rekombinasyon oranlarını doğrudan etkilediği için GaAs yüzeyinde farklı taşıyıcı yaşam ömrü değerleri baskın hale gelmektedir.

Lush ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile farklı kalınlıklarda üretilen GaAs tabakalarda ki taşıyıcı rekombinasyon süresi zaman uyumlu fotoışına yöntemi ile incelenmiştir ve GaAs yüzeylerin kalınlığı azaldıkça rekombinasyon süresinin azaldığı tespit edilmiştir [44]. Aynı zamanda, GaAs ile üretilen hetero-bağlantılı güneş hücrelerinde tabakaların kalınlığına bağlı olarak rekombinasyon süresinin değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [45]. Bu durumda, etkin rekombinasyon süresinin GaAs mikro yarıkların kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermesinin literatürde gözlemlenen sonuçlar ile uyum için de olduğu söylenebilir.

Yarıiletken yüzeyin kalınlığının rekombinasyon oranı üzerindeki etkisi Denklem (2) ve Denklem (3)’te verilmiştir. Yığınsal haldeki GaAs yüzeyin rekombinasyon ömrünün sabit olduğu varsayılırsa, bu denklemlere göre  $\frac{1}{\tau_{Etkin}}$  ve  $\frac{2}{d}$  parametreleri arasında lineer bir ilişki olduğu düşünülebilir. Lineer ilişkinin çizilecek bir grafik ile analizi sonucunda ise hem yığınsal haldeki GaAs’ın rekombinasyon ömrü hem de yüzey rekombinasyon hızı (S) hesaplanabilir. Söz konusu  $\frac{1}{\tau_{Etkin}}$  ve  $\frac{2}{d}$  parametreleri arasındaki lineer ilişkiyi gösteren grafik Şekil 9’da verilmiştir. Grafiğin eğimi kullanılarak yüzey rekombinasyon hızı  $42.63 \times 10^2 \text{ cm/s}$  ve yığınsal haldeki GaAs yüzeyin rekombinasyon yaşam ömrü 0.83 ns olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Etkin taşıyıcı yaşam ömrü-kalınlık ilişkisi ve yüzey rekombinasyon hızının hesaplanması

Yüzey rekombinasyon hızı güneş hücrelerinin kısa devre akımını ve performansını doğrudan etkileyen parametrelerden biridir. Yarıiletken yüzeyinde rekombinasyon hızının yüksek olması, yük taşıyıcıların yüzeye yakın bölgelerdeki kusurlar aracılığıyla rekombine olmasına ve yarıiletken yüzeyinde kısa dalgaboyu aralığına karşı duyarsız olan ölü tabakaların oluşmasına eden olur [46]. Bu nedenle, rekombinasyon hızındaki artış kısa devre akımının azalması ve güneş hücresinin verimliliğinin düşmesi ile sonuçlanır [47]. Bey ve arkadaşları tarafından, GaAs güneş hücrelerinin elektriksel özellikleri ve yüzey rekombinasyon hızı arasındaki ilişkiyi inceleyen nümerik bir çalışma yapılmıştır [48]. Bu çalışmaya göre, GaAs güneş hücrelerinde en yüksek verimlilik yüzey rekombinasyon hızının  $10^2 \text{ cm/s}$  civarında olduğu yüzeylerde gözlemlenmiştir. Yığınsal haldeki GaAs yüzeyindeki rekombinasyon hızı ise  $10^5 \text{ cm/s}$  civarındadır [49]. GaAs yarıiletkeni ile verimliliği yüksek bir optoelektronik aygıt geliştirilmek isteniyorsa, yüzey rekombinasyon hızının düşürülmesi gerekmektedir. Yüzey rekombinasyon hızının azaltmak için uygulanan yöntemlerden biri, AlGaAs,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve GaN gibi geniş yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerin GaAs yüzeyinde epitaksiyel olarak büyütülmesidir [50-52]. İkinci yöntem ise çeşitli kimyasal uygulamalar ile GaAs yüzeyinin pasifleştirilmesidir. Örneğin; rutenyum iyonlarının GaAs yüzeyine kimyasal absorpsiyonu ile yüzeydeki rekombinasyon hızı  $10^4$  mertebesine düşürülebilmektedir [53]. Aynı zamanda sülfidasyon ya da nitridasyon işlemleri ile de GaAs yüzeyi pasifleştirilebilmekte ve yüzey rekombinasyonları en aza indirgenebilmektedir [54,55]. Bu çalışmamızda ise, HF asit çözeltisi içinde aşındırılan ve yüzeyinde mikro yarıklara oluşturulan GaAs üzerinde rekombinasyon hızı  $10^2 \text{ cm/s}$  mertebesine kadar düştüğü belirlenmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlar, üretilen bu GaAs yüzeylerin başta güneş hücreleri olmak üzere pek çok optoelektronik aygıt üretimi için ideal olduğu göstermektedir.