

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 12 Sayı: 2 2023
Volume: 12 Issue: 2 2023



www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi
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 Dekanı, Türkiye/
Niğde Ömer Halisdemir University, Dean of Engineering Faculty, Türkiye**

Baş Editör/Editor-in-Chief

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

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

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

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

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

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

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Ahmet Şakir Dokuz,

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



Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Adnan Görür

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

Prof. Dr. Metin Yıldırım

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

Prof. Dr. Murat Gökçek

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

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

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

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Türkiye*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Türkiye*

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Türkiye*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Türkiye*

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, Türkiye*

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
Doç. Dr. 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. 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
Doç. Dr. Arzum Büyükkeklik	Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering
Doç. Dr. Andaç Batur Çolak	Makine Mühendisliği Mechanical 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. Ayşe Erdoğan	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Arş. Gör. Kemal Ulusoy	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Arş. Gör. Mehmet Yetişen	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>

İngilizce Dil Editörleri/English Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. 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

Prof. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil 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/Türkiye

E-posta/E-mail: 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

Türkçe sosyal medya mesajlarından kullanıcıların yaş ve cinsiyetini tahmin etme

Predicting users age and gender using Turkish social media messages

Mustafa Kaan Görgün, Gökçe Başak Demirok, Mücahid Kutlu

325-333

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı

Rainwater harvesting in solar power plant

Seçil Uysal, Melih Soner Çeliktaş

334-342

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Afyon Kocatepe Üniversitesi enerji dağıtım hattının optimizasyon yöntemleri ile tasarlanması

Designing Afyon Kocatepe University energy distribution line with optimization methods

Enes Yıldız, Fatih Onur Hocaoğlu

343-348

Araştırma Makalesi/Research Article

Kompleks düzlemde büyük-ölçekli regresyon: Bilgilendirici olmayan verileri çevrimiçi olarak sansürleyen CRLS algoritmalarının başarımlarının analizi

Large-scale regression in the complex domain: Performance analysis of CRLS algorithms censoring noninformative data in an online manner

Engin Cemal Mengüç

349-359

Research Article/Araştırma Makalesi

Analysis of fault ride through the improvement of PV power plant based on artificial neural network

Yapay sinir ağına dayalı bir FV güç santralinin arızaların iyileştirilmesi yoluyla analizi

Altan Gencer

360-366



Research Article/Araştırma Makalesi

Particle swarm optimization based design of a terahertz antenna with a modified photonic band gap substrate for 6G future wireless communications

6G geleceğin kablosuz iletişimi için modifiye fotonik bant boşluğu substratına sahip bir terahertz antenin parçacık sürü optimizasyonu temelli tasarımı

Tayfun Okan, Seda Habergötüren Ateş, Nursel Akçam

367-375

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

A mathematical model for vaccine cold chain network design considering social sustainability

Sosyal sürdürülebilirlik kapsamında aşı soğuk zincir ağ tasarımı için matematiksel model önerisi

Nur Hivda Yıldız, Nadide Aktaş, Neslihan Demirel

376-385

Derleme Makalesi/Review Article

Sürdürülebilir yeşil bir kalkınma için salınan karbonun yakalanması, depolanması ve kullanımına yönelik bir araştırma

A research on capture, storage and utilization of released carbon for a sustainable green development

Sena Kumcu, Bahar Özyörük

386-394

Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Derleme Makalesi/Review Article

Gıda kaynaklı protein ve biyoaktif peptit eldesi, saflaştırılması ve karakterizasyonunda kullanılan güncel yöntemler ve biyoinformatik yaklaşımlar

Current methods used in the production, purification and characterization of food-derived proteins and bioactive peptides and bioinformatics approaches

Canan Kartal, Bahar Bakar, Burcu Kaplan Türköz, Semih Ötleş

395-407

Araştırma Makalesi/Research Article

Kullanıma hazır suda çözünabilir keçiyoynuzu kabuğu tozu üretiminin yanıt yüzey yöntemi ile çift aşamalı optimizasyonu

Dual optimization for instant soluble carob pod powder production by response surface method

**Mehmet Şükrü Karakuş, Merve Akalan, Melike Yücestepe, Kamile Bayrak Akay,
Asliye Karaaslan, Bülent Başyigit, Mehmet Karaaslan**

408-419



Harita Mühendisliği / Geomatic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Antarktika'da mevcut araştırma istasyonları kapsamında yenilenebilir enerji potansiyeli ve Türk Araştırma Üssü özelinde bir ön inceleme

Renewable energy potential within the scope of existing research stations in Antarctica and a preliminary study on the Turkish Research Base

Şehriban Yiğit, Mehmet İşiler, Tolga Bakırman, Mahmut Oğuz Selbesoğlu

420-431

Research Article/Araştırma Makalesi

A statistical investigation on the effects of different GNSS systems

Farklı GNSS sistemlerinin etkileri üzerine istatistiksel bir araştırma

Kutalmış Gümüş, Cahit Tağı Çelik, Münevver Gizem Gümüş

432-442

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

İnce taneli zeminlerin kayma dayanım parametrelerinin drenajlı deneylerle belirlenmesi

Determination of shear strength parameters of fine grained soils by drained tests

Hatice Seray Zedeli, Hasan Savaş

443-451

Araştırma Makalesi/Research Article

Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ile uçucu kül ve cüruf esaslı tasarlanmış geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri

Mechanical and microstructural properties of engineered cementitious composite with fly ash and slag-based engineered geopolymer composites

Hatice Öznur Öz, Muhammet Güneş

452-471

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı performans metriklerinin buharlaşma modellemesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of different performance metrics on evaporation modeling

Volkan Yılmaz

472-486

Araştırma Makalesi/Research Article

Karayolu - demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığını etkileme seviyeleri

Human health impact levels of vibration exposure at highway - railroad level crossings

Ufuk Kırbaş, Mustafa Karaşahin

487-500



Araştırma Makalesi/Research Article

Sargısız betonun mekanik özelliklerinin TBDY 2018 ve diğer modellerle analitik ve deneysel karşılaştırılması

Analytical and experimental comparison of mechanical properties of unconfined concrete with TBDY 2018 and other models

Hürmet Küçükgöncü

501-513

Jeoloji Mühendisliği / Geological Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Tüf katkılı yüksek plastisiteli killerde kıvam limitleri ve şişme potansiyeli ilişkisi

Consistency limits and swelling potential relationship in tuff added high plasticity clays

Yasemin Aslan Topçuoğlu, Zülfü Gürocak

514-524

Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering

Derleme Makalesi/Review Article

D vitamini ve tespitine yönelik geliştirilen elektrokimyasal biyosensörler

Vitamin D and enhanced efficient electrochemical biosensors

Mervenur Kirazoğlu, Birgül Benli

525-537

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Havadan-havaya ısı geri kazanımında levhalı ısı değiştirici akış düzenlemesinin sayısal incelenmesi ve karşılaştırılması

Numerical investigation and comparison of plate heat exchanger flow arrangement in air-to-air heat recovery

Murat Ünverdi, Hasan Küçük

538-550

Araştırma Makalesi/Research Article

Dizel yakıtı-bitkisel yağ-dietilen glikol dimetil eter karışım yakıtlarının bir dizel motorun performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi

An investigation of effects of diesel fuel-vegetable oil-diethylene glycol dimethyl ether fuel blends on performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine

Mert Gülüm

551-565



Araştırma Makalesi/Research Article

NACA6412 uçak kanadının aerodinamik parametrelerinin araştırılması

Investigation of aerodynamic parameters of NACA6412 aircraft wing

Mustafa Başekin, Ramazan Selver

566-580

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı girdap üreteçlere sahip bir aracın aerodinamiğinin sayısal incelenmesi

Numerical investigation of aerodynamic of a car with various vortex generators

Onur Yemenici, Halit Kasap

581-587

Research Article/Araştırma Makalesi

Effects of multi walled carbon nanotube and silicon carbide reinforcement on wear performance in zinc-aluminium alloys

Çinko-alüminyum alaşımlarda karbon nanotüp ve silisyum karbür takviyesinin aşınma performansına olan etkisinin incelenmesi

Emre Deniz Yalçın, Aykut Çanakçı

588-596

Araştırma Makalesi/Research Article

Kalıpcılıkta kullanılan soğuk iş takım çeliklerinin karşılaştırmalı performans analizi

Comparative performance analysis of cold work tool steels used in mold industry

Aslan Ünal, Mehmet Masum Tünçay, Mustafa Kelami Şeşen, Oğuz Girit

597-603

Malzeme ve Metalürji Mühendisliği / Materials and Metallurgical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Etial 180 alaşımına ilave edilen bakırın mikroyapı, sertlik ve korozyon üzerindeki etkisi

Effect of copper addition to Etial 180 alloy on microstructure, hardness and corrosion

Engin Kocaman, Erhan Baysal, Oğuz Koçar, Ahmet Serdar Güldibi, Selçuk Şirin

604-611

Diğer / Other

Araştırma Makalesi/Research Article

Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleri ile oluşturulması

Creation of sinkhole susceptibility map using Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP) methods in Aksaray province

Süleyman Sefa Bilgilioğlu, Hacer Bilgilioğlu

612-625



Research Article/*Araştırma Makalesi*

Spatio-temporal change detection of built-up areas with Sentinel-1 SAR data using random forest classification for Arnavutköy Istanbul

Sentinel-1 verilerine rastgele orman sınıflandırma yaparak İstanbul Arnavutköy için yapılaşma alanlarının konumsal ve zamansal değişiminin tespiti

Hasan Bilgehan Makineci

626-636



Türkçe sosyal medya mesajlarından kullanıcıların yaş ve cinsiyetini tahmin etme

Predicting users age and gender using Turkish social media messages

Mustafa Kaan Görgün¹, Gökçe Başak Demirok², Mücahid Kutlu^{3,*}

^{1,3} TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Departmanı, 06510, Ankara Türkiye

² TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Yapay Zekâ Mühendisliği Departmanı, 06510, Ankara Türkiye

Öz

Sosyal medya platformları insanların herhangi bir konu hakkındaki fikirlerine dair çok yüksek miktarda veri sunmaktadır. Bu yüzden, bu tip platformlar market analizi ve toplumsal görüş tahmini gibi birçok çalışma için çok önemli veri kaynaklarıdır. Ancak, sosyal medya kullanıcıları bir toplumu tam anlamıyla yansıtmadığından ötürü sosyal medya verisindeki yanlılığı azaltmak için kullanıcıların yaş ve cinsiyeti gibi çeşitli bilgileri de göz önünde bulundurarak sayma işlemi gibi ek adımların atılması gerekmektedir. Bu çalışmada verilen bir Türkçe Twitter hesabının paylaştığı mesajları kullanarak hesap sahibinin yaş aralığını ve cinsiyetini tahmin etme problemi konusunu ele aldık. Çalışma kapsamında 1040 Twitter kullanıcısının yaş ve cinsiyet bilgilerinden oluşan etiketli bir veri kümesi hazırlanmıştır. Ardından kelime, karakter, retweet, fastText ve BERT tabanlı beş farklı yöntem geliştirilmiştir. Yaptığımız kapsamlı deneylerden kullanıcıların paylaştıkları mesajların insanların yaş ve cinsiyet bilgisine dair önemli ipuçları sunduğunu göstermektedir.

Keywords: Doğal dil işleme, Yaş tahmini, Cinsiyet tahmini, Yazar profili tahmini

1 Giriş

Sosyal medya platformları kullanıcılarına fiziki uzaklıklara bakmaksızın dünyanın herhangi bir yerinde yaşayan diğer insanlarla kolaylıkla etkileşime geçme ve diledikleri konuda fikirlerini beyan etme imkânı sunmaktadır. Sağladıkları bu müthiş iletişim olanağından ötürü birçok insan aktif bir şekilde bu platformları kullanmaktadır. Örneğin, Twitter 2022 yılının ilk çeyreğinde yaklaşık olarak günlük 229 milyon aktif kullanıcısı olduğunu bildirmiştir [1]. Türkiye’de yaşayan insanlar da bu popüler platforma çok büyük bir ilgi göstermiştir. Türkiye 16.1 milyon kullanıcısı ile dünyada en çok kullanıcısı olan 6. ülke konumundadır [2].

Sosyal medya platformlarının sağladığı bu etkin iletişim imkânı ayrıca insanların çeşitli konularda ne düşündüğüne dair çok zengin bir veri kaynağı da oluşturmaktadır. İnsanların sosyal medya mesajları market analizi, spesifik bir konuda toplumsal görüş hakkında anket çalışması [3] veya toplumsal polarizasyonu analiz etmek [4] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Abstract

Social media platforms provide a huge amount of data on people's opinions on any topic. Therefore, such platforms are very important data sources for many studies such as market analysis and social opinion prediction. However, since social media users do not fully reflect a society, it is necessary to take additional steps to reduce bias such as weighted counting based on users' age and gender. In this study, we focus on the problem of predicting the age range and gender of the owner of a given Twitter account using the shared messages in Turkish. Within the scope of the study, we constructed a labeled dataset consisting of age and gender information of 1040 Twitter users. In addition, we developed five different methods based on words, characters, retweets, fastText, and BERT. Our extensive experiments show that the messages shared by users offer important clues about people's age and gender information..

Anahtar kelimeler: Natural language processing, Age prediction, Gender prediction, Author profiling

Sosyal medya platformları her ne kadar birçok araştırma çalışması için heyecan verici bir veri kaynağı olsa da, sağladığı verileri işlerken ve analiz ederken çok dikkatli olmak gerekmektedir. Öncelikle, sosyal medya platformları programlar tarafından yönetilen bot hesaplar içerebilir [5] ve bu bot hesaplar belli bir konuda birçok mesaj üreterek yapay gündem oluşturmada kullanılabilirler. Ayrıca sosyal medya kullanıcıları toplumun bir biçimli (“uniform”) bir örnekleme olmayıp, toplumu yansıtmaya açısından çok ciddi bir oranda yanlılık (“bias”) göstermektedir [6]. Bu yüzden sosyal medya verisinden anlamlı çıkarımlar yapabilmek için verideki yanlılığın azaltılması büyük bir önem arz etmektedir.

Sosyal medya verilerindeki yanlılığı azaltmak için, sağladığı içeriği olduğu gibi analiz etmek yerine, kullanıcılar üzerinde belli analizler yapıp, kullanıcı profillerinin toplumdaki ağırlığına göre bir çıkarım yapmak daha sağlıklı olacaktır [7]. Örneğin, Dwi Prasetyo ve Hauff [3] kullanıcıların cinsiyet bilgisini Endonezya seçim sonuçlarını sosyal medya üzerinden tahmin ederken kullanmıştır. Ancak kullanıcılar yaş ve cinsiyet bilgilerini direkt olarak

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: m.kutlu@etu.edu.tr (M. Kutlu)

Geliş / Received: 19.10.2022 Kabul / Accepted: 27.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1191719

profillerinde yazmadıklarından, bu bilgileri kullanıcıların paylaştıkları mesajlardan veya sosyal medya hesaplarındaki diğer bilgilerinden tahmin etmek gerekmektedir.

Metinlerin yazarlarının yaş ve cinsiyetini tahmin etme konusu birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Özellikle PAN ortak-görevinde (“shared-task”) birçok kez yaş ve cinsiyet tahmini konusu ele alınmıştır [8]. Ancak maalesef bu konuda Türkçe üzerine yapılan çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

Bu çalışmada Türkçe Twitter hesaplarının paylaştığı sosyal medya mesajları kullanılarak yaş ve cinsiyet bilgisini tahmin etme problemi ele alınmıştır. Bu konudaki veri kümesi eksikliğinden ötürü, öncelikle 1040 kullanıcıdan oluşan etiketli bir veri kümesi oluşturulmuştur. Ardından her iki problem için de beş farklı model geliştirilmiştir. Bu modeller 1) kelime bazlı n-gram modeli, 2) karakter bazlı n-gram modeli, 3) retweet temelli sınıflandırma, 4) fastText [9] kelime vektörlerini (“word embedding”) kullanarak sınıflandırma ve 5) hassas ayar (“fine-tune”) yapılmış BERT [10] modelidir. Ayrıca BERT modelinin işleyebileceği kelime sayısı kısıtlı olduğundan, profillerin analizlerinde hangi tweet’lerinin kullanılması gerektiğine dair bir tweet seçim yöntemi önerdik.

Yaptığımız kapsamlı deneylerde, yaş tahmini probleminde son mesajlar kullanılarak hassas-ayar işleminden geçirilen BerTurk modeli ile en yüksek başarımlar elde edilmiştir. Cinsiyet tahmininde ise kadın ve erkeklerin sık kullandığı kelimelere göre seçilen mesajları kullanan BerTurk modeli diğer modellerden daha yüksek başarımlar elde etmiştir.

Bu çalışmanın temel olarak iki tane önemli katkısı bulunmaktadır. İlk olarak Türkçe’de yaş ve cinsiyet tahmini problemi için etiketli bir veri kümesi oluşturulmuştur. Bu veri kümesi araştırmacılar ile paylaşılacak olup, bu konudaki gelecek çalışmalar için önemli bir kaynak oluşturulmuştur. İkinci olarak, yaş ve cinsiyet tahmini için beş farklı yöntem geliştirilmiş olup, başarımları ölçümlenmiştir. Geliştirilen modellerin kodları paylaşılacak olup, deney sonuçlarımızın tekrarlanabilirliği sağlanacaktır.

Çalışmamızın geri kalan kısımlarında şu konular anlatılacaktır. Öncelikle, yaş ve cinsiyet tahmini üzerine literatürdeki ilgili çalışmalar sunulacaktır. Sonrasında oluşturduğumuz etiketli veri kümesini oluşturma yöntemi ve veri kümesine ait istatistiksel bilgiler paylaşılacaktır. Ardından her iki problem için geliştirdiğimiz modeller sunulacaktır. En sonunda deneysel değerlendirmeler ile yöntemler karşılaştırılacak ve sonuçlar tartışılacaktır.

2 Literatür taraması

Yaş ve cinsiyet tahmini genel olarak yazar profili çıkarma problemlerindedir. O yüzden öncelikle yazar profili çıkarma konusundaki çalışmalara değineceğiz. Yazar profili çıkarma konusundaki çalışmalar birçok farklı metin türü ve kaynağını kullanmışlardır. Örneğin, Facebook mesajları [11], blog yazıları [12], e-postalar [13] ve tweet’ler [14] kullanılan metinler arasındadır. Biz çalışmamızda tweet’leri kullandık çünkü Twitter akademik araştırma için verisini kullanıma açmıştır ve diğer platformlar ile karşılaştırıldığında verisini paylaşma konusunda çok daha

fazla kolaylıklar sağlamaktadır. Muhtemelen bu sebepten ötürü, literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı da Twitter’ı bir veri kaynağı olarak kullanmıştır.

Yazar profili çıkarma konusunda araştırmacılar yaş, cinsiyet, politik görüş, konum ve karakter tipi gibi birçok farklı konuyu ele almıştır. Örneğin, Rao vd. [15] profillerin cinsiyet, yaş, politik eğilim ve nereli olduğunu tahmin etmeye çalışmıştır. Flekova vd. [16] ise insanların kullandıkları dilden gelirlerini ve yaşlarını tahmin etmeye çalışmıştır. Schwartz vd. [11] ise yaş, cinsiyet ve kişilik tahmini konusuna eğilmiştir.

Yazar profilini çıkarma konusundaki çalışmalar ayrıca kullandıkları doğal dillere göre de ayrıştırılabilir. Literatürde Almanca [17], Felemenkçe [18], Yunanca [19,20], İngilizce [12], İspanyolca [12] ve Arapça [21] gibi birçok dilde çalışmalar mevcuttur. Türkçe’de de çeşitli konularda çalışmalar olmakla birlikte, maalesef diğer dillere göre oldukça az sayıda çalışma olduğunu söyleyebiliriz.

2.1 Yaş ve cinsiyet tahmini için etiketli veri kümeleri

Modelleri eğitmek ve test etmek için muhakkak etiketli veri kümelerine ihtiyacımız olduğundan birçok araştırmacı çeşitli yazar profili veri kümeleri oluşturmuştur. Bu veri kümelerinde Facebook mesajları [11], bloglar [12], elektronik postalar [13] ve tweet’ler [14] gibi farklı metin türlerini kullanmışlardır. Bu konuda ne yazık ki Türkçe veri kümeleri de oldukça sınırlı sayıdadır.