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma tekniği kullanılarak yığınsal haldeki GaAs yarıiletken plakalar üzerinde homojen mikro yarıklar ihtiva eden yüzeyler üretilmiştir. Aşındırma sürecinde GaAs yüzeyinden geçirilen akımın yoğunluğunun, aşındırma süresinin ve yüzey aydınlatmasının oluşacak yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan akım yoğunluğu ve aşındırma süresi, yüzeyde oluşan paralel mikro yarıkların derinliğinin ve birbirlerine olan uzaklığının azalmasına neden olmuştur. Benzer şekilde aşındırma esnasında aydınlatma kaynağının kullanılmasının yüzey morfolojisini etkilediği görülmüştür. Üretilen GaAs yüzeyler FLIM mikroskobu ile görüntülenmiş ve yarıiletken yüzeydeki etkin rekombinasyon süreçleri irdelenmiştir. Mikro yarıkların derinliği azaldıkça, yüzey rekombinasyonlarının etkisinin daha belirginleştiği ve etkin rekombinasyon yaşam ömrü değerinin 0.25 ns civarına kadar düştüğü görülmüştür. GaAs tabakanın kalınlığı ve etkin taşıyıcı yaşam ömrü arasındaki lineer ilişki vasıtasıyla, yığınsal GaAs yüzeyin

rekombinasyon oranı ve mikro yarıklar üzerindeki yük taşıyıcıların yüzey rekombinasyon hızı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, GaAs mikro yarıklar ile üretilebilecek pek çok optoelektronik aygıtlar için ön çalışma niteliğindedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114F451 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %4

#### Kaynaklar

- [1] V.V. Vainberg, A.S. Pylypchuk, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov, Electron mobility in the GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 16(2), 152-161, 2013. <https://doi.org/10.15407/spqeo16.02.152>
- [2] S. Kundu, A. Kumar, S. Banerjee, P. Banerji, Electrical properties and barrier modification of GaAs MIS Schottky device based on MEH-PPV organic interfacial layer, *Mat. Sci. Semicon. Proc.* 15, 386-392, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2012.01.001>
- [3] D. Saxena, S. Mokkapatil, P. Parkinson, N. Jiang, Q. Gao, H.H. Tan, C. Jagadish, Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers, *Nature Photonics* 7, 963-968, 2013. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2013.303>
- [4] D. Jung, J. Faucher, R. Biswas, L. Shen, D. Kang, M.L. Lee, J. Yoon, High performance ultrathin GaAs solar cells enabled with heterogeneously integrated dielectric periodic nanostructures, *ACS Nano* 9(10), 10356-10365, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b05585>
- [5] J. Wu, D. Shao, V.G. Drogan, A.Z. Li, S. Li, E.A. DeCuir, M.O. Manasreh, Z.M. Wang, Y.I. Mazur and G.J. Salamo, Intersublevel infrared photodetector with strain-free GaAs quantum dot pairs grown by high-temperature droplet epitaxy, *Nano Lett.* 10, 1512-1516, 2010. <https://doi.org/10.1021/nl100217k>
- [6] R.J. Warburton, Single spins in self-assembled quantum dots, *Nature Matter.* 12, 483-493, 2013.
- [7] R.P.G. McNeil, M. Kataoka, C.J.B. Ford, C.H.W. Barnes, D. Anderson, G.A.C. Jones, I. Farrer and D.A. Ritchie, On-demand single-electron transfer between distant quantum dots, *Nature* 477, 439-442, 2011.
- [8] M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, A.A. Padelitsa, T.A. Bagaev, A.Yu. Andreev, K.Yu. Telegin, A.V. Lobintsov, E.I. Davydova, S.M. Sapozhnikov, A.I. Danilov, A.V. Podkopaev, E.B. Ivanova, V.A. Simakov, Laser diode bars based on AlGaAs/GaAs quantum-well heterostructures with an efficiency up to 70%, *Quantum Electronics* 47(4), 291-293, 2017. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16365>
- [9] S. Chen, W. Li, Z. Zhang, D. Childs, K. Zhou, J. Orchard, K. Kennedy, M. Hugues, E. Clarke, I. Ross, O. Wada and R. Hogg, GaAs-Based Superluminescent Light-Emitting Diodes with 290-nm Emission Bandwidth by Using Hybrid Quantum Well/Quantum Dot Structures, *Nanoscale Research Letters* 10, 340, 2015. <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1049-2>
- [10] N. Han, Z. Yang, F. Wang, G. Dong, S. Yip, X. Liang, T.F. Hung, Y. Chen, and J.C. Ho, High-Performance GaAs Nanowire Solar Cells for Flexible and Transparent Photovoltaics, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 20454-20459, 2015. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b06452>
- [11] R. Sanatnia, K.M. Awan, S. Naureen, N. Anttu, E. Ebraert, and S. Anand, GaAs nanopillar arrays with suppressed broadband reflectance and high optical quality for photovoltaic applications, *Opt. Mater. Express* 2(11), 1671-1679, 2012. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001671>
- [12] P.K. Mohseni, S.H. Kim, X. Zhao, K. Balasundaram and J.D. Kim, GaAs pillar array-based light emitting diodes fabricated by metal-assisted chemical etching, *J. Appl. Phys.* 114, 064909, 2013. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4817424>
- [13] C. Kong, J.W. Leem, J.W. Lee, J.S. Yu and C.S. Kee, Characteristics of terahertz pulses from antireflective GaAs surfaces with nanopillars, *J. Appl. Phys.* 113, 203102, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4807407>
- [14] K.J. Luo, J.Y. Xu, H. Cao, Y. Ma, S.H. Chang, S.T. Ho and G.S. Solomon, Dynamics of GaAs/AlGaAs microdisk lasers, *Appl. Phys. Lett.* 77(15), 2304-2306, 2000. <https://doi.org/10.1063/1.1317544>
- [15] K. Kim, Y. Song and J. Oh, Nano/micro dual-textured antireflective subwavelength structures in anisotropically etched GaAs, *Optics Letters* 42(16), 3105-3108, 2017. <https://doi.org/10.1364/OL.42.003105>
- [16] S.G. Bailey, N.S. Fatemi, G.R. Landis, D.M. Wilt, R.D. Thomas and A. Arrison, A v-grooved GaAs solar cell, *Conference Record of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 625-628, 1988. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1988.105778>
- [17] M. Komuro, H. Hiroshima, H. Tanou and T. Kanayama, Maskless etching of a nanometer structure by focused ion beams, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1 (4), 985-989, 1983. <https://doi.org/10.1116/1.582719>
- [18] M.A. Al-Gawati, A.N. Alhazaa, A. N. Alodhayb, H.A. Albrithen, M.A. Shar, Z.A. Almutairi, Controlling the fabrication of sub-microgrooves on a silicon surface using a femtosecond laser, *Journal of King Saud University Science* 33, 101251- 101257, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101251>
- [19] J. Wang, D.A. Thompson and J.G. Simmons, Wet chemical etching for V-grooves into InP substrates, *J. Electrochem. Soc.* 145, 2931-2937, 1998.
- [20] V. Khuat, Y.C. Ma, J.H. Si, T. Chen, F. Chen and X. Hou, Fabrication of micro-grooves in silicon carbide using femtosecond laser irradiation and acid etching, *Chin. Phys. Lett.* 31, 037901- 037904, 2014.
- [21] A. Pan, J. Si, T. Chen, Y. Ma, F. Chen and X. Hou, Fabrication of high-aspect-ratio grooves in silicon using femtosecond laser irradiation and oxygen-

- dependent acid etching, *Optics Express* 21, 16657-16662, 2013. <https://doi.org/10.1364/OE.21.016657>
- [22] S. Acikgoz, H. Yungevis, E. Özunal and A. Şahin, Low-cost, fast and easy production of germanium nanostructures and interfacial electron transfer dynamics of BODIPY–germanium nanostructure system, *J Mater. Sci.* 52, 13149-13162, 2017.
- [23] K. Yamada, M. Yamada, H. Maki and K.M. Itoh, Fabrication of arrays of tapered silicon micro-/nanopillars by metal-assisted chemical etching and anisotropic wet etching, *Nanotechnology* 29(28), 28LT01, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aac04b>
- [24] M. DeJarld, J.C. Shin, W. Chern, D. Chanda, K. Balasundaram, J. A. Rogers and X. Li, Formation of High Aspect Ratio GaAs Nanostructures with Metal-Assisted Chemical Etching, *Nano Lett.* 11, 5259-5263, 2011. <https://doi.org/10.1021/nl202708d>
- [25] R.K. Ahrenkiel and S.W. Johnston, Lifetime analysis of silicon solar cells by microwave reflection, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92, 830-835, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.01.022>
- [26] K. M. W. Boyd and R. N. Kleiman, Quasi-Steady-State Free Carrier Absorption Measurements of Effective Carrier Lifetime in Silicon, *IEEE Journal of Photovoltaics* 9(1), 64-71, 2019. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2874973>.