Wiegmann vd. [22] 37 farklı dilde toplam 71,706 ünlü kişinin Twitter hesabından oluşan bir veri kümesi oluşturmuştur. Ancak bu veri kümesinin çok küçük bir kısmı Türkçe hesaplardan oluşmaktadır. Cinsiyet tahmini için Sezerer vd. [23] Türk Dil Kurumu’ndan aldıkları cinsiyetler için kullanılan isimler listesindeki isimleri içeren profilleri toplayarak toplamda 5,292 kullanıcıyı içeren bir veri kümesi oluşturmuşlardır. Bu çalışmada ise, geneli ünlülerden olmak üzere 1,040 Twitter kullanıcısının yaş, cinsiyet ve meslek bilgilerini içeren bir veri kümesi oluşturduk. Bu açıdan literatürde bu üç konuyu da içeren ve bu büyüklükte olan başka bir veri kümesi bildiğimiz kadarı ile yoktur.

2.2 Yaş ve cinsiyet tahmini çalışmaları

Bu çalışmada olduğu gibi, geçmiş çalışmalar da genelde yaş ve cinsiyet tahmini konularının ikisini de kapsamaktadır. Örneğin, PAN 2013’te [24] ve sonraki bazı PAN ortak-görevlerinde de yaş ve cinsiyet tahmini ele alınmıştır. Biz de bu yüzden bu konulardaki çalışmaları birlikte anlatacağız.

Erkek ve kadınların yazım stillerinde ve bazı ifadelerin kullanım sıklığında farklılık olduğuna dair literatürde çeşitli bulgular bulunmaktadır. Örneğin Schwartz vd. [11] kadınların erkeklere nazaran başkalarının eşlerinden daha çok bahsederken, erkeklerin ise kendi eşlerinden daha sık bahsettiğini gözlemlemiştir. Ayrıca kadınların daha çok duygusal ifadeler (“seni seviyorum” vb.) ve birinci çoğul kişi çekimi kullanırken erkeklerin ise daha fazla argo içerikli kelime kullandığını belirtmiştir. Ayrıca, Rao vd. [15] kadınların “my husband” (Tr: kocam) ifadesini kullanma sıklığının erkeklerin “my wife” (Tr: karım) ifadesini kullanma sıklığından daha fazla olduğunu belirtmiştir. Park vd. [25] içerik özelliklerine göre cinsiyet tahmini yapmış ve

Tablo 1. Veri kümemizden örnek hesaplar ve tweet'leri

Kullanıcı ID	Yaş	Cinsiyet	Meslek	Örnek Tweet'ler
1361659642896654336	61+	Erkek	Siyasetçi	Tweet-1: Sizlerle benim hayat felsefemin bir parçası olmuş bir şiir paylaşmak istedim. #adamolmak #rudyardkipling Tweet-2: Oğullarım Emrah, Emre & Fatih'le çektiğimiz bu fotoğraf #TürkiyeninDönüşümYılları adlı kitabımın son bölümünde yer alıyor. Bu karede olmayan Selin'le birlikte her birinin varlığı, hayatta aldıkları yola şahitlik & eşlik etmek beni bir baba olarak çok mutlu ediyor. #BabalarGunu
569849244	61+	Kadın	Sanatçı	Tweet-1: Bütün kızlar toplandık geliyoruzzzzz...👀👀 kanalturk @bbturanli @bulbulmustafa @eeceyilmazz Tweet-2: İyi haftalar... #istanbulboğazi #toplantizamanı
466053456	18-30	Kadın	Sporcu	Tweet-1: Biz Ne Baharlar gördük , senle Ne kışlar. Hiçbir şeyi sevmedik inan senin kadar.. 🗑 #besiktas Hakkari deplasmanı için yoldayız, Tüm taraftarlarımızı bekliyoruz Tweet-2: Kadın A Millî Takım Hazırlıklar Devam Ediyor Türkiye-Hollanda 08.11.2019 https://t.co/JntRiMXFaS
83000123	31-40	Erkek	Oyuncu	Tweet-1: Mühim olan artık buranın gedikli olması. Her sene burda olmalıyız !!!!👍👍 #FinalFour #FenerbahçeÜlker Tweet-2: Mükemmel galibiyet tebrikler beyler👍👍👍👍👍👍👍👍👍👍👍👍 #Fenerbahce

kadınların mesajlarında daha çok pozitif duygu ve sosyal ilişki belirten kelimelerin (örn: arkadaşlar, aile, kız kardeş) ve emojilerin olduğunu; erkeklerin mesajlarında ise daha çok politika (örn: hükümet, vergi), spor ve yarışma (örn: futbol, sezon, kazanmak) konularında kelimelerin olduğunu gözlemlemiştir. Newman vd. [26] erkeklerde kelime uzunluğu, sayı ve edat kullanımının kadınlara göre fazla olduğunu, kadınların ise erkeklere göre daha fazla zamir ve sosyal kelime kullandıklarını belirtmiştir.

Yaşın insanların yazdıkları metinler üzerindeki etkisi hakkında da çeşitli çalışmalar vardır. Örneğin, Schwartz vd. [11] gençlerin "idk" ("I do not know") gibi sosyal medyada yaygın ifadeleri daha sık kullandığını ve beklenildiği üzere 19-22 yaş aralığında üniversite konularının daha çok rastlandığını belirtmişlerdir. Nguyen vd. [18] yaş arttıkça genellikle tweet uzunluğu, kelime uzunluğu, verilen link ve hashtag sayısının arttığını, "ben" zamirinin kullanımının ise azaldığını bildirmişlerdir. Pennebaker ve Stone [27] insanlar yaşlandıkça kendine referansın daha az kullanıldığını, pozitif kelime kullanımının ve gelecek zaman kullanımının arttığını bildirmektedir. Ancak Brandt ve Herzberg [28] yaşlı katılımcıların uygulamalarında daha fazla olumlu duygu kelimesi kullanılmadığını belirtmiş olup, Pennebaker ve Stone'nun [27] bulgusunu desteklememektedir.

Yaş ve cinsiyet tahmini için literatürde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Nguyen vd. [29] yaş tahminini regresyon problemi olarak tanımlarken, Nguyen vd. [18], kategorik ve yaşam basamakları şeklinde ele almıştır. Özellikle Nguyen vd. [29] yaş tahmini yaparken cinsiyet bilgisini de öznitelik olarak kullanmıştır. Schwartz vd. [11] cinsiyet, yaş ve karakter tespiti için açık-sözlük ("open vocabulary") yaklaşımını kullanmıştır. Geçmiş bilgiye dayanmayan, sözlük kullanılmayan, sadece o anki veriden çıkarılan bu yaklaşımın, klasik kapalı-sözlük ("closed-vocabulary") yöntemine göre daha çok bilgi içeren sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Rao vd. [15] Twitter kullanıcılarının cinsiyet, yaş, bölgesel köken ve politik yönelimlerini tahmin etmek için sosyo-dilsel öznitelikleri ve n-gram modeli kullanan iki ayrı destek vektör makinesi ("support vector machine" -

SVM) modelinin tahminlerini birleştiren bir model geliştirmişlerdir. Hirt vd. (2019) ise diğer çalışmalardan ayrı olarak kullanıcı ismi ve profil fotoğrafını da cinsiyet tahmininde kullanmıştır.

Literatürde Türkçe metinler üzerinden cinsiyet tahmini yapan çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Sezerer vd. [30] cinsiyet tahminini sadece yazım stili inceleyerek yapmışlardır. Bunun için standart makine öğrenimi yaklaşımları yerine stil özelliklerini çıkarmak için evrişimli sinir ağları ("convolutional neural network") kullanmışlardır. Sezerer vd. [23] de cinsiyet tahmini için oluşturduğu veri kümesinde SVM ile kelime-torbasi yönteminin sonuçlarını paylaşmıştır. İlhami ve Hanbay [31] Sezerer vd.'nin [23] veri kümesi üzerinde BERT, DistilBERT ve Electra gibi dönüştürücü modelleri, LSTM ve CNN gibi derin öğrenme modelleri ile SVM modellerini karşılaştırmıştır. Cinsiyet tespitinde yazılan içerikten çok yazım tarzının daha belirleyici bir özellik olduğunu düşündüklerinden, çok sık ve az bilgi içeren kelimeleri ("stop words"), noktalama işaretlerini ve emojileri veriden çıkarmamışlardır. En yüksek başarıyı BERT modeli ile elde edildiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada Türkçe dili üzerine yapılan çalışmalardan farklı olarak BERT modelinde uygun tweet'lerin seçimi konusu, karakter bazlı n-gramlar ve retweet bazlı özniteliklerin kullanımı incelenmiştir.

3 Veri kümesi

Herhangi bir Twitter kullanıcısının yaş ve cinsiyet bilgisini el ile etiketlemek çok zor olacağı için, veri kümemiz genellikle internet üzerinden bilgilerine kolaylıkla ulaşılabileceğimiz ünlü kişilerden oluşturulmuştur. Aynı meslek grubundaki insanların kullandıkları üslubun benzer olması sebebiyle tek bir meslek grubundaki tanınmış kişiler yerine siyasetçi, sanatçı, sporcu, gazeteci, modacı, iş adamı, doktor, veteriner, avukat, ekonomist ve mühendis gibi çeşitli meslek gruplarından kişiler belirlenmiştir. Kullanılan dilin belirli bir konuya yönelik olmaması için mümkün olduğunca meslek gruplarında dengesiz dağılım olmamasına özen gösterilmiştir. Bu yüzden az sayıda kullanıcı içeren meslek gruplarındaki kullanıcıların takip ettiği kişilere bakılarak

aynı meslek grubundaki kullanıcıların sayısı artırılmıştır. Belirlenen kullanıcıların cinsiyetleri fotoğraf ve ismi üzerinden etiketlenmiştir. Yaşlarının tespiti için ise kişisel internet sayfaları ya da LinkedIn hesapları kullanılmıştır.

Literatürde de yaşlar genelde gruplandırılarak modeller eğitildiği için (örneğin, [18]), kullanıcıların yaşları belirlendikten sonra 18-30, 31-40, 41-50, 51-60 ve 61+ olmak üzere beş farklı yaş grubu kullanılmıştır. Genellikle genç yaşta tanınmış kullanıcıların sporcu veya oyuncu olması sebebiyle meslek grupları ile yaş bilgisinin özdeşleşmesi, hazırlanan veri kümesinde yanlılığa yol açabilir. Bu nedenle genç yaşta kullanıcıların veri kümesindeki oranını artırmak amacıyla #tercih2021 etiketi altına ÖSYM yerleştirme sonucunu paylaşan ve kullanıcı isminden veya profil resminden cinsiyeti belirlenebilen 100 adet kullanıcı seçilmiştir. Bu kullanıcıların 18 ila 30 yaş aralığında olduğu varsayılmıştır.

Veri kümemiz 553 erkek ve 487 kadın (%53.2 erkek, %46.8 kadın) kullanıcı olmak üzere toplamda 1040 adet Twitter kullanıcıını içermektedir. Tablo 1’de veri kümemizden örnekler sunulmuştur. Kullanıcıların yaş ve meslek gruplarının grafiği Şekil 1’de gösterilmiştir. Yaş açısından bakıldığında yüksek yaş gruplarının azınlıkta olduğu görülmektedir.

4 Geliştirilen yöntemler

4.1 Problem tanımı

Bu çalışmada Türkçe tweet’lere sahip herhangi bir Twitter kullanıcısının yaş ve cinsiyetinin tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. Literatürde de genel olarak uygulandığı üzere (örneğin, [18]), kullanıcıların direkt olarak yaşını tahmin etmek yerine yaş aralığı tahmin edileceğinden dolayı, her iki problem de birer sınıflandırma problemi olarak tasarlanmıştır. Yaş aralığı probleminde kullanıcılar yaşlarına göre 18-30, 31-40, 41-50, 51-60, 61 ve üzeri olmak üzere 5 gruba ayrılmıştır. Cinsiyet probleminde ise ikili sınıflandırma problemi olarak "kadın" ve "erkek" sınıflarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

4.2 Veri ön işleme

Yaş ve cinsiyet tahminleri için aynı metinler kullanılmıştır. Uygulayacağımız her yöntem için şu ön işlemler uygulanmıştır: Kullanıcıların yalnızca dahil olduğu yaş grubunda iken paylaştığı tweet’leri içerecek şekilde filtrelenmiştir. Örneğin, bir kullanıcı 32 yaşında ise

31-40 yaş aralığına girmesi sebebiyle kullanıcının son 2 yılda paylaştığı tweet’ler alınıp diğerleri filtrelenmiştir. Tweet’lerde "@", "\#", "https://" ile başlayan kelimeler, emojiler ve retweeti temsil eden "RT:" ifadeleri çıkartılmıştır. BERT ve fastText bazlı yöntemler hariç diğer yöntemler için kelimelere köke indirgeme ("stemming") işlemi uygulanmıştır.

4.3 Yöntemler

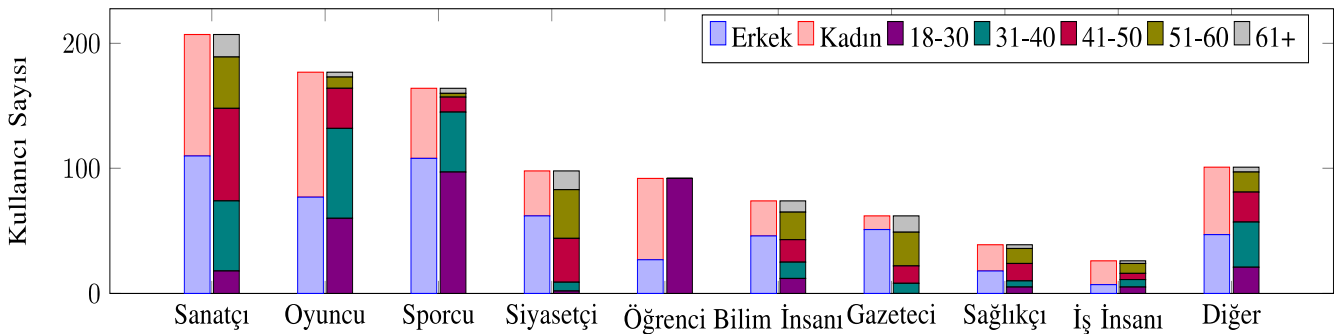
Önişlemeden geçirilen veriyi girdi olarak alıp hesapların yaş grubu ve cinsiyetini tahmin eden beş farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla Kelime Bazlı N-Gram, Karakter Bazlı N-Gram, Retweet Bazlı Sınıflandırma, FastText Kelime Vektörleri ve BERT Dönüştürücü Modelleridir. Bu bölümde belirtilen beş yöntem anlatılmaktadır.

4.3.1 Kelime bazlı N-Gram

Yaş grubu ve cinsiyetin tespit edilebilmesinde kullanıcıların kullandıkları kelimeler ve bunların kullanılma sıklıkları belirleyici olabilir. Daha önce belirtildiği üzere, önceki çalışmalar insanların hayatlarının farklı dönemlerinde kullandıkları kelimelerin zamanla değişim gösterebildiğini ve benzer şekilde kadın ve erkeklerin sık kullandıkları kelimelerin de belirgin bir şekilde farklı olabildiğini belirtmişlerdir. O yüzden kelime torbası yöntemi etkin bir çözüm olabilir. Spesifik olarak, bu yöntemde, kelimelerin dokümanlarda ne kadar sık geçtiğini belirten *terim frekansı* ("term frequency", TF) ve tüm koleksiyonda ne kadar nadir geçtiğini belirten *ters doküman frekansı* ("inverse document frequency", IDF) skorlarını birleştiren TF-IDF skorları hesaplanıp, bu skorlara göre öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Ardından destek vektör makineleri gibi çeşitli yapay öğrenme algoritmaları uygulanmıştır.

4.3.2 Karakter bazlı N-Gram

Tweet metinlerinde gündelik dil kullanımı ve birçok yazım hatası kelime bazlı öznitelik kullanan modellerin performansını düşürebilir. Bu nedenle, bu yöntemde kelimelerin frekansı yerine, 3 karakter uzunluğundaki kelime alt gruplarının TF-IDF skorlarını hesaplayıp öznitelikleri çıkardık. Ardından benzer şekilde çeşitli yapay öğrenme algoritmaları ile modelimizi eğittik. Hangi algoritmanın kullanılacağı bir sonraki bölümde deneylerde belirledik.



Şekil 1. Oluşturulan veri kümesindeki etiket dağılımı

4.3.3 Retweet bazlı sınıflandırma

Aynı yaş veya cinsiyet grubundaki kullanıcılar benzer ilgi alanlarına sahip olup, aynı kişileri takip edebilir ve onların tweet'lerini "retweet" edebilirler. Bu nedenle, bu yöntemde önce en çok retweet edilen hesaplar tespit edilip, bu hesaplar birer öznitelik olarak kullanılmıştır. Spesifik olarak, her hesaptan kaç kez retweet yapıldığı öznitelik değeri olarak kullanılmıştır.

4.3.4 FastText kelime vektörleri

Bojanowski vd.'nin [9] geliştirmiş olduğu fastText kelime vektörleri ("word embedding") kelimelerin semantik ve sentaktik özelliklerini yakalayabilen popüler bir yöntemdir. Ayrıca fastText karakter n-gramlarına göre bir öğrenme gerçekleştirdiği için diğer kelime vektörleri yöntemlerine göre yazım hatalarından çok daha az etkilenmektedir. Biz de bu modelimizde fastText'in sunduğu metin sınıflandırma modelini yaş ve cinsiyet tahmini problemimizde kullandık.

4.3.5 BERT dönüştürücü modelleri

BERT [10] modelleri ile birçok doğal dil işleme görevinde yüksek başarımlar elde edilmiştir. Bu sebeple biz de Türkçe metinler ile öneğitilmiş BerTurk [32] modeline hassas ayar işlemini uyguladık. BERT modeli sadece belirli bir uzunluktaki (512 token) metinleri girdi olarak alabilmektedir. Ancak kullanıcıların toplam mesaj uzunluğu BERT'in işleyebileceğinden daha uzun olabilmektedir. Bu yüzden bu yöntemde iki farklı tweet seçimi yöntemi uygulanarak iki farklı BerTurk modeli geliştirilmiştir. 1) *BerTurk_{son}*: Tweet'ler paylaşıldığı zamana göre sıralanıp en son atılan tweet'ler kullanılmıştır. 2) *BerTurk_{Filtre}*: Önce sınıflara ait en sık geçen kelimeler belirlenmiştir. Ardından birden çok sınıfa ait sık kelimeler elenmiştir. En son olarak bu kelimeleri içeren tweet'ler BERT modelinde kullanılmıştır.

5 DENEYLER

Bu bölümde öncelikle deney düzeneği anlatılmaktadır. Ardından makine öğrenmesi algoritmalarının karşılaştırılması ve özniteliklerin etkileri incelenmiştir.

5.1 Deney düzeneği

Makine öğrenmesi modelleri eğitilirken ve tweet'lerden kelime frekans vektörleri oluşturulurken Scikit kütüphanesi [33] kullanılmıştır. Ön işleme aşamasında metinleri türclere ("token") ayırma ve köke indirgeme işlemleri için sırasıyla NLTK [34] ve TurkishStemmer [35] kütüphaneleri kullanılmıştır. Ayrıca BERT uygulaması için ktrain kütüphanesinden [36] faydalanılmıştır.

Kelime bazlı n-gram modelinde tekli ve çiftli (unigram ve bigram) kelime grupları seçilmiştir. BERT modelinde her bir problem için 5 epoch, 2e-5 öğrenme oranı ve 6 batch büyüklüğü parametreleri kullanılmıştır. FastText modeli için ise Türkçe için hazırlanan kelime vektörleri [37] kullanılarak varsayılan model parametreleri kullanılmıştır.

Oluşturduğumuz veri kümesinin yüzde 60'ı eğitim, yüzde 20'si değerlendirme ("validation") ve yüzde 20'si test için

kullanılmıştır. Modellerin başarımlarını ölçebilmek için makro-ortalama F1 skoru hesaplanmıştır. Rassal orman ("random forest") ve BERT modellerinin rastgele atanan kök ("seed") parametrelerinden ötürü 3 defa çalıştırılarak ortalama değerleri raporlanmıştır.

Filtreleme yönteminde en sık geçen kelimeler olarak cinsiyet tahmini probleminde 1000'den fazla geçen kelimeler arasından iki sınıfta ortak olmayan kelimeler seçilmiştir. Yaş aralığı probleminde ise 100'den fazla geçen kelimelerden yaş gruplarında ortak olmayan kelimeler seçilmiştir. Her bir kullanıcı için, belirlenen bu kelimelerin en az birinin geçtiği tweet'ler uç uca eklenip birleştirilmiş ve BERT modelinde kullanılmıştır.

5.2 Deney sonuçları

İlk deneyimizde kelime torbası, karakter bazlı n-gram ve retweet bazlı modellerde vektör uzunluğunu belirlemek için çeşitli uzunluklardaki vektörler kullanılarak lojistik regresyon modeli eğitilmiş ve eğitilen modellerin değerlendirme kümesindeki performansı ölçülmüştür. Yapılan deney sonuçları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Farklı boyutlardaki retweet, kelime ve karakter bazlı vektörler ile eğitilmiş lojistik regresyonu modelinin yaş ve cinsiyet tahminindeki F₁ skorları. Her durum için en yüksek skor kalın gösterilmiştir.

Yöntem	Öznitelik Sayısı	Yaş Tahmini	Cinsiyet Tahmini
Retweet Bazlı Vektörler	50	0.368	0.565
	100	0.353	0.565
	200	0.348	0.599
Kelime Bazlı N-Gram	5,000	0.361	0.757
	10,000	0.363	0.747
	20,000	0.367	0.737
Karakter Bazlı N-Gram	5,000	0.277	0.755
	10,000	0.279	0.726
	20,000	0.286	0.726

Öznitelik sayısı arttıkça kelime torbası ve karakter bazlı n-gram yöntemlerinin yaş tahmini problemindeki performansları artmış; cinsiyet tahmini problemindeki performansları ise azalmıştır. Retweet bazlı modelin performansı ise öznitelik sayısı arttıkça yaş tahmininde düşmüştür. Cinsiyet tahmininde ise öznitelik sayısı 200'e arttırılınca modelin performansında gözle görülür bir artış olmuştur. Yöntemleri karşılaştırdığımızda ise, yaş tahmininde retweet bazlı yöntem, cinsiyet tahmininde ise kelime bazlı n-gram yöntemi en yüksek başarımları elde etmiştir.

Bir sonraki deneyimizde retweet, kelime ve karakter bazlı öznitelikler kullanılarak destek vektör makineleri (support vector machines -SVM), Rassal Ormanlar ("Random Forest" -RF), K-en-yakın-komşu ("K-Nearest Neighbor" -KNN) ve lojistik regresyon ("logistic regression" -LR) algoritmaları eğitilmiş ve her modelin performansı değerlendirme kümesinde ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Her algoritmanın diğerlerine göre daha yüksek başarımlar elde ettiği bir durum olduğu gözlemlenmektedir. Kelime

bazlı n-gram yönteminde her iki tahmin problemi için de en iyi sonuç lojistik regresyon kullanıldığında alınmıştır. SVM modeli de retweet bazlı öznitelikler ile yaş tahmininde ve karakter bazlı n-gram öznitelikleri ile cinsiyet tahmininde en yüksek sonucu elde etmiştir. RF ve KNN ise sırasıyla retweet bazlı cinsiyet tahmininde ve karakter n-gram bazlı yaş tahmininde en yüksek sonucu elde etmiştir.

En son deneyimizde ise, tüm yöntemlerimizin test kümesindeki F1, doğruluk (“accuracy”), hassasiyet (“precision”) ve duyarlılık (“recall”) değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4’te gösterilmiştir. Kelime, karakter ve retweet bazlı modeller için değerlendirme kümesinde en az bir problemde en yüksek başarıyı gösteren modellerin sonuçları gösterilmiştir.

Yaş aralığı tahmini problemi için kelime vektörleri ve dönüştürücü modeller, yani genel olarak daha modern yöntemlerin diğer klasik yöntemlerden daha başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Spesifik olarak, en son tweet’leri kullanarak geliştirilen BertTurk modeli en yüksek F1 değerini elde etmiştir, fastText modeli ise ikinci olmuştur.

Cinsiyet tahmini probleminde ise önerdiğimiz kelime bazlı filtre uygulanarak geliştirilen BertTurk modeli en yüksek başarımlı model olmuştur. Ancak cinsiyet modelinde klasik yöntemlerin de yüksek başarımlı elde ettiği gözlemlenmektedir. Özellikle, karakter n-gram öznitelikleri kullanılarak eğitilen SVM modeli BerTurkFiltre dışındaki tüm modellerden daha yüksek sonuç elde etmiştir. Daha önce belirtildiği gibi BERT bazlı modellerimizi üç kere çalıştırıp ortalama değerlerini sunduk. Ancak BERT modellerinin bu veri kümesindeki performansının standart sapmasının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı epoch değerlerinde de performansının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sebeple bu veri kümesindeki BERT sonuçlarına dikkatli yaklaşmak gerekmektedir.

Tablo 4’te kullandığımız yöntemlerin performansını Sezerer vd. [23]’nin cinsiyet tahmini için oluşturduğu veri kümesinde de ölçtük. Sezerer vd. veri kümesinde 3,368 kullanıcı eğitim için, 1,924 kullanıcı ise test için ayrılmıştır. Her kullanıcı için 100’er tweet paylaşılmıştır. Bu veri kümesinde kullanıcıların retweet ettikleri mesajlar olmadığı için retweet temelli yöntemimizi çalıştıramadık. Ayrıca hafıza yetersizliği probleminden ötürü ‘batch size’ parametresini BerTurkSon ve BerTurkFiltre için sırasıyla 4’e ve 2’ye düşürdük. Tablo 5’te cinsiyet tahmininde kullandığımız yöntemlerin Sezerer vd. [23] veri kümesindeki sınıflandırma performansları gösterilmektedir. Sezerer vd. veri kümelerinde temel sistem olarak SVM ile kelime torbası yönteminin performansını 0.72 doğruluk olarak belirtmişlerdir. Bizim yöntemlerimizden KNN Karakter N-Gram hariç hepsi Sezerer vd.’nin temel yönteminden daha yüksek başarımlı elde etmiştir. İlhami ve Hanbay [31] aynı veri kümesinde çeşitli derin öğrenme yöntemleri geliştirmiştir. Elde ettikleri en yüksek başarımlı BERT modeli ile 0.8012 olmuştur. Hesapların en son tweet’lerini kullanan BERT modelimiz de benzer bir sonuç almıştır. Ancak filtreleme yöntemi ile tweet’leri seçtiğimizde çok daha yüksek bir başarımlı elde etmekteyiz. Bu da birçok tweet’in aslında veride kirliliğe sebep olduğunu göstermektedir. Ek

olarak, bazı spesifik ifadelerin kişilerin cinsiyetini tahmin etmede çok önemli olduğunu göstermektedir.

Her algoritmanın diğerlerine göre daha yüksek başarımlı elde ettiği bir durum olduğu gözlemlenmektedir. Kelime bazlı n-gram yönteminde her iki tahmin problemi için de en iyi sonuç lojistik regresyon kullanıldığında alınmıştır. SVM modeli de retweet bazlı öznitelikler ile yaş tahmininde ve karakter bazlı n-gram öznitelikleri ile cinsiyet tahmininde en yüksek sonucu elde etmiştir. RF ve KNN ise sırasıyla retweet bazlı cinsiyet tahmininde ve karakter n-gram bazlı yaş tahmininde en yüksek sonucu elde etmiştir.

En son deneyimizde ise, tüm yöntemlerimizin test kümesindeki F1, doğruluk (“accuracy”), hassasiyet (“precision”) ve duyarlılık (“recall”) değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4’te gösterilmiştir. Kelime, karakter ve retweet bazlı modeller için değerlendirme kümesinde en az bir problemde en yüksek başarımlı gösteren modellerin sonuçları gösterilmiştir.

Yaş aralığı tahmini problemi için kelime vektörleri ve dönüştürücü modeller, yani genel olarak daha modern yöntemlerin diğer klasik yöntemlerden daha başarılı olduğu gözlemlenmektedir. Spesifik olarak, en son tweet’leri kullanarak geliştirilen BertTurk modeli en yüksek F1 değerini elde etmiştir, fastText modeli ise ikinci olmuştur.

Cinsiyet tahmini probleminde ise önerdiğimiz kelime bazlı filtre uygulanarak geliştirilen BertTurk modeli en yüksek başarımlı model olmuştur. Ancak cinsiyet modelinde klasik yöntemlerin de yüksek başarımlı elde ettiği gözlemlenmektedir. Özellikle, karakter n-gram öznitelikleri kullanılarak eğitilen SVM modeli BerTurkFiltre dışındaki tüm modellerden daha yüksek sonuç elde etmiştir. Daha önce belirtildiği gibi BERT bazlı modellerimizi üç kere çalıştırıp ortalama değerlerini sunduk. Ancak BERT modellerinin bu veri kümesindeki performansının standart sapmasının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca farklı epoch değerlerinde de performansının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sebeple bu veri kümesindeki BERT sonuçlarına dikkatli yaklaşmak gerekmektedir.

Tablo 4’te kullandığımız yöntemlerin performansını Sezerer vd. [23]’nin cinsiyet tahmini için oluşturduğu veri kümesinde de ölçtük. Sezerer vd. veri kümesinde 3,368 kullanıcı eğitim için, 1,924 kullanıcı ise test için ayrılmıştır.

Her kullanıcı için 100’er tweet paylaşılmıştır. Bu veri kümesinde kullanıcıların retweet ettikleri mesajlar olmadığı için retweet temelli yöntemimizi çalıştıramadık. Ayrıca hafıza yetersizliği probleminden ötürü ‘batch size’ parametresini BerTurk_{Son} ve BerTurk_{Filtre} için sırasıyla 4’e ve 2’ye düşürdük. Tablo 5’te cinsiyet tahmininde kullandığımız yöntemlerin Sezerer vd. [23] veri kümesindeki sınıflandırma performansları gösterilmektedir. Sezerer vd. veri kümelerinde temel sistem olarak SVM ile kelime torbası yönteminin performansını 0.72 doğruluk olarak belirtmişlerdir. Bizim yöntemlerimizden KNN Karakter N-Gram hariç hepsi Sezerer vd.’nin temel yönteminden daha yüksek başarımlı elde etmiştir. İlhami ve Hanbay [31] aynı veri kümesinde çeşitli derin öğrenme yöntemleri geliştirmiştir. Elde ettikleri en yüksek başarımlı BERT modeli ile 0.8012 olmuştur. Hesapların en son tweet’lerini kullanan BERT modelimiz de benzer bir sonuç almıştır.

Tablo 3. Farklı makine öğrenmesi algoritmaları ve öznitelikler kullanılarak eğitilen modellerin değerlendirme kümesindeki F1 skorları. Her durum için en yüksek skor kalın gösterilmiştir.

Yöntem	Yaş			Cinsiyet		
	Kelime T.	Kr. N-Gram	RT	Kelime T.	Kr. N-Gram	RT
SVM	0.306	0.285	0.377	0.755	0.779	0.609
RF	0.309	0.316	0.313	0.741	0.763	0.633
LR	0.367	0.286	0.368	0.757	0.755	0.599
KNN	0.317	0.357	0.323	0.670	0.624	0.605

Tablo 4. Tüm yöntemlerin test kümesinde elde ettikleri F₁, doğruluk, hassasiyet ve duyarlılık değerlerinin karşılaştırılması.

Yöntem	Yaş				Cinsiyet			
	F ₁	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık	F ₁	Doğruluk	Hassasiyet	Duyarlılık
LR – Kelime N-Gram	0.388	0.502	0.388	0.405	0.722	0.729	0.723	0.722
SVM Karakter N-Gram	0.366	0.498	0.374	0.390	0.745	0.749	0.744	0.746
KNN Karakter N-Gram	0.397	0.483	0.432	0.400	0.664	0.633	0.670	0.659
SVM - Retweet	0.372	0.449	0.435	0.370	0.641	0.633	0.640	0.642
RF - Retweet	0.328	0.420	0.355	0.334	0.659	0.655	0.657	0.661
FastText	0.413	0.527	0.416	0.424	0.673	0.681	0.674	0.673
BerTurk _{Son}	0.432	0.512	0.613	0.426	0.742	0.744	0.740	0.743
BerTurk _{Filtre}	0.406	0.498	0.470	0.410	0.762	0.764	0.760	0.763

Ancak filtreleme yöntemi ile tweet'leri seçtiğimizde çok daha yüksek bir başarımla elde etmekteyiz. Bu da birçok tweet'in aslında veride kirliliğe sebep olduğunu göstermektedir. Ek olarak, bazı spesifik ifadelerin kişilerin cinsiyetini tahmin etmede çok önemli olduğunu göstermektedir.

Modellerin başarımlarının ne derece iyi olduğunu anlamak için insanların yaş ve cinsiyet tahmin etmedeki başarımlarını ölçtük. Bunun için veri kümemizden her yaş grubundan rastgele 5 tane kadın ve 5 tane erkek hesap seçtik. Böylece toplamda 50 hesap seçilmiş oldu. Ardından kullanıcıların hesap isimlerini maskeleyip, en son 20 tweet'ini seçtik ve 3 kişiye bu hesapların sadece tweet'lerine bakarak yaş grubunu ve cinsiyetini tahmin etmelerini istedik. 3 kişinin yaş ve cinsiyet tahminindeki başarımları **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Yöntemlerim Sezerer vd. [23] veri kümesinde elde edilen F₁, doğruluk, hassasiyet ve duyarlılık değerlerinin karşılaştırılması. Her durumdaki en iyi sonuç kalın fontla gösterilmiştir. Doğ: Doğruluk, Hassasiyet: H, Duyarlılık: D

Yöntem	F ₁	Doğ	H	D
LR – Kelime N-Gram	0.821	0.804	0.823	0.819
SVM Karakter N-Gram	0.828	0.813	0.823	0.833
KNN Karakter N-Gram	0.713	0.680	0.730	0.697
FastText	0.827	0.809	0.833	0.820
BerTurk _{Son}	0.800	0.803	0.800	0.801
BerTurk _{Filtre}	0.986	0.987	0.987	0.986

Tablo 6. Rastgele seçilen 50 hesabın sadece tweet'lerine bakarak yapılan insan tahminlerinin doğruluk oranları.

	Yaş Tahmini	Cinsiyet Tahmini
Kişi - 1	0.34	0.66
Kişi - 2	0.34	0.78
Kişi - 3	0.34	0.64

Bizim en iyi modellerimiz yaş tahmininde 0.527 doğruluk, cinsiyet tahmininde ise 0.764 doğruluk elde etmiştir. Farklı kümeler olduğu için skorları direkt karşılaştırmak doğru değildir. Ancak modellerin performanslarına dair önemli bir referans değer olarak kabul edilebilir. Bu sebeple geliştirdiğimiz modeller yaş tahmininde insanlardan çok daha yüksek bir doğrulukta çalışmaktadır. Ayrıca insanların 0.34 doğruluğunda tahmin etmeleri de sadece metne bakarak insanların yaşlarını tahmin etmenin çok zor olduğunu göstermektedir. Geliştirdiğimiz modelin daha yüksek bir başarımla elde etmesi metinler arasında görmesi zor olan benzerlikleri yakaladığını göstermektedir.

Önerdiğimiz yöntemlerin performansını daha iyi değerlendirebilmek için literatürdeki diğer diller için yapılan çalışmaların performans değerleri ile karşılaştırdık. Burada not edilmesi gerekir ki, farklı veri kümelerinde elde edilen sonuçlar olduğu için birebir karşılaştırma yapmak doğru değildir. PAN 2018 [38] ortak-görevinde metin bazlı cinsiyet tahmininde İngilizce, Arapça ve İspanyolca dilleri için elde edilen en yüksek skorlar sırasıyla 0.822, 0.817 ve 0.820'dir. PAN 2016 ortak-görevinde hem yaş hem cinsiyet tahmini

İngilizce ve İspanyolca dilleri için ele alınmıştır. Cinsiyet tahmininde en yüksek başarı İngilizce ve İspanyolca için sırasıyla 0.5575 ve 0.7031'dir. Yaş tahmininde elde edilen en yüksek başarı ise İngilizce ve İspanyolca için sırasıyla 0.3879 ve 0.3594'tür. Sonuç olarak, literatürde veri kümesine bağlı olarak çok farklı sonuçlar alınmaktadır. Farklı kümelerindeki skorlar direkt karşılaştırılmamakla birlikte, elde ettiğimiz sonuçların düşük olmadığını göstermektedir. Ancak diğer dillerde de olduğu üzere, bu konuda hala daha yüksek performanslı sistemlere ihtiyaç vardır. Paylaştığımız veri kümesinin diğer araştırmacıların daha yüksek performanslı sistemler geliştirmelerine katkı sağlayacağını umuyoruz.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada Türkçe sosyal medya hesaplarının yaş ve cinsiyetini tahmin etmek için önce etiketli bir veri kümesi oluşturulmuştur. Ardından da beş farklı yöntem geliştirilmiş ve oluşturulan veri kümesinde performansları karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modellerde dört farklı öznelik kullanılmıştır: kelime bazlı n-gram, karakter bazlı n-gram, kullanıcıların retweet ettikleri hesaplar ve fastText kelime vektörleri. Bunlara ek olarak, BERT dönüştürücü modelleri incelenmiş ve kullanıcıların tweet'lerinin hangilerinin BERT'te kullanılması gerektiğine dair bir yöntem önerilmiştir.

Yaptığımız deneylerde son tweet'leri kullanarak geliştirilen BerTurk modeli yaş aralığı tahmininde en yüksek başarıyı elde ederken, kelime bazlı tweet filtreleme yöntemi kullanılarak hassas ayarlanmış BerTurk modeli cinsiyet probleminde en yüksek başarıyı elde etmiştir.

Oluşturduğumuz veri kümesini araştırmacılar ile paylaşarak bu konudaki önemli bir açığı kapatmayı planlamaktayız. İleriki çalışmalarda farklı öznelikler kullanılarak daha güçlü modeller geliştirilebilir. Ayrıca ileriki çalışmalarda, diğer dillerdeki veri kümeleri kullanılarak diller-arası ("cross-lingual") modeller üzerine çalışmayı planlamaktayız. Buna ek olarak, deneylerimizde BERT modelleri için seçilen tweet'lerin performansı etkilediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, ileriki çalışmalarımızda bu konuya da eğilip, uzun metinlerin sınıflandırılması için metinlerin hangi kısmının BERT modellerinde kullanılması gerektiği konusunda da çalışmayı düşünmekteyiz. Son olarak, oluşturduğumuz veri kümesinde kullanıcıların meslek bilgileri de yer almaktadır. O yüzden kullanıcıların mesleklerini tahmin eden bir model geliştirmek de gelecek çalışma planlarımız arasında bulunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 programının 120E514 nolu projesi tarafından desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik Oranı (iThenticate): % 6

Referanslar

- [1] Aljazeera, Twitter daily user growth rises as Musk readies to take control, <https://www.aljazeera.com/economy/2022/4/28/twitter-daily-user-growth-rises-as-musk-readies-to-take-control>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [2] Statista, Leading countries based on number of Twitter users as of January 2022, <https://www.statista.com/statistics/242606/number-of-active-twitter-users-in-selected-countries/>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [3] N. Dwi Prasetyo, and C. Hauff, Twitter-based election prediction in the developing world. Proceedings of the 26th ACM Conference on Hypertext & Social Media, pp. 149-158, Guzelyurt, TRNC, Cyprus, 2015.
- [4] A. Rashed, M. Kutlu, K. Darwish, T. Elsayed, and C. Bayrak, Embeddings-Based Clustering for Target Specific Stances: The Case of a Polarized Turkey. Proceedings of the International AAI Conference on Web and Social Media, pp. 537-548, 2021.
- [5] P. Suárez-Serrato, M. E. Roberts, C. Davis, and F. Menczer, On the influence of social bots in online protests. International Conference on Social Informatics, pp. 269-278, Bellevue, USA, 2016
- [6] A. Mislove, S. Lehmann, Y. Y. Ahn, J. P. Onnela, and J. Rosenquist, Understanding the demographics of Twitter users. Proceedings of the International AAI Conference on Web and Social Media, Vol. 5, No. 1, pp. 554-557, Barcelona, Spain, 2011
- [7] C. Bayrak M. Kutlu, Predicting Election Results via Social Media: A Case Study for 2018 Turkish Presidential Election. IEEE Transactions on Computational Social Systems. 2022. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3178052>.
- [8] PAN, Shared Tasks, <https://pan.webis.de/shared-tasks.html>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [9] P. Bojanowski, E. Grave, A. Joulin, and T. Mikolov, Enriching word vectors with subword information. Transactions of the association for computational linguistics, 5, 135-146, 2017. https://doi.org/10.1162/tacl_a_00051.
- [10] J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers), pp. 4171-4186, Minneapolis, MN, USA, 2019.
- [11] H. A. Schwartz, J. C. Eichstaedt, M. L. Kern, L. Dziurzynski, S. M. Ramones, M. Agrawal, A. Shah, M. Kosinski, D. Stillwell, M. E. Seligman, and L. H. Ungar, Personality, gender, and age in the language of social media: The open-vocabulary approach. PloS one, 8 (9), e73791, 2013, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073791>.