- [27] R.K. Ahrenkiel, Resonant coupling for contactless measurement of carrier lifetime, *Journal of Vacuum Science & Technology B* 31, 04D113, (2013). <http://dx.doi.org/10.1116/1.4813757>
- [28] B. J. Simonds, B. Yan, G. Yue, R. K. Ahrenkiel and P. C. Taylor, Generation rate dependence of carrier lifetime measurements in nanocrystalline silicon using transmission modulated photoconductive decay, *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 003743-003747, 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2010.5616574>
- [29] B. Julsgaard, N. Driesch, P.T. Lichtenberg, C. Pedersen, Z. Ikonik, and D. Buca, Carrier lifetime of GeSn measured by spectrally resolved picosecond photoluminescence spectroscopy, *Photon. Res.* 8, 788-798, 2020. <https://doi.org/10.1364/PRJ.385096>
- [30] T. P. Weiss, B. Bissig, T. Feurer, R. Carron, S. Buecheler and A.N. Tiwari, Bulk and surface recombination properties in thin film semiconductors with different surface treatments from time resolved photoluminescence measurements, *Scientific Reports* 9, 5385, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41716-x>
- [31] R. Hidayat, A.A.Nurunnizar, A. Fariz, E.S. Rosa, T. Oizumi, A. Fujii, M. Ozaki, Revealing the charge carrier kinetics in perovskite solar cells affected by mesoscopic structures and defect states from simple transient photovoltage measurements, *Scientific Reports* 10, 19197, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74603-x>
- [32] S. Gupta, R. Sircar, D. Prakash and B. Tripathi, Optimization of recombination parameters to enhance minority carrier lifetime, *International Journal of Pure and Applied Physics* 5(2), 133–141, 2009.
- [33] X.H. Zhao, M.J. Dinezza, S. Liu, C.M. Campbell, Y. Zhao and Y.H. Zhang, Determination of CdTe bulk carrier lifetime and interface recombination velocity of CdTe/MgCdTe double heterostructures grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.* 105, 252101, (2014). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4904993>
- [34] Y.A. Bioud, A. Boucherif, A. Belarouci, E. Paradis, D. Drouin, R. Ares, Chemical Composition of Nanoporous Layer Formed by Electrochemical Etching of p-Type GaAs, *Nanoscale Res. Lett.* 11, 446, 2016. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1642-z>
- [35] W. Chen, Y. Liu, L. Yang, J. Wu, Q. Chen, Y. Zhao, Y. Wang and X. Du, Difference in anisotropic etching characteristics of alkaline and copper based acid solutions for single-crystalline Si, *Scientific Reports* 8, 3408, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21877-x>
- [36] Z.L. Weber, A. Claverie, J. Washburn, F. Smith and R. Calawa, Microstructure of Annealed Low-Temperature-Grown GaAs Layers, *Appl. Phys. A* 53, 141-146, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00323874>
- [37] N.J. Smeenk, J. Engel, P. Mulder, G.J. Bauhuis, G.M.M.W. Bissels, J.J. Schermer, E. Vlieg, and J.J. Kellyb, Arsenic Formation on GaAs during Etching in HF Solutions: Relevance for the Epitaxial Lift-Off Process, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2 (3) 58-65, 2013.