- [12] K. Santosh, R. Bansal, M. Shekhar, and V. Varma, Author profiling: Predicting age and gender from blogs. Notebook for PAN at CLEF. 2, 2013.
- [13] W. Deitrick, Z. Miller, B. Valyou, B. Dickinson, T. Munson, and W. Hu, Author Gender Prediction in an Email Stream Using Neural Networks. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications, 4, 169-175, 2012, <https://doi.org/10.4236/jilsa.2012.43017>.
- [14] R. Alroobaea, A. H. Almulihi, F. S. Alharithi, S. Mechti, M. Krichen, and L. H. Belguith, A Deep Learning Model to Predict Gender, Age and Occupation of the Celebrities based on Tweets Followers. CLEF (Working Notes), Thessaloniki, Greece, 2020.
- [15] D. Rao, D. Yarowsky, A. Shreevats, and M. Gupta, Classifying latent user attributes in twitter. Proceedings of the 2nd international workshop on Search and mining user-generated contents, pp. 37-44, Toronto, Canada, 2010.
- [16] L. Flekova, D. Preoțiu-Pietro, and L. Ungar, Exploring stylistic variation with age and income on twitter. Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 2: Short Papers), pp. 313-319, Berlin, Germany, 2016.
- [17] R. Hirt, N. Kühn, and G. Satzger, Cognitive computing for customer profiling: meta classification for gender prediction. Electronic Markets, 29(1), 93-106, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12525-019-00336-z>.
- [18] D. Nguyen, R. Gravel, D. Trieschnigg, and T. Meder, "How old do you think I am?" A study of language and age in Twitter. Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media, Vol. 7, No. 1, pp. 439-448, Ann Arbor, MI, USA, 2013.
- [19] G. K. Mikros and K. Perifanos, Authorship attribution in greek tweets using author's multilevel n-gram profiles. AAAI Spring Symposium: Analyzing Microtext. pp. 17-23, 2013.
- [20] S. Baxevanakis, S. Gavras, D. Mouratidis, and K. L. Kermanidis, A machine learning approach for gender identification of Greek tweet authors. Proceedings of the 13th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, pp. 1-4, Corfu, Greece, 2020.
- [21] K. Alrifai, G. Rebdawi, and N. Ghneim, Arabic Tweep Gender and Dialect Prediction. CLEF (Working notes). Dublin, Ireland, 2017.
- [22] M. Wiegmann, B. Stein, and M. Potthast, Celebrity profiling. Proceedings of the 57th annual meeting of the Association for Computational Linguistics, pp. 2611-2618, Florence, Italy, 2019.
- [23] E. Sezerer, O. Polatbilek, and S. Tekir, A Turkish Dataset for Gender Identification of Twitter Users. Proceedings of the 13th Linguistic Annotation Workshop, pp. 203-207, Florence, Italy, 2019.
- [24] F. Rangel, P. Rosso, M. Koppel, E. Stamatatos, and G. Inches, Overview of the author profiling task at PAN 2013. CLEF Conference on Multilingual and Multimodal Information Access Evaluation, pp. 352-365, Valencia, Spain, 2013.
- [25] G. Park, D. B. Yaden, H. A. Schwartz, M. L. Kern, J. C. Eichstaedt, M. Kosinski, D. Stillwell, L.H. Ungar, and M. E. Seligman, Women are warmer but no less assertive than men: Gender and language on Facebook. PloS one, 11(5), e0155885. 2016, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155885>.
- [26] M. L. Newman, C. J. Groom, L. D. Handelman, and J. W. Pennebaker, Gender differences in language use: An analysis of 14,000 text samples. Discourse processes, 45(3), 211-236, 2008, <https://doi.org/10.1080/01638530802073712>.
- [27] J. W. Pennebaker and L. D. Stone, Words of wisdom: language use over the life span. Journal of personality and social psychology, 85(2), 291, 2003, <https://doi.org/10.1037/0022-3514.85.2.291>.
- [28] P. M. Brandt and P. Y. Herzberg, Wisdom of words? Age differences in language and social media use in job applications. Current Psychology, 1-11, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12144-021-02646-y>.
- [29] D. Nguyen, N. A. Smith, and C. Rose, Author age prediction from text using linear regression. Proceedings of the 5th ACL-HLT workshop on language technology for cultural heritage, social sciences, and humanities, pp. 115-123, Portland, OR, USA, 2011.
- [30] E. Sezerer, O. Polatbilek, Ö. Sevgili, and S. Tekir, Gender prediction from Tweets with convolutional neural networks: Notebook for PAN at CLEF 2018. 19th Working Notes of CLEF Conference and Labs of the Evaluation Forum, CLEF 2018. CEUR Workshop Proceedings. Avignon, France, 2018
- [31] S. E. L. İlhami and D. Hanbay, Ön Eğitimli Dil Modelleri Kullanarak Türkçe Tweetlerden Cinsiyet Tespiti. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 33(2), 675-684, 2021. <https://doi.org/10.35234/fumbd.929133>.
- [32] Stefan Schweter, BERTurk - BERT models for Turkish, <https://zenodo.org/record/3770924>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [33] Scikit-Learn, Scikit-Learn Machine Learning in Python, <https://scikit-learn.org/stable/index.html>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [34] NLTK, Natural Language Toolkit, <https://www.nltk.org>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [35] O. Tunçelli, Turkish Stemmer Python, <https://github.com/otuncelli/turkish-stemmer-python>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [36] A. S. Maiya, ktrain, <https://github.com/amaiya/ktrain>, Erişim Tarihi: 29 Mart 2023.
- [37] É. Grave, P. Bojanowski, P. Gupta, A. Joulin, and T. Mikolov, Learning Word Vectors for 157 Languages. Proceedings of the Eleventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2018), pp. 3483-3487, Miyazaki, Japan, 2018.
- [38] F. Rangel, P. Rosso, M. Montes-y-Gómez, M. Potthast, and B. Stein, Overview of the 6th author profiling task at pan 2018: multimodal gender identification in twitter. Working notes papers of the CLEF, pp. 1-38, Avignon, France, 2018.





Güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı

Rainwater harvesting in solar power plant

Seçil Uysal¹ , Melih Soner Çeliktas^{2,*} 

^{1,2} Ege Üniversitesi, Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada yağmur suyu hasadı hakkında bilgi verilerek, güneş enerjisi santrallerinde uygulanabilirliği senaryolar eşliğinde değerlendirilmiştir. Yağmur suyu hasadının güneş panelleri üzerinde yapılarak, toplanan suyun panel temizliğinde kullanılması hedeflenmektedir. Bu amaçla Türkiye'deki en büyük alana sahip güneş enerjisi santrali seçilerek panel alanlarına düşen yıllık yağış miktarı hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda güneş enerjisi santrallerinin su tüketiminin ne kadarının yağmur suyundan karşılanabileceği 3 farklı senaryo eşliğinde değerlendirilmiştir. Baz Senaryoda temizlik için gereken su miktarını karşılama oranı her gün temizlik yapılması durumunda yaklaşık %76 oranındadır. Bu oran Senaryo 1'de %59, Senaryo 2'de %42 ve Senaryo 3'de %29'ye düşmektedir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Güneş enerji santralleri, Yağmur hasadı, Yenilenebilir enerji, Sürdürülebilir kalkınma hedefleri

1 Giriş

Su, çevresel ve ekonomik açıdan son derece önemli bir kaynaktır. Temiz ve güvenilir suya sahip olmak ise içinde bulunduğumuz zaman diliminde gelişmekte olan ülkeler için büyük yatırımlar anlamına gelmektedir. Ülkelerin su kaynaklarına sahip olması doğrudan ekonomilerini etkilemektedir. Endüstri 4.0 kavramı ve beraberinde gelen dijitalleşmenin hayatımıza girdiği şu zamanda özellikle kimyasal ve biyolojik kirlenme sadece bizi değil, kullanmakta olduğumuz sulara nüfuz ederek tüm varlığımızı tehdit etmektedir. Su temini yöntemlerinin çoğunda enerji tüketimi oldukça yüksek olup, Dünya'daki enerji tüketiminin yaklaşık %10'unu kapsamaktadır [1-4].

Su, alternatifi olmayan bir kaynak olması sebebiyle ülkelerin karşılıklı ilişkilerinde stratejik öneme sahip bir yer tutmaktadır. Dünya'da ve Türkiye'de kullanılabilir su kaynaklarının nüfus artışı ve buna bağlı olarak su tüketiminin artması ile azaldığı görülmektedir. Ayrıca sanayi ve tarımda üretimin artması su tüketimini körüklemektedir.

Dünya sağlık örgütüne göre kişi başı su tüketimi 2 ile 4 litre arasında değişirken yine bir kişinin tükettiği gıda üretimi için harcanan su miktarı günlük ortalama 2 ile 5 ton arasında değişmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın 2015 raporuna göre dünyada 1,4 milyar km³ su bulunuyor. Bu suyun %2.5 tatlı ve %97.5'i tuzlu sudan oluşmaktadır. Tatlı suların da %69.5'i kutuplarda buzul

Abstract

Information about rainwater harvesting was given and its applicability in solar power plants was evaluated with scenarios. Rainwater harvesting is done on solar panels, and it is aimed at using the collected water for panel cleaning. For this purpose, the annual precipitation falling on the panel areas was calculated by choosing the solar power plant with the largest area in Turkey. As a result of the study, how much of the water consumption of the solar power plants can be met from rainwater was evaluated with 3 different scenarios. In the Base Scenario, the coverage rate for the amount of water required for cleaning is approximately 76% if cleaning is carried out daily. This rate drops to 59% in Scenario 1, 42% in Scenario 2 and 29% in Scenario 3.

Keywords: Photovoltaic systems, Solar power plant, Rainwater harvesting, Renewable energy, Sustainable development goals

olarak; %30.1'i yer altında; %0.4'lük kısmı ise yüzey ve atmosfer sularını oluşturmaktadır. Dolayısı ile insanlığın rahatça ulaşabileceği ve temel ihtiyaçlarını karşılayabileceği su, toplam suyun %0.4'ü kadardır. BM Genel Kurulu'nun 2015 yılında aldığı kararda, güvenilir ve temiz içme suyu ile sanitasyona ulaşımının bir "insan hakkı" teşkil ettiği vurgulanan raporda, 2015 rakamlarına göre yeryüzünden 10 kişi içinde 3 kişinin (2.1 milyar) güvenilir içme suyuna ulaşmadığı ifade edilmektedir [6, 7]. Su tüketiminin her geçen gün artmasıyla birlikte yapılan projeksiyon çalışmalarında 2050 yılından sonra yılın en az 1 ayı 5.7 milyar insanın su sıkıntısı çekeceği öngörülmektedir [8].

Sürdürülebilir kalkınma amaçları doğrultusunda su kaynakları yönetiminin doğru planlanması ve kullanılabilir suya erişimin uygulanabilir çözümlerle sağlanması gerekmektedir. Sürdürülebilir su yönetim sistemi Şekil 1'de gösterildiği üzere içme suyunun kalitesini ve miktarını korumayı amaçlayan içme suyu tasarrufu, atık su minimizasyonu ve yağmur suyu yönetimini kapsamaktadır.

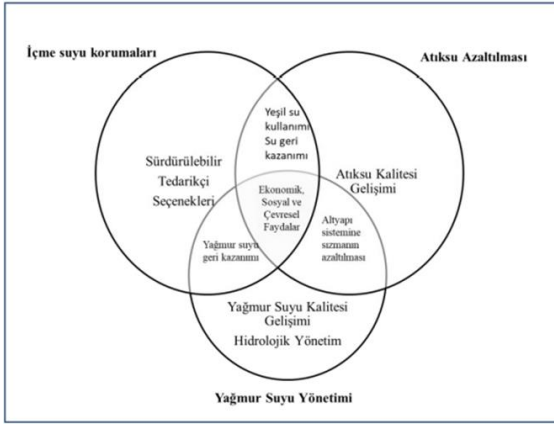
Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) tarafından hazırlanan 17 maddelik 'Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları' programı iklim değişikliği, ekonomik eşitsizlik, sürdürülebilir tüketim, barış ve adalet, gezegenin korunması gibi çözüm bekleyen konuları içermektedir. Tüm bu konular birbirlerini tamamlayıcı niteliklere sahip, gelecek nesillerin kaynaklarının korunması konusunda doğru adımların

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: soner.celiktas@ege.edu.tr (M.S. Çeliktas)

Geliş / Received: 01.06.2022 Kabul / Accepted: 28.02.2023 Yayımlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1124588

atılması için yol gösterici niteliktedir. Yağmur suyu hasadı çalışmaları Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (Şekil 2) içerisinde 6. Madde kapsamında desteklenmektedir [9–16].



Şekil 1. Kentsel su döngüsünün bütünleşik yönetimi [5].



Şekil 2. Sürdürülebilir kalkınma amaçları [17]–[21].

Son yıllarda güneş enerjisi sistemleri (ağırlıklı olarak) elektrik ve ısı üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır [22]. Güneş enerjisi santrallerinde performans, PV (fotovoltaik) modüllerinin dönüşüm verimliliği, meteorolojik etkiler, kirlilik, PV eğim açısı, PV hücre sıcaklığı gibi faktörlerden etkilenmektedir. Araştırmacıların panel verimini artıracak yönde çalışmalara odaklanmasının yanında çeşitli sebeplerle düşen panel verimliliğinin geri kazanılması da önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [23–25]. Bu çerçevede karşılaşılan en büyük problem PV panel camı üzerinde biriken toz ve partikül kirliliği olarak ifade edilebilir [26,27]. PV modülün cam yüzeyine yerleşen toz ve kir ışık iletimini azaltacağı için PV verimi olumsuz etkilenmektedir [28]. Gerçekleştirilen bir çalışmada PV panel yüzeyindeki tozlanma ve kirliliğin verim üzerinde %15 ve üstü bir kayba neden olduğu raporlanmaktadır [29]. Kirliliği oluşturan malzemenin partikül çapının artması ışık iletiminin azalması ile doğru orantılıdır [30]. Ayrıca, hava koşulları, eğim açısı, kirlenme, PV hücre sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve nem gibi faktörler PV modül performansını dolayısı ile sistemden elde edilen güç miktarını olumsuz şekilde etkilemektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda yağmur suyunun PV paneller üzerindeki etkisi incelenmiş ve kısmen verimlilik üzerinde olumlu olduğu gözlemlenmiştir [31–34].

Güneş enerjisi santrallerinde belirli periyotlar ile temizlik yapılmasının performansını etkilediği görülmektedir [30]. Bu sebeple PV yüzeylerin temizliğinde kullanılan suyun

sürdürülebilir olmasının yanında, elde edilen yağmur suyunun santral içerisinde bulunması muhtemel toprak alanların sulanarak tozumanın önüne geçilmesi olanakları göz önünde bulundurulduğunda çalışma kaynak ve işletme verimliliğine olumlu katkı sağlamaktadır.

Türkiye su azlığı yaşayan ülke konumundadır. Devlet Su İşleri'nin su potansiyeli hesapları incelendiğinde Türkiye kişi başına yıllık 1652 m³ su potansiyeline sahiptir. Yapılan öngörü çalışmalarında 2030 yılı için Türkiye nüfusu 100 milyona ulaşacak ve su tüketimi kişi başına yıllık 1120 m³'e düşerek su sıkıntısı yaşayan ülkeler sınıfında yer alacaktır [21].

Tüm canlılar için hayati önem taşıyan su, artan tüketim miktarı, iklim değişikliği, bilinçsiz tüketim gibi sebeplerle su döngüsünü olağan şartlarda tamamlamadığından su kıtlığı konusu gündeme gelmektedir. Sınırlı olan tatlı su kaynaklarının verimli kullanılması su kıtlığı konusunda alınacak önlemlerin başında gelmektedir. Bunun yanı sıra tatlı su eldesi ile ilgili çalışmalar yapılmakta olup, en başında deniz suyundan elde etme çalışmaları gelmektedir. Deniz suyundan tatlı su eldesi gerek maliyet gerekse işletme zorlukları sebebiyle henüz yeterince yaygınlaşmamıştır. Su çevriminin bir parçası olan yağmur suyunun kontrollü bir şekilde biriktirilmesiyle tatlı su eldesi bilinen en kolay yöntemdir. Özellikle son yıllarda teknolojinin ilerlemesine bağlı olarak yağmur suyu hasadına yönelik yatırımların arttığı görülmektedir [35, 36].

Yağmur suyu hasadı tarihin bilinen en eski su tedarik yöntemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır [37, 38]. Teknolojik ilerlemelerle birlikte gelişen yağmur suyu hasat yöntemleri çoğu ülke tarafından gerek çevre gerekse iklim değişikliğinin yarattığı baskıyı hafifletmek adına yatırım yapılan alanlardan biri haline gelmektedir [39–41].

Bu çalışmanın amacı panel temizlikleri için su tüketiminin yağmur sularından karşılanarak ekonomik ve çevreci bir yaklaşımın değerlendirilmesidir. Güneş Enerjisi Santrallerinde bulunan panellerin yüzey ve eğimlerinin yağmur suyu hasadına uygun olması bu çalışmanın uygulanabilirliği açısından önemlidir. Panellerin düzenli olarak temizlenmesi de üretim verimini artıracaktır.

Türkiye'de güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı potansiyeli ortaya çıkarmak amacıyla hesaplama ve pilot çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada Konya'da bulunan Türkiye'nin en büyük Güneş Enerjisi Santrali'nde yağmur suyu hasadı yapılması ve toplanan suyun kullanımı ele alınmıştır. Toplanan yağmur sularının kullanımı, panel temizliği amacıyla su tüketimine bağlı olarak farklı senaryolar eşliğinde değerlendirilmiştir. Yağmur suyu hasadı yapılacak alanın büyük olması sebebiyle toplanan fazla suyun aynı zamanda tozumu önleme amaçlı arazi sulama ve işletme binalarında kullanılabilirliği tartışılmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu makalede, Konya ilimizde bulunan ve en büyük kurulu güce sahip Güneş Enerjisi Santrali dikkate alınmış olup, en büyük santralin meteorolojik ve fiziksel verileri kullanılarak örnek hesaplama gerçekleştirilecektir. İlgili sistemde yağmur suyu hasadı hesaplanacak panellerden elde edilen yağmur suyu ile temizlenmesinin değerlendirilmesi

yapılmıştır. Böylece Güneş Enerjisi Santrallerinde kullanılan su tüketiminin azaltımı değerlendirilmiştir. Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] dosyasından temin edilen PV modül bilgileri Tablo 1’de verilmektedir.

Tablo 1. Konya ilinde bulunan en büyük GES’in özellikleri

Proje Kapasitesi	1.348 MWp
PV Modül Sayısı	3.378.890 adet
PV Modül Alanı	6.862.165 m ²
Yapısal hata payı	% 10
Temizlenecek Alan	22.645.143,8 m ² /yıl
Su Tüketimi (Baz Senaryo)	3.86 m ³ /MWp
Yıllık Toplam Su Tüketimi	15.600 m ³

Türkiye’nin en büyük Güneş Enerjisi Santrali Konya Karapınar’da bulunmakta olup, 3.378.890 PV panelle, yaklaşık 19.2 km² alana kurulumu tamamlanacaktır. Kurulumu tamamlandığında toplam kapasitesi 1348 MWp olacak santralin, 2019 yılında mobilizasyon çalışmaları, Mart 2020’de ise inşaat faaliyetlerine başlanmıştır. İnşaat faaliyetlerinin Ağustos 2023 tarihine kadar devam etmesi öngörülmekle birlikte Eylül 2020’de ilk Güneş modülleri devreye alınmıştır. Santral Mayıs 2021’den beri 700.000 adet panel ve 271 MWp güç ile çalışmaktadır [49].

Güneş panelleri alanlarına Güneş Enerjisi Santralinin Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] dosyasından erişilmiş olup, panellerin planlanan yıkama sıklıkları, tüketilecek su miktarları ile ilgili bilgiler Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] dosyasından temin edilmiştir. Bu bilgilere ek olarak alana düşen yağmur miktarı bulunmuştur. Bu veriler için Meteoroloji Genel Müdürlüğü veri bankası kullanılmış olup Konya ili sınırlarında 1991-2020 yılları arasındaki periyodik yağışlı gün ve yağış ortalaması bilgileri Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. (1991-2020) Konya iline ait yağışlı gün sayısı ve yağış miktarı ortalaması (mm)[55]

2.1 Güneş enerjisi santralleri güç hesaplamaları

Günümüzde birçok güneş santrali ya iyi tasarlanmadığı ya da iyi işletilmediği için verimsiz çalışmaktadır. Bu santrallerin verimliliklerini artırmak ve elde edilen güç miktarını iyileştirmek için periyodik bir şekilde panel temizliği, termal izleme, gölge ölçümü, kış şartlarında kar

yükünün kaldırılması, sistem bilgilerine uzaktan erişim ve müdahale, kırık panellerin kontrolü, kabloların çevresel etkilerden ve kemirgenlerden korunması gibi birçok parametre takip edilmelidir. Hesaplamalarda kullanılan değişkenler ve denklemleri şu şekilde verilebilir,

Güç parametresine etki eden değişkenler Denklem (1)’de verilmektedir. Güneş paneli verimliliğine etki eden parametreler Denklem (2)’de ve Temizlenmiş veya temiz bir modülün aldığı ışıma ise Denklem (3)’de verilmektedir.

$$P = I_p V_p \quad (1)$$

Burada, P, Gücü (W), I_p akım değerini (A) ve V_p Voltaj (V) değerini ifade etmektedir.

$$\eta = \frac{V_p I_p}{I_t A_{pv}} 100\% \quad (2)$$

Burada, η (%) güneş paneli verimini, A_{pv} (m²) panel alanını, I_t (W/m²), toplam güneş ışımasını ifade etmektedir.

$$I_{pv} = I_{doğrudan} \cos\phi + I_{difüz} \quad (3)$$

Burada, I_{pv} (W/m²), panele gelen ışıma değerini, I_d (W/m²) doğrudan gelen ışıma değerini, ve I_{difüz} (W/m²) ise Difüz ışıma değerini ifade etmektedir.

2.2 Yağmur suyu hasadı hesaplamaları

Yağmur suyu tutma sistemleri veya hasadı konusunda birçok kılavuz ve Standard yayımlanmıştır [42, 43]. Ayrıca farklı model ve yaklaşımlarda geliştirilmiştir [44-47]. Yağmur suyu hasadıyla elde edilecek su miktarı hesaplanırken, çatı katsayısı (bu çalışma için pv yüzeyi kabul edilmiştir), filtre etkinlik katsayısı, konuma ait yağış miktarları ve hasadın yapılacağı toplama alanı gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Yağmur suyu hasadı doğal çevre parametreleri ve yapay çevre parametrelerinden etkilenmektedir.

Yağmur suyu hasadında yüzeye düşen yağışın tamamının depolanması mümkün değildir. Bu durum fiziksel ve yapay çevre parametreleri ile açıklanabilir. Fiziksel çevre parametreleri; doğal etmenlerle meydana gelir ve insan eliyle herhangi bir şekilde değiştirilemez. Bölgesel iklim özelliklerine göre bu parametreler yağış miktarı, süresi, sıklığı ile rüzgâr yönü ve hızıdır. Yapay çevre parametreleri ise tasarım ve imar yönetmelikleri kapsamında yapıyı inşa eden kişiler tarafından, yapının inşa edileceği çevrenin özellikleri dikkate alınarak belirlenen kararlardır. Bunlar; çatıların yönelimi, çatı formu ve su toplama alanı, eğim oranı, saçaklar, yağmur olukları ve çatı kaplama malzemeleridir [48]. Çatı etkinlik katsayısı yağmur suyunun toplanacağı yüzeyin cinsine göre değişmekte olup, tüm malzemeler için dış ortam koşulları eşit olduğu varsayımıyla, su emme oranı, pürüzlülük, yıpranmışlık gibi durumlara göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışma için ilgili sabitler içerisinde PV yüzeyi için ‘cam’ sabiti kullanılmıştır. Filtre etkinlik katsayısı ise, yüzeyden toplanacak yağmur suyunun, görünen katı maddelerden ayrıştırılması için geçirilecek olan ilk filtrenin verimlilik katsayısıdır. Bu verimlilik katsayısı

yağmur suyunun filtreden geçmesi sırasında yaşanan kayıp göz önüne alınarak belirlenmektedir.

Yağmur suyu miktarı hesabı **Denkleme 4'e** göre hesaplanmıştır:

$$\sum YSM = A \cdot m \cdot c_s \cdot c_f \cdot q \quad (4)$$

Burada PV yüzey alanı (A), üretici firmanın çevresel ve sosyal etki değerlendirmesi [69] dosyasından alınmıştır. Yağış miktarı m (mm/m³) ile gösterilmiştir. Çatı (yüzey) etkinlik katsayısı (c_s), cam yüzey dikkate alınarak 0-9 olarak belirlenmiştir. Filtre etkinlik katsayısı (c_f), toplanan yağmur suyunun görünen katı partiküllerden ayrıştırılması için geçirilen filtrenin verimlilik katsayısı olarak bilinmektedir ve bu çalışma için 0.9 olarak kabul edilmiştir. Kayıp katsayısı (q) bu çalışma için 0.8 olarak kabul edilmiştir [70,71].

2.3 Senaryo analizi

Gerçekleştirilen çalışmada fotovoltaik panellerin temizlenmesi için baz senaryonun yanında 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Hesaplamalar yapılırken toplanan su miktarının mevcut MWp kapasitesi ve birim MWp başına m³ olarak kullanılacak su miktarları farklı senaryolarla hesaplanarak oranlanmıştır. Baz senaryo firmanın su tüketimini (kendi içinde çelişkiler içerse de) Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] dosyası kapsamında sunmuş olduğu MWp başına tüketilecek su miktarı olan 3.86 m³ olarak kabul edilmiştir. Diğer senaryolar için seçilen 5, 7 ve 10 m³ değerleri ise şu an temizlik için kullanılan cihazların teknolojik durumu dikkate alınarak oluşturulmuştur.

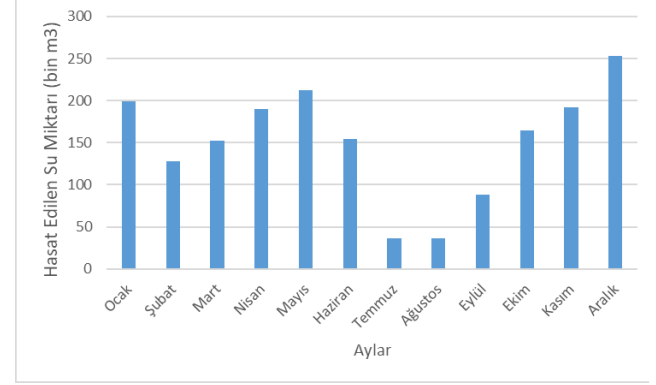
Senaryo analizlerinde MWp başına kullanılacak su miktarları değiştirilerek yağmur suyu hasadı ile toplanan su miktarı ile değerlendirilmiştir (**Şekil 5**).

3 Bulgular ve tartışma

Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda yağmur suyu hasadı miktarı güneş enerjisi santrali için aylık ortalama 121 bin m³ olarak hesaplanmıştır. Fakat yağış rejimi aydan aya farklılık gösterdiğinden hesaplamaların aylık olarak dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle ilgili bölgenin yaz aylarında daha az yağış alması ve tozların sebep olduğu kirlilikten kaynaklanan asıl ihtiyacında yaz aylarında ortaya çıkması sebebiyle bir optimizasyona ihtiyaç duyulmaktadır (**Şekil 4**). Bu nedenle 3 ayda bir yapılacak periyodik temizliklerin yağış durumuna göre planlanması, depolarda yağmur suyunu bekletecek uygun koşulların sağlanması, yağışın az olduğu dönemlerde toprak yollarda oluşacak tozumu önlemek amacıyla sulama çalışmaları gibi optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır.

Yağmur hasadı ile elde edilen suların depolanması ile su ihtiyacının yoğunlaştığı dönemlerdeki temizleme problemlerine çözüm üretilebileceği bilinmektedir. Kurulu güç ve MWp dikkate alınarak yapılan hesapta ve yağmur hasadı ile elde edilen sular için üç farklı senaryo analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler baz senaryo olarak ifade edilen ilgili firmanın Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] dosyası kapsamında sunmuş olduğu MWp başına tüketilecek su miktarı olan 3.86 m³ olarak

kabulünden yola çıkılarak oluşturulmuştur. Bu kapsamda, hazırlanan senaryolarda MWp başına tüketilecek su miktarları piyasa koşullarında var olan sistemlerin tükettiği su miktarlarına göre tesis edilmiştir (**Şekil 5**).



Şekil 4. Hasat edilen su miktarı (bin m³)

Baz Senaryoda temizlik için gereken su miktarını karşılama oranı her gün temizlik yapılması durumunda yaklaşık %76 oranındadır. Bu oran Senaryo 1'de %59, Senaryo 2'de %42 ve Senaryo 3'de %29'ye düşmektedir. Elde edilen bu oranlar her gün temizlik yapılması durumunda geçerli olan oranlardır. Her gün temizlik yapılması ekonomik açıdan olduğu gibi teknik açıdan da oldukça maliyetli ve zordur. Yağışın bol olduğu mevsim koşullarında gerekli değildir. Firmanın Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi [69] raporunda öngördüğü temizlik için gerekli su miktarı yağmur suyu hasadı ile rahatlıkla karşılanabileceği gibi temizlik periyodunun artırılması da söz konusu olabilmektedir. Yağmur suyunun hasadı ve depolanması için gerekli yatırımların yapılması ile güneş panellerinden elde edilecek güç veriminde %5 ile 7 arasında bir iyileşme söz konusudur. Bu çalışma kapsamında ele alınmış olmasa da ilgili yatırım için maliyet analizi yapıldığında verim iyileşmesine bağlı olarak çok kısa sürede geri dönüş yapacağı görülmektedir.

Temiz su tüm dünya için risk altında bulunan çağın en önemli kaynağı olarak görülmektedir. Yağmur suyu hasadı en umut verici alternatif su kaynaklarından biridir [56]. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında ülkemizin mevcut durumda en büyük güneş enerjisi santralının bulunduğu Konya ili hesaplamalara dahil edilmiştir. Bu çalışma tüm bölge ve illerde bulunan tesisler için ayrı ayrı hesaplanarak uygulanabilirliği değerlendirilebilir. Türkiye'de yağmur suyu hasadı ile ilgili yönetmelikler bulunmakta olup, yapıların çatı sistemlerinden yağmur suyu toplanması ile ilgili usul ve esasları içermektedir [57,58]. Ancak güneş enerjisi santrallerinin yüzey alanlarının kurulu güçle de doğru orantılı olarak çatı sistemlerinden daha geniş olması toplanacak su miktarını artırmaktadır. Henüz ilgili yönetmeliklerin güneş enerjisi santrallerinden yağmur suyu hasadı yapılmasını yasal zorunluluklar çerçevesinde ele almamış olması bu sistemin yaygınlaşmasının önündeki direnç olarak kabul edilebilir.

Gerçekleştirilen çalışmada ortaya çıkan su toplama miktarı, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü

tarafından yayınlanan “Konya ili 2019 yılı çevre durum raporu” içerisinde 32.000.000 m³ su tutma kapasitesi belirtilen Altınapa barajının yaklaşık %4.5’lik kısmına karşılık gelmektedir [59]. Bu miktar aynı zamanda ülkemizdeki tüm elektrik santrallerinin soğutmasında kullanılan su miktarının %1’ne karşılık gelmektedir [60]. Çalışma sınırları seçilen bölgenin yağış verimi ve kullanım senaryoları eşliğinde belirlenerek, pompa ve güç hesabı ile ilgili hesaplamalar çalışmaya dahil edilmemiştir. Toplanan yağmur suyunun kullanımı için gerekli olan pompa gücü ve enerji talebi ile işletme maliyeti hesaplanabilecektir. Sesli vd. [61]. tarafından yapılan çalışma ile yağmur suyu kullanılarak damla sulama sisteminin kurulması ve enerji ihtiyacının güneş enerjisinden karşılanması için kurulan sistemin tasarım, ekipman ve maliyet analizi yapılmıştır.

Şevik ve Aktaş [62], gerçekleştirdikleri çalışmada 600 kW gücündeki bir güneş enerjisi tesisinde yağmur suyu hasadı, pv temizliği, kar yükünün performans etkisi gibi incelemelerde bulunmuşlardır. Araştırma bulgularında bir senelik kirliliğin %5.66’lık bir güç kaybına sebep olduğu ortaya konulmuştur. Sadece yağmur suyunun herhangi bir ilave temizleme olmaksızın güce etkisinin %0.94 ile sınırlı kaldığı görülmüştür. Pilot ölçekte yapılan su hasadı çalışması ile 118 m³/yıl su toplanmış ve tesisin tamamına uygulandığında 1646 m³/yıl olarak hesaplanmıştır. Burada elde edilen bulguların lokasyon özellikleri dikkate alındığında gerçekleştirilen bu çalışma tutarlı olduğu görülmektedir.

Karar destek sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar ile yağmur suyu toplama sistemlerinde optimum tank boyutunun belirlenmesi önemli bir adım olarak görülmektedir [63,64]. Optimum koşulların belirlenmesi için ilgili lokasyona özel deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Amos vd. [37], Avustralya ve Kenya örnekleri üzerinden gerçekleştirdikleri çalışmalarında çatı üstü yağmur suyu hasadının özellikle Birleşmiş Milletler Kalkınma hedeflerinden 3 ana başlığa hizmet ettiğini ifade etmişlerdir. Bu başlıklar “Sağlık ve kaliteli yaşam”, “Sürdürülebilir şehirler ve topluluklar” ve “Yoksulluğa son” şeklindedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise bunlara ilaveten “Erişilebilir ve temiz enerji” ve “Temiz su ve sanitasyon” başlıklarına katkı yaptığı görülmektedir.

İklim değişikliğinin tarım üzerindeki etkileri artık tüm dünya tarafından bilinen bir gerçek haline gelmiştir [66,67]. Artan nüfus ve buna bağlı enerji, su ve gıda taleplerinin artmasıyla birlikte geliştirilen alternatiflerden biri olan agrivoltaik kavramı, artan yapılaşma sebebiyle yaşanan arazi temini sıkıntısının da önüne geçmeyi hedeflemektedir. Agrivoltaik sistemler güneş panellerinin tarım arazileri üzerine kurularak arazilerin birden fazla amaçla kullanılabilirliği sağlanmaktadır. Agrivoltaik sistemler sayesinde güneş panellerinin altında yetişen bitkilerin sulanma süresi uzamaktadır. Yağmur suyu hasadından elde edilen su, yıkamanın yanı sıra agrivoltaik sistemlerde de sulama amaçlı kullanılabilir. Ayrıca güneş panelleri altında bitkilerin sulanması ile oluşan nemlilik panellerin aşırı ısınmasının önüne geçerek verim artışı sağlamaktadır. Bu karşılıklılık esasına dayanan (mutualist) sisteme yağmur

suyu hasadının eklenmesiyle sistem maliyet ve kaynak kullanımında daha verimli hale gelerek süreklilik kazanacaktır [68]. Bu sebeple agrivoltaik sistemlerde de panellerden yağmur suyu hasadı yapılması faydalı olabilecektir.

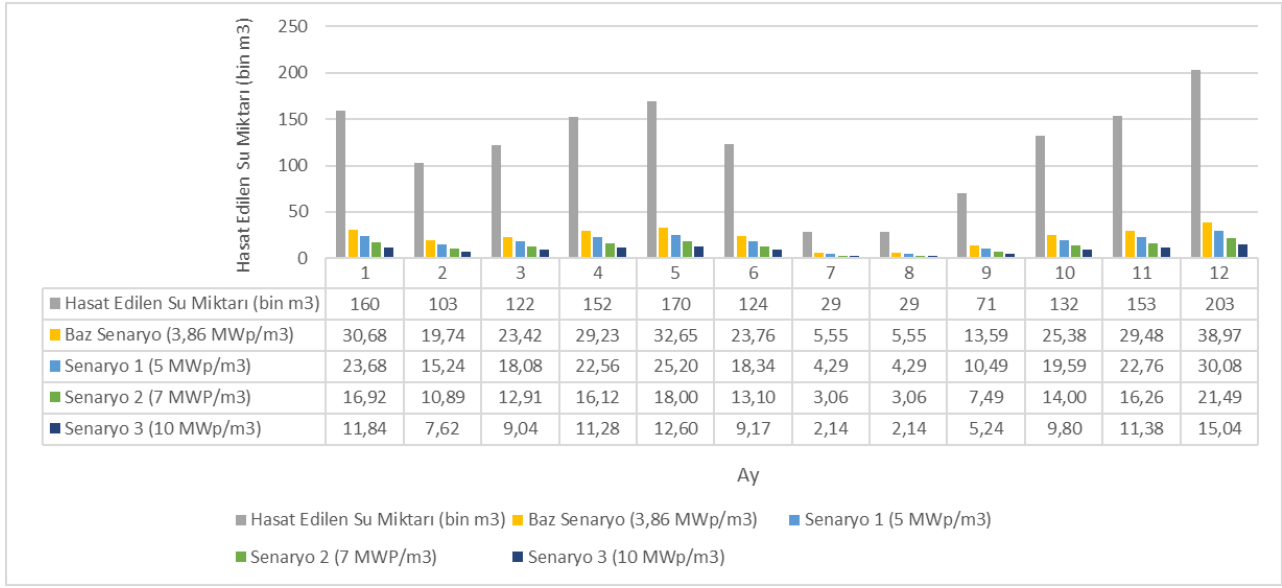
4 Sonuçlar

TEİAŞ Eylül 2021 kurulu güç raporuna göre Türkiye’de GES potansiyeli 8151 adet ve 7534.3 MW olarak belirlenmiştir [49,65]. Türkiye’nin Güneş Enerjisi potansiyelinin yüksek olması ve başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak tercih edilmesi Güneş Enerjisi Santrallerinde yağmur hasadını kullanılabilmektedir. Dünya’daki toplam PV kurulu güç kapasitesi yaklaşık 700 GW olarak belirlenmiştir. GES kurulu bölgesine göre uygun yağış miktarlarında bu sistemin uygulanmasıyla Dünya çapında büyük ölçüde su tasarrufu sağlanabilir [51,52].

Güneş panelleri üzerine düşen yağış, panel sisteminde bulunan eğimli yüzey aracılığıyla sisteme eklenecek yağmur suyu toplama kanallarına iletilerek, depo sistemine taşınacaktır. Mevcut güneş paneli sistemlerine eklenecek toplama kanalları tek bir hat üzerinden depo sistemine bağlanacaktır. Yağmur suyu ile depoya taşınabilecek materyallerin engellenmesi için depo girişinde basit filtre kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca mevsimsel şartlar göz önünde bulundurularak, kış aylarında gerçekleştirilecek muhtemel donmaya karşı depo yalıtılabilir.

Bu sistemin kurulmasının en büyük kazanımının su tasarrufu olmasının yanında, su taşımada maliyet azaltımı, kırsal alanlarda kurulan GES’ler için su temini konusunda yaşanabilecek olası sorunların önüne geçmesi konularında da fayda sağlamaktadır. Ayrıca yıkama suyu için şebeke çekilmeyen GES bölgelerine suyun tankerlerle taşınması durumu söz konusudur. Tankerlerle suyun taşınması sırasında oluşacak egzoz gazlarının önüne geçilecek karbon ayak izinin azaltılmasında da fayda sağlayacaktır.