- [38] A. Borowieca and H.K. Haugen, Subwavelength ripple formation on the surfaces of compound semiconductors irradiated with femtosecond laser pulses, *Appl. Phys. Lett.* 82, 4462-4464, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1586457>
- [39] T. Kumar, M. Kumar, S. Verma and D. Kanjilal, Fabrication of ordered ripple patterns on GaAs(100) surface using 60 keV Arz beam irradiation, *Surface Engineering* 29(7), 543, 2013. <https://doi.org/10.1179/1743294413Y.0000000146>
- [40] L. Hong, Rusli, X.C. Wang, H.Y. Zheng, H. Wang, H.Y. Yu, Femtosecond laser fabrication of large-area periodic surface ripple structure on Si substrate, *Applied Surface Science* 297, 134-138, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.100>
- [41] Q. Liu, Z. Wang, L. Zhu, X. Cheng, J. Wang, Nanogrooves etching on top of GaN-LED for light extraction enhancement, *Optics and Laser Technology* 138, 106842, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106842>
- [42] I. Saleem, W.K. Chu, Gold nano-ripple structure with potential for bio molecular sensing applications, *Sensing and Bio-Sensing Research* 11, 14-19, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbsr.2016.09.004>
- [43] R. DellAnna, C. Masciullo, E. Iacob, M. Barozzi, D. Giubertoni, R. Böttger, M. Cecchini and G. Pepponi, Multiscale structured germanium nanoripples as templates for bioactive surfaces, *RSC Adv.* 7, 9024-9030, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6RA28531G>

- [44] G.B. Lush, H.F. MacMillan, B.M. Keyes, D.H. Levi, M.R. Melloch, R.K. Ahrenkiel, M.S. Lundstrom, A study of minority carrier lifetime versus doping concentration in n-type GaAs grown by metalorganic chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.* 72 (4), 1436-1442, 1992. <http://dx.doi.org/10.1063/1.351704>
- [45] R.R. King, J.H. Ermer, D.E. Joslin, M. Haddad, J.W. Eldredge, N.H. Karam, B. Keyes and R.K. Ahrenkiel, Double heterostructures for characterization of bulk lifetime and interface recombination velocity in III-V multijunction solar cells, *Proceedings of the 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 86-90, 1998.
- [46] K. Ali, H.M. Khan, M. Anmal, I.A. Ahmad, W.A. Farooq, B.A. Al-Asabi, S.M. Qaid, H.M. Ghathan, Effect of surface recombination velocity (SRV) on the efficiency of silicon solar cells, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* 22, 251-255, 2020.
- [47] E. Chahid, M.I. Oumhand, M. Feddaoui, A. Malaoui, Study of the physical parameters on the GaAs Solar Cell Efficiency, *Journal of Ovonic Research* 13, 119-128, 2017.
- [48] A.B. Bey, A. Talbi, M. Hebali, M. Berka, F. Ducroquet, Numerical Study of the Impact of Junction Depth and the Surface Recombination Velocity on Electrical Parameters of GaAs-Solar Cell, *Int. J. Adv. Sci. Eng.* 5(3), 1064-1071, 2019.
- [49] N.L. Dmitruk, V.I. Lyashenko, A.K. Tereshenko, S.A. Spektor, Investigation of surface recombination on epitaxial GaAs films, *Phys. Stat. Sol. (A)* 20, 53-62, 1973. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210200103>
- [50] A. Aierken, J. Riikonen, M. Mattila, T. Hakkarainen, M. Sopanen, H. Lipsanen, GaAs Surface Passivation by Ultra-Thin Epitaxial GaP Layer and Surface As-P Exchange. *Appl. Surf. Sci.* 253, 6232-6235, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.01.069>
- [51] N.M. Kumar, A. Chikhalkar, R.R. King, Effect of Deposited Passivation Materials and Doping on Recombination at III-V Surfaces, *IEEE Photovolt. Spec. Conf.* 1039-1043, 2019. <https://doi.org/10.1109/pvsc40753.2019.8980913S>
- [52] Anantathanasarn, S.Y. Otomo, T. Hashizume and H. Hasegawa, Surface Passivation of GaAs by Ultra-Thin Cubic GaN Layer, *Appl. Surf. Sci.* 159-160, 456-461, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00077-5)
- [53] R.J. Nelson, J.S. Williams, H.J. Leamy, B. Miller, H.C. Casey, B.A. Parkinson, and A. Heller, Reduction of GaAs surface recombination velocity by chemical treatment, *Applied Physics Letters* 36, 76-79, 1980. <http://dx.doi.org/10.1063/1.91280>
- [54] V.L. Berkovits, V.P. Ulin, M. Losurdo, P. Capezzuto, G. Bruno, Wet Chemical Treatment in Hydrazine-Sulfide Solutions for Sulfide and Nitride Monomolecular Surface Films on GaAs(100), *J. Electrochem. Soc.* 152, 349-353, 2005. <https://doi.org/10.1149/1.1878032>
- [55] X. Zou, C. Li, X. Su, Y. Liu, D. F. Shapiro, W. Zhang, and A. Yartsev, Carrier Recombination Processes in GaAs Wafers Passivated by Wet Nitridation, *ACS Applied Materials & Interfaces* 12(25), 28360-28367, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04892>