Yapılan bazı çalışmalarda günlük panel temizliğinin yaklaşık verimi %5 civarında artırıldığı görülmektedir [62]. GES PV Modül temizliği için yıllık toplam su tüketimi 15600 m³ olup, toplanan yağmur suyu (1447 bin m³/yıl) yaklaşık olarak bu değerın 93 katıdır. Toplanan su yıkama ve toz önleme amacıyla kullanılabilir. Kuru günlerde tesis çevresindeki toprak zeminin rüzgâr etkisiyle tozuma oluşturmasını ve panellerin kirlenmesini önlemek amacıyla zemin sulanarak tozuma önleme çalışmaları gerçekleştirilebilir. Bunların dışında toplanan su ilgili arıtma yöntemleri uygulanarak tesis içerisindeki işletme binalarına kullanma suyu olarak iletilebilir. Özellikle su kaynağı konusunda sıkıntı çeken bölgeler için, toplanan yağmur suları ağaçlandırma ve tarım çalışmalarını destekleyecektir. İklim değişikliği için alınan önlemler kapsamında karbon azaltımı konularında yenilenebilir enerjinin kullanılmasının yanı sıra karbon yutakları oluşturulması da oldukça önemlidir. Bu sebeple orman alanlarının oluşturulması çalışmalarında Güneş enerjisi santrallerinde yağmur suyu hasadı yapılarak elde edilen su kullanılabilir.



Şekil 5. PV panel temizleme senaryo analizi: Hasat edilen suyun günlük karşılama oranı

Bu sistemin GES'ler üzerinde uygulanmasıyla birlikte yenilenebilir kaynaklar ile elde edilen enerjinin tamamen çevreci ve sürdürülebilir olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, özellikle çatı üstü kurulumlardan elde edilen suyun ekonomik olarak kurum içerisinde kullanılmasına yönelik araştırma çalışmalarına da ağırlık verilmesi gerilmektedir [37, 53, 54].

GES'lerde panel temizliği yapılırken panel yüzeyinde leke oluşmaması için herhangi bir kimyasal veya temizleyici kullanılmamaktadır [72,73,74]. Temizlik sırasında panel yüzeyinden akan su topraktan süzülerek yeraltı sularına karışacaktır. Bu sebeple suyun olağan döngüsünde değişiklik olmayacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] R. Şengür-Taşdemir, ve İ. Koyuncu, Membran Teknolojileri ile Alternatif Su Temini: Desalinasyon ve Atıksu Geri Kazanımı, Sürdürülebilir Çevre Dergisi, 1(1), 18–30, 2021.
- [2] S. Sekin, Dünya Tatlı Su Rezervlerinin Coğrafi Dağılımı, Marmara Coğrafya Dergisi, 1, 247–256, 2013.
- [3] A. Boretti and L. Rosa, Reassessing the projections of the World Water Development Report, npj Clean Water, 2(15), 2019, <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- [4] M.S. Çeliktas, G. Sonlu, S. Özgel, Y. Atalay, Endüstriyel Devrimin Son Sürümünde Mühendisliğin Yol Haritası, 56 (662), 24–34, 2015.
- [5] N. Saygin and P. Ulusoy, Stormwater Management and Green Infrastructure Techniques for Sustainable Campus Design, Journal of Polytechnic, 14 (3), 223–231, 2011, <https://doi:10.2339/2011.14.3>

- [6] United Nations, United Nations Climate Change Summit 2019, 2019 Retrieved from <http://sdg.iisd.org/events/un-2019-climate-summit/>
- [7] WWP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1711Water%20for%20a%20Sustainable%20World.pdf>
- [8] TSKB, Dünya su haftasında sürdürülebilir kalkınmada suyun önemine dikkat çekiyor, 2021 Retrieved From <https://www.tskb.com.tr>
- [9] L. Zgheib, N. Karam, and N. Farajalla, SDGs and water management in the MENA region: A comparative analysis of Jordan, Lebanon and Tunisia, Orient, 61(1), 2020.
- [10] R. R. Weerasooriya, et al., Industrial water conservation by water footprint and sustainable development goals: a review, Environment, Development and Sustainability, 23(9), 2021, <https://doi:10.1007/s10668-020-01184-0>
- [11] M. Berger et al., Advancing the Water Footprint into an Instrument to Support Achieving the SDGs–Recommendations from the “Water as a Global Resources” Research Initiative (GRoW), Water Resources Management, 35 (4), 2021, <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02784-9>
- [12] R. Bain, R. Johnston, and T. Slaymaker, Drinking water quality and the SDGs, npj Clean Water, 3(1), 2020, <https://doi:10.1038/s41545-020-00085-z>
- [13] D. Cheng et al., Inclusive wealth index measuring sustainable development potentials for Chinese cities, Global Environment Change, 72, 2022, <https://doi:10.1016/j.gloenvcha.2021.102417>
- [14] G. Halkos and G. Argyropoulou, Using environmental indicators in performance evaluation of sustainable

- development health goals, *Ecological Economics*, 192, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107263>
- [15] L. Quinlivan, D. V. Chapman, and T. Sullivan, Validating citizen science monitoring of ambient water quality for the United Nations sustainable development goals, *Science of the Total Environment*, 699, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134255>
- [16] G. Mersin, and M.S. Çeliktas, Integration of Renewable Energy Systems. In: Fathi, M., Zio, E., Pardalos, P.M. (eds) *Handbook of Smart Energy Systems*. Springer, Cham. 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_93-1
- [17] United Nations Development Programme, World Energy Assessment. Energy and the challenge of Sustainability. UNDP, 2000. Retrieved From <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- [18] “Sustainable Development Goals, SDGs,” 2021. Retrieved From <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- [19] UNDP, “UNDP Strategic Plan, 2018-2021,” Exec. Board United Nations Dev. Program. United Nations Popul. Fund United Nations Off. Proj. Serv., vol. 18438, no. October 2017, 2017.
- [20] S. Dağdeviren, Sürdürülebilir Kalkınma Çerçevesinde Türkiye’de Çevre Politikaları, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalı İktisat Yüksek Lisans Programı, Türkiye, 2019.
- [21] UNDP, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları Nelerdir?, 2022, Retrieved From <https://turkiye.un.org/tr/sdgs>
- [22] B. Maurya, Global Overview of Large-Scale Photovoltaic System and Its Electrical Energy Storage Implementation, in *Smart Innovation, Systems and Technologies*, (239), 2022, https://doi.org/10.1007/978-981-16-2857-3_16
- [23] F. Kaya, G. Şahin, and M. H. Alma, Investigation effects of environmental and operating factors on PV panel efficiency using by multivariate linear regression, *International Journal of Energy Research*, 45(1). 554-567, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.5717>
- [24] R. Stropnik and U. Stritih, Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM, *Renewable Energy*, 97, 671-679, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.011>
- [25] S. K. Marudai pillai, B. Karuppudayar Ramaraj, R. K. Kottala, and M. Lakshmanan, Experimental study on thermal management and performance improvement of solar PV panel cooling using form stable phase change material, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 45(1), 160-177, 2023 <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.18064092020>
- [26] W. Liu, C. Liu, Y. Lin, L. Ma, F. Xiong, and J. Li, Ultra-short-term forecast of photovoltaic output power under fog and haze weather, *Energies*, 11(3), 528, 2018, <https://doi.org/10.3390/en11030528>
- [27] S. Lasfar et al., Study of the influence of dust deposits on photovoltaic solar panels: Case of Nouakchott, *Energy for Sustainable Development*, 63, 7-15, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.05.002>
- [28] E. Şen ve M. S. Çeliktas, A Review of PV Cooling and Thermal Energy Storage In PV/T Systems Based Phase Change Materials, *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(1), 55-76, 2022, <https://doi.org/10.20854/bujse.1071145>
- [29] J. K. Kaldellis and A. Kokala, Quantifying the decrease of the photovoltaic panels’ energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal, *Energy*, 35 (12), 4862-4869, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.002>
- [30] D. Thevenard, Review and recommendations for improving the modelling of building integrated photovoltaic systems, in *IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005*, 2005.
- [31] C. Del Pero, N. Aste, and F. Leonforte, The effect of rain on photovoltaic systems, *Renewable Energy*, 179, 1803-1814, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.130>
- [32] E. G. Luque, F. Antonanzas-Torres, and R. Escobar, Effect of soiling in bifacial PV modules and cleaning schedule optimization, *Energy Conversion and Management*, vol. 174, 615-625, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.065>
- [33] W. T. Chong et al., Performance assessment of a hybrid solar-wind-rain eco-roof system for buildings, *Energy and Buildings*, 127, 1028-1042, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.065>
- [34] R. Appels et al., Effect of soiling on photovoltaic modules, *Solar Energy*, 96, 283-291, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.07.017>
- [35] M. Yalılı Kılıç ve M. N. Abuş, Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı, *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilim. Derg.*, 4(2), 209-215, 2018, <https://doi.org/10.24180/ijaws.426795>
- [36] A. Campisano et al., Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives, *Water Research*, 115, 195-209, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
- [37] C. C. Amos, A. Rahman, and J. M. Gathenya, Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A Review of the Global Situation with a Special Focus on Australia and Kenya, *Water (Switzerland)*, 8(4), 149, 2016, <https://doi.org/10.3390/w8040149>
- [38] R. A. AbdelKhaleq and I. Alhaj Ahmed, Rainwater harvesting in ancient civilizations in Jordan, *Water Supply*, 7(1), 85-93, 2007, <https://doi.org/10.2166/ws.2007.010>
- [39] Y. Gao et al., Thermal performance improvement of a horizontal ground-coupled heat exchanger by rainwater harvest, *Energy and Building*, 110, 302-313, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.030>
- [40] E. Kucukkaya, A. Kelesoglu, H. Gunaydin, G. A. Kilic, and U. Unver, Design of a passive rainwater harvesting system with green building approach, *International*

- Journal of Sustainable Energy, 40(2), 175-187, 2021, <https://doi:10.1080/14786451.2020.1801681>
- [41] T. Abbasi and S. A. Abbasi, Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097-2167, 2011, <https://doi:10.1080/10643389.2010.497438>
- [42] M. A. Alim, A. Rahman, Z. Tao, B. Samali, M. M. Khan, and S. Shirin, Suitability of roof harvested rainwater for potential potable water production: A scoping review, *Journal of Cleaner Production*, 248, 2020, <https://doi:10.1016/j.jclepro.2019.119226>
- [43] C. M. Silva, V. Sousa, and N. V. Carvalho, Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences, *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 21-34, 2015, <https://doi:10.1016/j.resconrec.2014.11.004>
- [44] D. J. Sample and J. Liu, Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture, *Journal of Cleaner Production*, 75, 174-194, 2014, <https://doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.075>
- [45] Y. R. Chiu, C. H. Liaw, and L. C. Chen, Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities, *Renewable Energy*, 34(3), 492-498, 2009, <https://doi:10.1016/j.renene.2008.06.016>
- [46] M. Semaan, S. D. Day, M. Garvin, N. Ramakrishnan, and A. Pearce, Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review, *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 2020, <https://doi:10.1016/j.rcrx.2020.100033>
- [47] D. Roman, A. Braga, N. Shetty, and P. Culligan, Design and modeling of an adaptively controlled rainwater harvesting system, *Water (Switzerland)*, 9(12), 974, 2017, <https://doi:10.3390/w9120974>
- [48] Z. Ö. Bektaş, İ., Dinçer ve A. Parlak Biçer, Değişen İklim Koşullarında Çatı Kaplama Malzemelerinin Verimliliğinin İncelenmesi – Safranbolu Örneği, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 33(3), 35–53, 2017, Retrieved From <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesfen/issue/35954/403437>
- [49] TEIAS, “Kurulu güç raporları,” 2021, Retrieved From <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>
- [50] U. Şahin, Forecasting of Turkey’s electricity generation and CO2 emissions in estimating capacity factor, *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(1), 56-65, 2019, <https://doi:10.1002/ep.13076>
- [51] IRENA, Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage Innovation Landscape Brief, International Renewable Energy Agency, 2020, Retrieved From https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Innovative_PHS_operation_2020.pdf
- [52] A. Jäger-Waldau, Snapshot of photovoltaics - March 2021, *EPJ Photovoltaics*, 12, 2, 2021, <https://doi:10.1051/epjpv/2021002>
- [53] C. Matos, I. Bentes, C. Santos, M. Imteaz, and S. Pereira, Economic Analysis of a Rainwater Harvesting System in a Commercial Building, *Water Resources Management*, 29(11), 3971–3986, 2015, <https://doi:10.1007/s11269-015-1040-9>
- [54] P. E. Abas and T. M. I. Mahlia, Techno-economic and sensitivity analysis of rainwater harvesting system as alternative water source, *Sustainability*, 11(8), 2365, 2019, <https://doi:10.3390/su11082365>
- [55] T.C. Çevre, Şehircilik Ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2021 Retrieved From <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H>
- [56] C. M. Silva, V. Sousa ve N. V. Carvalho, Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences, *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 21-34, 2015, <https://doi:10.1016/j.resconrec.2014.11.004>
- [57] RG, Resmi Gazete (2017). Yağmursuyu toplama, depolama ve deşarj sistemleri hakkında yönetmelik, 30105 sayılı, 23 Haziran 2017.
- [58] RG, Resmi Gazete (2021). Planlı alanlar imar yönetmeliğinde değişiklik Yapılmasına dair yönetmelik, 31538 Sayılı, 11 Temmuz 2021.
- [59] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Konya ili 2019 yılı çevre durum raporu, 2019 Retrieved From https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/2019_cdr_konya-20200722143120.pdf
- [60] B. El-Khozondar, ve M. Köksal, Elektrik Üretiminde Su Tüketimi ve Co₂ Salımı İlişkisi, VII. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, Hava Kirlenmesi Araştırmaları ve Denetimi Türk Milli Komitesi, Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 1-3 Kasım 2017-Antalya
- [61] E. Sesli ve diğerleri, Yağmur Suyu Kullanan Güneş Enerjili Damla Sulama Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2019
- [62] S. Şevik ve A. Aktaş, Performance enhancing and improvement studies in a 600 kW solar photovoltaic (PV) power plant; manual and natural cleaning, rainwater harvesting and the snow load removal on the PV arrays, *Renewable Energy*, 181, 490-503, 2022, <https://doi:10.1016/j.renene.2021.09.064>
- [63] C. R. Fonseca, V. Hidalgo, C. Díaz-Delgado, A. Y. Vilchis-Francés, and I. Gallego Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323-335, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.057>
- [64] V. A. R. Lopes, G. F. Marques, F. Dornelles and J. Medellin-Azuara, Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*, 148, 304-313, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.132>
- [65] C. Ozay ve M. S. Celiktas, Stochastic optimization energy and reserve scheduling model application for alaçatı, Turkey, *Smart Energy*, 3, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100045>

- [66] B. Helmreich and H. Horn, Opportunities in rainwater harvesting, *Desalination*, 248(1–3), 118-124, 2009 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>
- [67] K. O. Odhiambo, B. T. Iro Ong'Or, and E. K. Kanda, Optimization of rainwater harvesting system design for smallholder irrigation farmers in Kenya: A review. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(4), 483-492, 2021, <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.087>
- [68] A. E. Coşgun, Türkiye'de 50MW Üstü GES Üretimi Gerçekleştiren Şehirlerimizde Agrivoltaic Sistem Kullanılabilirliğinin İncelenmesi, *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 711-718. 2021, <http://doi.org/10.29137/umagd.892391>
- [69] Çevresel ve Sosyal Etki Değerlendirmesi, 2022, Retrieved From <https://kalyonpv.com/documents/Cevresel-ve-Sosyal-Etki-Degerlendirmesi.pdf>
- [70] İ. Bektaş ve diğerleri, Değişen İklim Koşullarında Çatı Kaplama Malzemelerinin Verimliliğinin İncelenmesi–Safranbolu Örneği, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 33(3), 35-53, 2017. Retrieved From <https://dergipark.org.tr/tr/pub/erciyesfen/issue/35954/403437>
- [71] S. Temizkan ve M. Tuna Kayılı, Yağmur Suyu Toplama Sistemlerinde Optimum Depolama Yönteminin Belirlenmesi: Karabük Üniversitesi Sosyal Yaşam Merkezi Örneği, *El-Cezeri*, 8(1), 102-116, 2021, <http://doi.org/10.31202/ecjse.778973>
- [72] A. Erat, Fotovoltaik panel yüzey temizliği için akıllı sistem tasarımı, *Doktora Tezi*, Necmettin Erbakan Üniversitesi, 2018.
- [73] M. Eker, Y. Avşar, ve A. Fenercioğlu, FV Panel Temizliği için Doğrusal Motor ve Mekanizma Tasarımı, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 570-578, <http://doi.org/10.35414/akufemu.bid.890076>
- [74] D. Deb and N.L. Brahmhatt, Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3306-3313, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.014>





Afyon Kocatepe Üniversitesi enerji dağıtım hattının optimizasyon yöntemleri ile tasarlanması

Designing Afyon Kocatepe University energy distribution line with optimization methods

Enes Yıldız^{1,*} , Fatih Onur Hocaoğlu² 

^{1,2} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar Türkiye

Öz

Elektrik enerjisi var olduğu sürece, dağıtım şebekeleri enerjinin dağıtılmasında önemli rol oynamaya devam edecektir. Gelişen ve kalkınan ülkelerde enerji talep miktarı arttıkça, enerjinin verimli kullanılmasının önemi de artmaktadır. Artan talep miktarlarıyla birlikte mevcut sistemlerin de genişletilmesi kaçınılmazdır. Bir enerji dağıtım şebekesi tasarlanırken; maksimum kalitede ve enerji aktarımının minimum maliyetlerle gerçekleştirilmesi hedeflenmelidir. Çalışmada Kocatepe Üniversitesi örnek alınarak dağıtım şebekelerinin gezgin satıcı problemine uyarlanması amaçlanmıştır. Analiz için kampüs bölgesinde belirlenen bir transformatör bölgesinden kampüsün dağıtım hattı haritasının en kısa yol uzunluğu belirlenmiştir. Dağıtım hatlarının uzunluklarının optimal seviyelerde ayarlanması, şebeke üzerinde meydana gelecek olan teknik kayıplarında azaltılmasını; direk, iletken, vb. gibi elektriksel malzemelerin masraflarının azaltılmasını sağlayacaktır. Çalışmada gezgin satıcı problemine yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Her fakülte birer şehir gibi kabul edilmiştir ancak, transformatörden çıkan fider sayısı birden fazla olabileceğinden dolayı gezgin satıcı problemi, amaç fonksiyonu gibi hususlara yenilik getirilmiştir. Çalışmada elde edilen yöntemin, tasarlanacak olan yeni dağıtım hatlarının planlamalarına referans olması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerji dağıtım şebekeleri, Optimizasyon, Güç sistemleri, Gezgin satıcı problemi.

1 Giriş

Elektrik enerjisi bir ülke için hem ekonomik bakımdan hem sosyal gelişim açısından büyük önem arz etmektedir. Elektrik enerjisi sanayi, konutlar ve ticari işletmeler başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Teknolojik ve endüstriyel gelişmeler elektrik enerjisinin talep miktarını artırmış ve mevcut hatların genişletilmesini zorunlu hale getirmiştir. Gelişen ve büyüyen dünya üzerinde nüfus miktarlarının ve konut sayılarının artması da yeni enerji dağıtım hatlarının tasarlanmasını elzem hale getirmektedir. Ekonomik yük dağıtımın temeli enerji üretiminin ve iletiminin minimum maliyetlerde olmasına dayanmaktadır [1]. Literatürde, güç dağıtım problemlerinin ekonomik gerçekleştirilmesi amacıyla farklı yöntemler kullanılarak

Abstract

As the amount of energy demand increases in developing countries, the importance of efficient energy use also increases. While designing an energy distribution network, It should be aimed to achieve maximum quality and energy transfer with minimum costs. The study aims to adapt the distribution networks to the traveling salesman problem by taking Kocatepe University as an example. For the analysis, the shortest path length of the distribution line map of the campus was determined from a transformer. Thus, it is expected that technical losses will decrease. In the study, a new perspective has been brought to the traveling salesman problem. Even though each faculty has been accepted as a city, since the number of feeders coming out of the transformer can be more than one, innovations have been brought to the issues, such as the traveling salesman problem and the objective function.

Keywords: Energy distribution networks, Optimization, power systems, Traveling salesman problem.

çözüldüğü görülmüştür [2,3]. Optimal bir güç akışının gerçekleştirilebilmesi için güç sistemindeki kayıplar azaltılmalı, reaktif güç aygıtların sağlayacağı niteliklerde optimal değerlerin bulunması gerekmektedir [4]. Bir dağıtım hattında meydana gelen kayıpları azaltması için en başta şebekedeki elektriksel malzemelerin optimal değerlerde seçilmiş olması ve sorunsuz bir şekilde çalışması gerekmektedir. Bir dağıtım şebekesinde teknik kayıpların en fazla iletkenler üzerinde meydana geldiği düşünülürse, iletkenlerin değerlerinin doğru seçilmesinin yanı sıra en kısa yoldan abonelere ulaşması da oldukça önem kazanmaktadır [5-8].

Dağıtım tesisleri maliyet bakımından ele alınacak olunursa; teknik kayıpların ve kayıp-kaçak oranının yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: enesyildiz@aku.edu.tr (E. Yıldız)

Geliş / Received: 16.09.2022 Kabul / Accepted: 18.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1176374

olmasından dolayı zaman zaman %20'e kadar uzanan bir kayıplar olduğu bilinmektedir. Literatürde kayıpların azaltılması amacıyla birçok çalışma mevcuttur [9,10].

Dağıtım sistemleri tüm dünyada farklı formlarda bulunsu bile enerji dağıtım hattı tasarlanırken, standartlara uygun malzemeleri kullanmanın yanı sıra, optimum yollardan dağıtımın gerçekleştirilmesi de önemli bir unsurdur. Özellikle çarpık kentleşmelerin sık görüldüğü bölgelerde, sanayi bölgelerinde ve üniversite kampüs bölgelerinde dağıtım şebekelerinin tasarımı daha da önemli hale gelmektedir. Abone sayısı ve çarpıklık arttıkça dağıtım hattının tasarlanması daha da zor olacaktır. Yeni tasarlanacak olan şebekeler için uygun bir transformatör bölgesi belirleyerek tasarıma başlanmalıdır. Mevcut şebekelerin genişletilmesi durumunda ise, verimlilik için genişletilecek olan bölgenin optimum uzunluklara sahip olması gerekmektedir.

Dağıtım şebekelerinin tasarlanması, özellikle akıllı şebekelerinde yaygınlaşacağı düşünüldüğünde, önemli bir hale gelmektedir. Revize edilecek veya yeniden tasarlanması istenilen bir şebekesinin en uygun uzunluk ile tasarlanması şebekede meydana gelecek teknik kayıpların önüne geçileceği gibi, şebekede kullanılacak malzemelerden de tasarruf sağlayacaktır. Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi merkez kampüsü referans alınarak, bir dağıtım hattının gezgin satıcı problemine benzetilerek betimlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Bir dağıtım şebekesi tasarımı gezgin satıcı problemine (GSP) benzetilebilir. Her aboneye enerjinin, yalnızca bir defa gitmesi yönüyle dağıtım şebekesi ve GSP birbirleriyle benzerlik gösterilebilir. Çalışmada dağıtım şebekesinin tasarımı; gezgin satıcı problemine yeni bakış açılarının getirilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

2 Materyal ve metot

Genel olarak optimizasyon problemi, bir sistemin maksimum veya minimum noktalarına ulaşmayı hedeflemektedir. Bir dağıtım şebekesinin optimizasyonu ise, tasarlanacak olan hat uzunluğunun en kısa mesafesinin bulunmasıdır. Gerçekleştirilen çalışmada tüm abonelere enerjinin en kısa mesafede götürülmesi hedeflenmiştir. Amaç fonksiyonu; tüm şebekenin iletken uzunluğu olarak kabul edilmiştir.

2.1 Tavlama benzetim algoritması

Tavlama benzetim algoritması (TBA) eniyileme problemi için tasarlanmış bir algoritmadır. Olasılıklar prensibine dayanır. En iyi çözümü en kısa sürede bulmayı hedefler [11,12]. Bir metalin soğutulma işlemi prensibine dayanmaktadır. Burada optimizasyonda belirleyici bir faktör olan kontrol parametresi ısının davranışına benzetilmiştir. [13]. Bu çalışmada optimizasyon tekniklerinden biri olan TBA yöntemi kullanılmıştır. Transformatörden çıkması muhtemelen olan kollar veya fider sayıları, şebekede meydana gelebilecek dal (kol) sayıları, olasılık prensiplerine dayanarak belirlenmiştir. Gezgin satıcı problemindeki gibi algoritma gideceği aboneyi, olasılık prensibine göre seçmektedir.

TBA yönteminin kendine has özellikleri dağıtım şebekelerinin tasarlanmasında avantaj sağlayacağı

düşünülmektedir. Olasılık prensibine dayanarak kötü sonuçların da kabul edilebilmesi, algoritmanın yerel minimum noktalarında takılmanın önüne geçmektedir. Bir abonenin de ana hattan kopup, şebekede ayrı bir dal (kol) oluşturması kötü bir sonuç olabileceği gibi, meydana gelen yeni kolun büyümesi ileride daha iyi sonuçlarda ortaya çıkarabilmektedir. Bu nedenden dolayı TBA yönteminin yerel minimumlara takılmama yöntemiyle çalışmada gerçekleştirilen dağıtım şebekesinin tasarlanması yöntemi birbirine uyum göstermektedir. Bahsi geçen olasılık değeri **Denklem 1**'de gösterildiği gibidir.

$$P = e^{-\Delta E/T} \quad (1)$$

ΔE : Enerji değişim miktarı, T : Sıcaklık

2.1.1 Gezgin satıcı problemi

Gezgin satıcı problemi (GSP) temel mantığı bir seyyar satıcının, n farklı şehre ürünlerini satma prensibine dayanır. Satıcı bu n farklı şehre sadece bir kere uğramak koşuluyla en kısa yoldan gitmelidir ki maliyeti minimum seviyelerde olsun. Bu problem, seyyar satıcıdan ziyade, paketlerin yönlendirilmesi, bir şebekenin tasarlanması, lojistik planlamalar vb. gibi optimal uzunlukların bulunması gereken çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır [14-19]. Gezgin satıcı problemi optimal yol uzunluğunun belirlenmesinde başarılı bir yöntem gibi gözükse bile, döngü sayılarının veya şehir sayılarının artması durumunda çözüm zamanının da üssel olarak artması beklenen bir durumdur. Literatürde gezgin satıcı problem uygulamalarının geliştirilmesi, veriminin artması amacıyla birçok çalışma yapılmıştır [20,21].

Dağıtım şebekesinin tasarımı da benzer mantıktadır. Her aboneye enerjinin bir defa gitmesi yeterlidir. Dağıtım şebekesinin tasarımı bu yönüyle gezgin satıcı problemine benzerlik göstermektedir. GSP' de bir seyyarın her şehre birer defa uğraması demek, tasarlanan dağıtım şebekesinin her aboneye yalnızca bir defa uğramasıyla benzerlik göstermektedir. Böylece bir dağıtım şebekesi tasarımı yapılırken en kısa yol uzunlu hesaplanarak hem teknik kayıplarının önüne geçilecek hem de kullanılan malzeme sayısı azalacaktır. Böylece yeni bir dağıtım şebekesi kurulacağı zaman veya herhangi bir dağıtım projesi revize edilirken, şebeke için en uygun yollar GSP' de belirlenerek en kısa yol uzunluğuna sahip bir şekilde tasarlanabilecektir. Dağıtım şebekelerinin GSP ile farkı, GSP' de olduğu gibi şehirlere veya abonelere sırasıyla ulaşmaya gerek olmamasıdır. Bir havai hat dağıtım şebekesi branşman veya tevzi direkler yardımıyla dallanabilir veya bir yerden birkaç farklı yere enerji dağıtım gerçekleştirilebilir. Bu sebeple bir dağıtım şebekesini tasarlarken GSP'de değişiklikler yapılması şebekenin daha sağlıklı tasarlanmasını sağlayacaktır. Gerçekleştirilen çalışmada GSP' ye yeni bir bakış açısı getirilerek enerjinin abonelere sırasıyla götürülmesi yerine, şebekede meydana gelebilecek kol ayrımları da dikkate alınmıştır. Çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi kampüsünde 14 bina için gerçekleştirilmiştir. Afyon Kocatepe Üniversitesi'ne ait yerleşke planı **Şekil 1**'de gösterilmiştir [22].

3 Problemin tasarımı

Yapılan çalışmada Afyon Kocatepe Üniversitesi için, belirlenen bir transformatör bölgesi için meydana gelecek senaryolar araştırılmıştır. Dağıtım hattı için en kısa yol bulunması hedeflenmiştir. Transformatör bölgesinden beslenecek olan binalar; Rektörlük binası (1), Fen Edebiyat Fakültesi (3), Enstitü Binası (6), Kütüphane (7), İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi (9), Atatürk Kongre Merkezi (AKM) (11), Turizm Fakültesi (12), Kreş (14), Mühendislik Fakültesi (15), Yemekhane Binası (17), Veterinerlik Fakültesi (19), Teknoloji Fakültesi (Güzel Sanatlar Fakültesi) (25), Hukuk Fakültesi (30), Üniyurt Öğrenci Yurtları (40) olarak belirlenmiştir. Binaların birbirlerine ve belirlenen transformatör bölgesine olan uzaklıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Seçilen transformatör bölgesi için gerçekleştirilecek olan tasarım, gezgin satıcı problemine benzetilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak şebekedeki toplam iletken uzunluğu alınmıştır. Ancak ring şebekelerinin yapısı gereği gezgin satıcı problemine farklı bakış açıları getirilmiştir. 14 abone için transformatörden ayrılabilen 14 ayrı kol olasılık prensibine göre değerlendirilmiştir.

Şebeke içerisinde meydana gelebilecek olan dal (kol) sayıları da olasılık prensibine göre belirlenmiştir. Başlangıç çözümü

olarak tüm aboneler rasgele bir şekilde bir vektöre atanarak amaç fonksiyonu hesaplanmış ve gezgin satıcı problemindeki adımlar yeni bakış açılarıyla güncellenerek işletilmiştir. Transformatörden çıkması gereken kol (fider) sayısı ve şebekede meydana gelebilecek olan dallanmalar olasılık prensibine dayanarak hesaplanmıştır.

3.1 Uygulanan yöntemin avantajları

Ring şebekeleri tasarlarken, şebeke uzunluklarının hangi yol seçilirse daha kısa olacağını el ile hesaplamak bazı durumlarda neredeyse imkansızdır. Özellikle abonelerin birbirlerine yakın olduğu çarpık bölgelerde toplam hat uzunluğunun minimum olabilmesi için; şebekedeki dal sayısının kaç olması gerektiğini veya şebekelerin hangi noktalardan dallara ayrılması gerektiğini tahmin etmek zordur. 14 adet abone ile işletilen algoritmada dahi binlerce olasılığın olduğunu göz önüne aldığımızda, kalabalık bölgelerde durumun ne kadar zor olduğu anlaşılacaktır. Gerçekleştirilen çalışmada abone sayısı kaç olursa olsun, yöntem şebeke için en kısa yol için transformatörden ayrılması gereken ana kol sayısını ve ana kollardaki dal sayısını hesaplayarak, optimum mesafeyi hesaplayabilmektedir.



Şekil 1. Afyon Kocatepe Üniversitesi yerleşke planı

Tablo 1. Binaların birbirlerine olan uzaklıkları (m)

Bina Numarası & Uzaklıklar (Metre)	3	1	11	15	19	25	30	7	9	12	17	14	6	40
3	0	285	656	940	1210	1680	1970	372	481	627	784	766	315	452
1	285	0	424	720	970	1460	1730	252	270	420	527	550	91	737
11	656	424	0	296	552	1030	1310	330	193	147	145	176	345	1070
15	940	720	296	0	271	735	1020	588	464	332	232	197	638	1330
19	1210	970	552	271	0	493	770	860	733	607	441	472	895	1610
25	1680	1460	1030	735	493	0	347	1260	1140	1000	880	860	1320	2000
30	1970	1730	1310	1020	770	347	0	1610	1490	1650	1210	1210	1660	2340
7	372	252	330	588	860	1260	1610	0	137	262	481	402	144	740
9	481	270	193	464	733	1140	1490	137	0	156	343	282	184	876
12	627	420	147	332	607	1000	1650	262	156	0	285	142	340	990
17	784	527	145	232	441	880	1210	481	343	285	0	232	470	1220
14	766	550	176	197	472	860	1210	402	282	142	232	0	468	1140
6	315	91	345	638	895	1320	1660	144	184	340	470	468	0	741
40	452	737	1070	1330	1610	2000	2340	740	876	990	1220	1140	741	0

En kısa yol uzunluğu demek; elektriksel anlamda iletkenler üzerinde meydana gelecek kayıpları azaltılması; aynı zamanda da direk, direk montajları, izolatör vb. gibi malzeme masraflarının ve işçi masraflarının da azaltılması anlamına gelmektedir. Yeni kurulan veya genişletilmesi gereken mevcut hatların bu yöntemlerle tasarlanması şebekelerin maliyeti bakımından olumlu etki göstermesi hedeflenmektedir.

4 Araştırma bulguları

Yapılan çalışmada el ile hesaplanması uğraştırıcı olan en uygun yol, algoritma yardımıyla bulunmuştur. Gezgün satıcı problemine getirilen yeni bakış açısı yol uzunluğun minimum seviyelere inmesine yardımcı olmuştur. Eğer gezgün satıcı problemi aslı gibi kullanılsaydı; transformatörden yalnızca tek bir ana kol ile enerji dağıtımı gerçekleşecek ve şebekede dallanmalar meydana gelmeyecekti. Transformatörden çıkan tek bir ana kolun tüm aboneleri sırayla beslemesi durumunda; şebekede amaç fonksiyonu olan toplam hat uzunluğu 3407 metre olarak hesaplanmıştır. Meydana gelen çözüm kümesi ise, transformatörden çıkacak olan hat sırasıyla; 40-3-1-6-7-9-12-11-17-14-4-19-26-30 numaralı abonelere gittiği tespit edilmiştir. Bu durum düz bir şebeke için kullanılabilir olsa da, dallanmış şebekeler için yanıtıcı sonuçlar verebilmektedir. Bir dağıtım şebekesinin kendine has durumları da göz önüne alınarak algoritma güncellenmiştir.

Algoritmaya transformatör kolunun eklenebilmesi olasılıkları da ilave edilince amaç fonksiyonunun minimum noktalara yaklaştığı görülmektedir. Yeni çözüm kümesi; 3-1-6-7-9-12-11-17-14-4-19-26-30-99-40 şeklinde gerçekleşmiştir. Transformatörden yeni çıkan ana kollar algoritmaya; 99 numaralı vektör elemanı olarak çözüm vektörüne abonelerden farklı olacak şekilde eklenmiştir. 99 numaralı

vektör elemanı, transformatörü (transformatörden çıkan yeni hattı) temsil etmektedir. Yeni elde edilen çözüm kümesi incelendiğinde ise yeni transformatör kollarının olduğu (99 numaralı vektör elemanı) görülmektedir. Yeni elde edilen çözüm vektörünün 14. elemanı olan 99 numaralı elemanı, transformatörden çıkan ayrı bir kolu temsil etmektedir. Çözüm vektörü incelendiğinde 99 numaralı vektör elemanından öncesi transformatörden çıkan bir hattı, 99 numarasından sonraki elemanlar ise transformatörden çıkan bir başka hattın olduğunu göstermektedir. Bu çözüm vektöründe 2 transformatör kolunun olduğu görülmektedir. İkinci transformatör kolu ise yalnızca 40 numaralı aboneyi kapsamaktadır. Bu şebeke için en iyi tasarım transformatörden iki kol ayrılması durumunda meydana gelmektedir. Transformatörden çıkabilecek ayrı kol sayısı algoritma için abone sayısıyla sınırlandırılmıştır. Ancak transformatörden çıkan ayrı kollarla tam çözüm kümesini oluşturmamaktadır. Elektrik dağıtım şebekelerinin özellikleri göz önüne alındığında, şebekede meydana gelebilecek dallanmalar, enerjiyi daha kısa yoldan iletilmesini sağlayacaktır.

Algoritmaya yeni bakış açısı daha getirilip şebekede meydana gelebilecek dallanmalar da ilave edildiği zaman, amaç fonksiyonunun azaldığı görülmektedir. Öncelikle ana şebekeden ayrılacak aboneler bir olasılık prensibine göre belirlendikten sonra dallanmanın gerçekleşeceği nokta belirlenmiştir. Meydana gelen çözüm vektörü; 3-1-6-7-9-12-14-4-19-26-30-99-40 şeklinde olmuş, 11 numaralı ve 17 numaralı aboneler ana şebekeden ayrılarak 14 numaralı aboneye ayrı bir koldan bağlanmıştır. İkinci amaç vektörü 14-11-17 şeklinde olmuştur. Sonuç olarak algoritmanın hesaplamış olduğu amaç fonksiyonu 3087 metre bulunmuştur ve Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Üniversiteye ait algoritma sonucunda meydana gelen dağıtım şeması

Algoritmaya; elektrik şebekelerinin kendine has özellikleri de ilave edildiğinde minimum noktaya daha çok yaklaştığı görülmektedir.

Çalışması yapılan şebeke eğer bir havai hat şebekesiye, bu durumda ciddi anlamda direk ve direk üzerinde kullan malzeme maliyetlerinden de tasarruf edilecektir. Eğer bu çalışma bir havai hat projesi olsaydı, GSP'nin direk uygulanmasıyla ve elektriksel özelliklerinin eklenip uygulanması arasında yaklaşık 6 adet direk tasarrufu gerçekleşirdi. Çarpık kentleşmelerin yaygın olduğu daha büyük bölgelerde kazancın daha çok olacağı öngörülebilir.

Yeraltında kullanılan iletkenler abonelerin talep güçlerine göre değişiklik gösterebilir. Üniversitelerin mühendislik, teknoloji fakülteleri gibi laboratuvarlarındaki büyük güçteki ekipmanlar göz önüne alındığında yüksek güç çekmeleri beklenmektedir. Ancak diğer fakültelerde bu durum söz konusu değildir. Bu çalışmanın genel amacı, dağıtım şebekelerinin en kısa yoldan abonelere ulaşmasını sağlamaktır. Ortalama bir kazanç hesabı yapılacak olursa, ortalama bir iletken seçilerek durum açıklanabilir. Tüm abonelere giden iletkenlerin ortalama kesitlerinin 70 mm² olabileceği düşünüldüğünde ortalama kazanç miktarı ortaya çıkacaktır. İletkenlere ait yaklaşık fiyatlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Piyasadan piyasaya fiyatlar değişiklik gösterdiğinden dolayı fiyatlar ortalama olarak alınmıştır.

Tablo 2. İletkenlere ait yaklaşık birim fiyat tablosu

İletken Adı	Yaklaşık Fiyat (Metre Fiyatı)
3*50 mm ² NYY Kablo	340.00 ₺
3*70 mm ² NYY Kablo	480.00 ₺
3*120 mm ² NYY Kablo	770.00 ₺

Ortalama 70 mm² kesitli yeraltı kablolarının kullanılması durumunda dağıtım şebekesinde 153.600.00 ₺ civarında maliyetlerin azaldığı görülmektedir. Kablo kesitlerinin artması durumunda meydana gelecek kazançlarında arttığı görülmektedir.

5 Sonuçlar

Mevcut algoritmalar, dağıtım şebekelerine uyarlanarak algoritmalara yeni bakış açıları getirilmiştir. Şebeke tasarımının gezgin satıcı problemiyle benzerliklerinden faydalanılarak, bir şebekenin minimum maliyetle tasarımı gerçekleştirilmiştir. El ile hesaplanması mümkün olmayan ring şebekeler için bu çalışmanın referans olması hedeflenmektedir.

Dağıtım şebekesinin doğru tasarlanması sayesinde; şebekede meydana gelecek gerilim düşümü azalır, güç transfer kapasitesi artar, güç kayıpları azalır, daha düşük kesitte kablolarla iletimin gerçekleşmesi sağlanır dolayısıyla daha düşük kesitlerde kablo kullanılacağı için kullanılan kablo maliyetleri de azalacaktır. Tablo 3'te GSP'nin revize edilme durumlarına göre ortaya çıkan sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3. GSP'nin revize durumlarına göre hat uzunlukları

GSP	Toplam Hat Uzunluğu (m)
GSP-I	3407
GSP-II	3204
GSP-III	3087

Gerçekleştirilen GSP MATLAB programında abonelerin birbirlerine uzaklıkları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi yalnızca 14 adet aboneye sahip bir dağıtım şebekesi yaklaşık 320 metre daha kısa uzunluklarla tasarlanabilmektedir. Çalışmanın özellikle kalabalık, çarpık kentleşme bölgelerinde, kentsel dönüşüm bölgelerinde, yeni kurulması planlanan bölgelerde veya genişletilmesi planlanan bölgelerde büyük kazanç sağlayacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] S. Asgarpoor and S.K. Panarelli, Expected cost penalty due to deviation from economic dispatch for interconnected power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 441-447, 1995. <https://doi.org/10.1109/59.373969>.
- [2] B.H. Chowdhury and S. Rahman, A review of recent advances in economic dispatch, *IEEE Trans. On Power Systems*, 5,(4), 1248-1259, 1990. <https://doi.org/10.1109/59.99376>.
- [3] O. Alsac and B. Stott, Optimal Load flow with Steady State Security, *IEEE Transactions*, PAS-93, 745-751, 1974. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293972>.
- [4] E. Yıldız ve N. Çetinkaya, The Proposed Forecasting Algorithm in Power Systems for Separating of Losses and Illegal Consumptions. *Third International Symposium on Industrial Design & Engineering 2018 (ISIDE)*, Antalya, Türkiye. 22-24 Kasım 2018.
- [5] Ş. Sargın, Üretimden Tüketime Elektrik Enerjisi Sistemlerinde Meydana Gelen Kayıplar ve Giderilmesine Yönelik Çalışmalar. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [6] S. Emiroğlu, Dağıtık Üretimli Elektrik Enerji Sistemlerinde Gerilim Azaltım Yöntemi İle Enerji optimizasyonu. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [7] E. Yıldız, Güç Sistemlerinde Kayıplar Ve Kaçakların Birbirinden Ayrılması İçin Önerilen Tahmin Algoritması. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [8] M. Artar, ve A. Daloğlu, Çelik sistemlerin genetik algoritma ile dinamik sınırlayıcı optimizasyonu. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 3(1), 9-24, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239374>.
- [9] V. Yılmaz, M. Büyükyıldız, ve Ö. K. Baykan, Optimization of water distribution networks using artificial bee colony algorithm. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 377-392, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.568917>.
- [10] M. A. Aytakin ve T. E. Kalaycı, Genetik Algoritmalarla Çözümünde Yeni Bir Yaklaşım, *Akademik Bilişim'10-XII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri*, Muğla, 10-12, Türkiye, 2010.
- [11] H. Çerçioğlu., U. Özcan, H. Gökçen ve B. Toklu, Paralel montaj hattı dengeleme problemleri için bir tavlama benzetimi yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2), 331-341, 2009.
- [12] R. Şahin, Dinamik tesis düzenleme problemi için bir tavlama benzetimi sezgiseli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (4), 2018. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6678/88549>
- [13] N. S. Kumbharana, G. M. Pandey and A. Comparative, Study of ACO, GA and SA for Solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Societal Applications of Computer Science*, 2(2), February 2013.
- [14] K. Karagül ve G. Gündüz, A novel heuristic for the traveling salesman problem: maxS. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 665-677, 2022. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247129>.
- [15] A. Y. Kayman, Gezgin satıcı probleminin çözümünde parçacık sürü optimizasyonu algoritması performansının bulanık c-ortalamalar yöntemi ile iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2015.
- [16] E. Kuang, 2012. A 2-opt-based Heuristic for the Hierarchical Traveling Salesman Problem. <http://honors.cs.umd.edu/reports/kuang.pdf>, Accessed 18 February 2019.
- [17] S. Kılıç, İ. Kacar, F. Öztürk ve S. Toros, Effects of different optimization methods on the predictions of yld2000 yield criterion coefficients. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 447-463, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517160>.
- [18] S. Gönüloğlu, Gezgin satıcı problemi için veri madenciliğitabanlı sezgisel bir yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [19] C. Nilson, Heuristic Algorithms For Travelling Salesman Problem, Linköping University. <https://medium.com/opex-analytics/heuristic-algorithms-for-the-traveling-salesman-problem-6a53d8143584> Accessed 05 April 2022
- [20] S. Kuzu, O. Öney, U. Şen, M. Tunçer, B. F. Yıldırım ve T. Kesintürk, Gezgin satıcı problemlerinin metasezgiseller ile çözümü. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 43(1), 1-27, 2014.
- [21] B. Lin, X. Sun and S. Salous, Solving Travelling Salesman Problem with an Improved Hybrid Genetic Algorithm. *Journal of Computer and Communications*, 4(15), 2016, <https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415009>.
- [22] Kocatepe Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, <https://yapiisleri.aku.edu.tr/2016/02/09/ahmet-necdet-sezer-kampusu/> Accessed 10 July 2022.





Kompleks düzlemde büyük-ölçekli regresyon: Bilgilendirici olmayan verileri çevrimiçi olarak sansürleyen CRLS algoritmalarının başarımlarını analiz

Large-scale regression in the complex domain: Performance analysis of CRLS algorithms censoring noninformative data in an online manner.

Engin Cemal Mengüç^{1,*} 

¹ Kayseri Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Büyük veri akışlarından anlamlı bilgilerin çıkarılması ve öğrenilmesi, toplumların yaşam kalitesinin artırılmasının, bilim ve mühendislik alanında yeni teknolojilerin geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Öte yandan, sensör teknolojisindeki son atılımlar, hesaplama gücünün ve bilgisayar belleğinin artan kullanılabilirliği, verilerin sadece reel-değerli olmadığını artık büyük ölçekli kompleks-değerli veri kümeleriyle de başa çıkılması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada, son zamanlarda önerilen çevrimiçi sansürleme (online censoring, OC) tabanlı kompleks-değerli özyinelemeli en küçük kareler (OC based complex-valued recursive least squares, OC-CRLS) ve OC tabanlı artırılmış CRLS (OC based augmented CRLS, OC-ACRLS) algoritmalarının başarımları ilk defa büyük ölçekli regresyon problemleri üzerinde detaylı olarak test edilmiş ve literatürde yer alan klasik versiyonları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları, OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, OC mekanizmasının getirdiği avantajlardan dolayı kompleks düzlemde tanımlanmış olan büyük-ölçekli regresyon problemlerinde eğitim süresini ciddi anlamda kısalttığını ve test başarımlarını negatif yönde etkilemediğini göstermiştir. Bu da OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, kompleks düzlemde tanımlanabilen büyük veri akışı uygulamalarında etkin ve güçlü algoritmalar olduğunu kanıtlamıştır.

Anahtar kelimeler: Büyük veri, Regresyon, Çevrimiçi sansürleme, Kompleks-değerli veri, Özyinelemeli en küçük kareler.

1 Giriş

Verilerin bilgiye dönüştüğü, akıllıca kullanıldığında ve işlendiğinde ise insanlığa, bilim ve mühendislik dünyasına önemli katkılar sağlayacağı bir dijital veri tufanı çağında yaşamaktayız. Günümüzde bilimsel araçlar, tıbbi cihazlar, uydular, teleskoplar, sensörler, e-ticaret platformları, gözetim kameraları, cep telefonları, internet ortamı gibi birçok farklı kaynaktan üretilen eşi görülmemiş boyutlarda büyük veri akışları ile karşı karşıya kalmaktayız. Aslında büyük veri ve büyük veri akışları; yüksek boyut, karmaşıklık ve kullanılabilirlik oranı nedeniyle mevcut analitik yöntemlere meydan okuyan veri türlerini temsil etmektedir

Abstract

Extracting and learning meaningful information from big data streams paves the way for improving the quality of life of societies and the development of new technologies in the field of science and engineering. On the other hand, recent advances in sensor technology, increased availability of computing power and computer memory reveal that data is not just real-valued, but large-scale complex-valued datasets must also be dealt with. For this purpose, for the first time in this study, the performances of the recently proposed online censoring (OC) based complex-valued recursive least squares (OC-CRLS) and OC based augmented CRLS (OC-ACRLS) algorithms are tested on large-scale regression problems and compared with those of their classical versions in the literature in detail. Simulation studies show that the OC-CRLS and OC-ACRLS algorithms significantly shorten the training time in large-scale regression problems defined in the complex domain without affecting testing performance in a negative way, due to the advantages of their OC mechanism. This proves that OC-CRLS and OC-ACRLS algorithms are effective and powerful algorithms in big data streaming applications that can be defined in the complex domain.

Keywords: Big data, Regression, Online censoring, Complex-valued data, Recursive least squares

[1]. Bu tür verilerden anlamlı bilgilerin türetilmesi ve öğrenilmesi, toplumların yaşam kalitesinin artırılmasının, bilim ve mühendislik alanında yeni teknolojilerin geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Bu kapsamda, sayısal, matematiksel ve istatistiksel tekniklerin/yöntemlerin teorik alt yapılarla birleştirilerek yeni yöntemlerin geliştirilmesi günümüzde kaçınılmaz hale gelmiştir. Büyük veri büyük nimetlerle karşımıza çıkmaktadır fakat büyük zorluklara sahiptir [2-11]. Büyük verilerin doğası gereği yüksek hacim ve boyutu; geleneksel grup (batch) çıkarım yöntemlerinin koşuturulmasını imkânsız kılmaktadır [2-4]. Çünkü grup metodlar, en iyi sonucu üretebilmesi için ya verinin tamamına

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: enginmenguc@kayseri.edu.tr (E.C. Mengüç)
Geliş / Received: 15.01.2023 Kabul / Accepted: 25.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1234303

ya da çok sayıda veriye ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden de bu tür metotlar, ciddi depolama maliyeti gerektirir. Bilgi kaynaklarının çoğu; sürekli olarak akan, farklı çeşitlerde, miktarı ve istatistikleri zaman içinde ve elementler arasında hızla değişen büyük veri üretmektedir [2]. Dolayısıyla, büyük veri analitiğinin; gerçek-zamanlı kısıtlamalar altında geçmiş verileri tekrardan kullanmadan daha az veri kümelerinin zaman içinde sıralı olarak kullanıldığı çevrimiçi olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir [10,11]. Böylece, çevrimiçi yöntemlerle çok hızlı bir şekilde üretilen orta kaliteli bir çıktı, grup yöntemlerle oldukça yavaşça üretilen yüksek kaliteli bir çıktıdan daha yararlı olabilmektedir [5-8]. Bu nedenle, günümüzde büyük verinin çevrimiçi işlenmesi önemli hale gelmiştir. Öte yandan, büyük veri akışları yüksek derecede artık veri (redundancy) içerir; yani, yararlı bilgileri, orijinal boyutluklarına kıyasla çok daha düşük oranda olabilmektedir [11]. Büyük veri akışları, analiz için gerekli olan zaman ve kaynak ihtiyacı dikkate alındığında aslında kötü koşullandırılmış veri tipidir. Ayrıca verinin çeşitli kaynaklardan ve popülasyonlardan gelmiş olması, büyük verinin genellikle kirliliği (dirty) olarak tanımlanmasına yol açar [9]. Yani büyük veri akışları; doğal olarak gürültülü (bozuk) ölçümler/iletişim hataları içerir [2, 8, 9]. Diğer bir zorluk ise büyük veri akışlarında elzem olan görevlerin; yani, kestirim, tahmin ve regresyon görevlerinin yerine getirilmesidir [2, 8]. Eğer büyük veri akışları; seçilmiş bir veri alt kümesiyle kısıtlanabilirse, bahsi geçen problemler adaptif sinyal işleme (Adaptive signal processing, ASP) ile çözüme kavuşturulabilir.

Büyük verilerde, veri alt kümesiyle çalışabilmenin en kolay yolu; veri gruplarının yüksek derecede artıklık (redundancy) özelliğinden akılcıca faydalanmaktır [11]. Örneğin; çevrimiçi olarak önem arz eden veriyi önemsiz veriden ayırarak, büyük veri akışlarında veri işleme maliyeti ve veri boyutu ciddi bir şekilde azaltılabilir [11]. Bu kapsamda, sansürleme (censoring) işlemi son zamanlarda birçok farklı alanda doğal olarak popüler hale gelmiştir. Sansürlenmiş verilere dayanan grup kestirim (batch estimator) yöntemleri; ekonometri, biyometri, hayatta kalma analizi [12], doymuş ölçüm [13], spektrum algılama [14] dahil olmak üzere birçok mühendislik [15] görevinde kullanılmıştır. Son zamanlarda ise sansürleme tekniği; kaynak kısıtlı kablosuz sensör ağlarını [16, 17] kullanarak dağıtılmış parametre tahmini ve dinamik süreçler için veri seçiminde kullanılmış ve bu sayede sistem başarımı ile sistem maliyeti arasında bir denge sağlanmıştır. Bu çalışmalar, sansürlenmiş ölçümlerle elde edilen tahmin doğruluğunun, sansürsüz verilere dayalı olanlarla karşılaştırılabilir olduğunu doğrulamıştır. Bu yüzden, sansürleme işlemi; büyük veri uygulamalarında kesinlikle arzu edilen bir özellik olan veri işleme maliyetini düşürme potansiyeli sunmaktadır. Bu kapsamda, [11]'de yer alan çalışmada, büyük ölçekli doğrusal regresyonlarda büyük veri akışının boyutunu azaltmak ve veri işleme maliyetini düşürmek için çevrimiçi sansürleme (Online censoring, OC) stratejisi ilk defa kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen OC stratejisi altında yatan temel fikir; daha az bilgilendirici gözlemleri atmak için çevrimiçi aralık sansürlemesine dayanmaktadır. Son zamanlarda, büyük veri alanında

popüler hale gelen OC stratejisi [11,18]'de genellikle zamanla değişen parametrelerle dinamik süreçlerin izlenmesine ilişkin büyük veri sorunlarının, [19]'da enerji kaynaklarının sınırlı olduğu senaryolarda adaptif ağlar üzerinden dağıtılmış tahmin için enerji bütçesini düşürmenin ve [20]'de merkezi olmayan bir algılama sisteminde azaltılmış iletişim oranı elde etmenin üstesinden başarıyla gelmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, OC stratejisi son zamanlarda merkezleştirilmiş büyük-ölçekli ağlarda [21], dağıtılmış kablosuz ağlarda [22], yapay sinir ağları eğitimi için bilgilendirici eğitim verisi çıkarmada [23], yapay sinir ağının eğitiminde [24], grafik sinyallerinin kestiriminde [25] ve doğrusal olmayan ağlar üzerinde adaptif filtreleme işlemlerinde [26], giyilebilir işleme cihazlarında akustik geri besleme yolunun kestiriminde [27], patolojik el tremorünün kestiriminde [28] kullanılmasıyla daha da popüler hale gelmiştir. Her ne kadar [11]'de tasarlanan OC stratejisi; büyük veri akışları için büyük-ölçekli doğrusal regresyon yöntemleri başlığı altında anılsa da, aslında literatürde klasik ASP algoritmaları olarak bilinen en küçük ortalama kare (Least mean square, LMS) ve özimizelemeli en küçük kareler (Recursive least squares, RLS) algoritmalarının yapısına yerleştirilmiştir (yani OC tabanlı LMS ve OC-tabanlı RLS algoritmaları önerilmiştir). Ayrıca, OC tabanlı algoritmalar, literatürde veri seçici algoritmalar olarak da bilinmektedir [29]. [2, 9, 11]'de OC stratejisi tasarlanırken, skaler akış gözlemleri klasik kestirim problemindeki gibi tanımlandığı için OC tabanlı LMS ve RLS algoritmaları doğal olarak ölçüm/iletişim hatalarını elemine etme özelliğine sahiptir. Bu da bu algoritmaların büyük veri akışlarında mevcut olan gürültü probleminin üstesinden geldiğini göstermektedir. Fakat önerilen bu algoritmalar, veriler aykırı değer içermediği sürece mantıklıdır; aksi durumda, bilgilendirici verilerin ayırt edilmesinde hatalı çalışmaktadır. Bu kapsamda yine aynı çalışmada [11], aykırı değere karşı gürbüzlük sağlayan modifiye edilmiş OC stratejisi tasarlanmış ve gürbüz OC tabanlı LMS ve RLS algoritmaları önerilmiştir. Bu sayede, büyük veri akışlarında olası aykırı değerlere karşı ek olarak önlem alınmıştır. Son zamanlarda, hem bilgilendirici olmayan hem de aykırı değerlerin sansürlendiği farklı sansürleme tabanlı (veri seçici) adaptif sinyal işleme algoritmaları [29]'da yer alan çalışmada sunulmuştur. Bu algoritmalar, veri seçici LMS, veri seçici RLS, veri seçici afin projeksiyon ve basitleştirilmiş veri seçici afin projeksiyon [29] algoritmaları olup, aslında temelinin [11]'deki çalışmaya dayandırıldığı görülmektedir. Bu tür OC tabanlı algoritmalar büyük veri akışının boyutunu azalttığı için büyük veri uygulamalarına özgü veri işleme ve depolama maliyetini önemli ölçüde azaltmıştır.

Sensör teknolojisindeki son atılımlar, hesaplama gücünün ve bilgisayar belleğinin artan kullanılabilirliği, verilerin sadece reel-değerli olmadığını artık büyük ölçekli kompleks-değerli veri kümeleriyle de başa çıkılması gerektiğini ortaya koymuştur [30]. Bu tür kompleks-değerli gerçek dünya verileri, fiziksel olarak önemli anlamlar taşıyan zengin bir yapıya sahiptir. Çünkü bu tür veriler, genlik ve faz bilgisini doğrudan içerir ve "reel ve imajiner" veya "faz ve genlik" olarak ifade edilebilirler. Kompleks-değerli veriler; ikinci-dereceden dairesel (second-order

circular) ve ikinci-dereceden dairesel olmayan (second-order noncircular) olmak üzere iki sınıfa ayrılır [31-38]. Literatürde, dairesel kompleks-değerli verileri işlemek için geleneksel kompleks-değerli ASP (Complex-valued ASP, CASP) algoritmaları geliştirilmiştir [31-38]. Bu kapsamda, [39]'da yer alan çalışmada, kompleks-değerli LMS (Complex-valued LMS, CLMS) algoritması önerilmiştir. Aslında bu önerilen algoritma, geleneksel LMS algoritmasının reel düzlemde kompleks bir uzantısıdır. Daha sonra ise, CLMS'nin farklı bir versiyonu olan en küçük faz-LMS (Least mean phase-least mean square, LMP-LMS) algoritması, faz ve genlik verilerinin aynı anda anlık olarak işlenmesi için [40]'da yer alan çalışmada önerilmiş olup, özellikle faz bilgisinin önemli olduğu birçok haberleşme uygulamasında kullanılmıştır. Ayrıca, diğer bir CASP algoritması, hızlı yakınsama kabiliyetine sahip olan ve yaygın olarak kullanılan kompleks-değerli RLS (Complex-valued RLS, CRLS) algoritmasıdır [41]. Bu bahsedilen CASP algoritmaları, ikinci-dereceden istatistiksel bilgi tabanlı algoritmalar; yani, istatistiksel bilgi olarak sadece kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{\mathbf{xx}} = E\{\mathbf{xx}^H\}$ bilgisini kullanırlar. Bu yüzden de bu tür algoritmalar sadece dairesel veriler için optimal çözümler sunarlar [31, 34, 42, 43], burada \mathbf{x} , H ve $E\{\cdot\}$ ifadeleri sırasıyla sıfır ortalamalı kompleks-değerli rastgele vektörü, eşlenik transpozunu ve beklenen değeri temsil etmektedir.

Son zamanlarda, artırılmış istatistikler CASP alanının daha da gelişmesini ve bu alanda yeni algoritmaların türetilmesini sağlamıştır. Çünkü artırılmış istatistikler; kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{\mathbf{xx}} = E\{\mathbf{xx}^H\}$ 'nin veriye ait ikinci-dereceden istatistiksel özellikleri tanımlamada artık yeterli olmadığını, özellikle dairesel olmayan verilerde ek olarak sözde-kovaryans $\mathbf{P}_{\mathbf{xx}} = E\{\mathbf{xx}^T\}$ matrisinin de gerek olduğunu göstermiştir. Bu gereksinimleri yerine getirebilmek için artırılmış kompleks-değerli $\mathbf{u} = [\mathbf{x}^T, \mathbf{x}^H]^T$ vektörü tanımlanarak \mathbf{x} 'e ait ikinci-hem kovaryans ve sözde kovaryans matrisleri, artırılmış kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{\mathbf{uu}} = E\{\mathbf{uu}^H\}$ 'nin içerisinde yerleştirilmiştir. Bu sayede hem dairesel hem de dairesel olmayan kompleks-değerli verilerin ikinci-dereceden istatistiksel özelliklerin tamamı tek bir matris içerisinde değerlendirilmiştir [31-38]. Literatürde artırılmış istatistiklerin; biyomedikal, haberleşme, CASP, güç sistemleri gibi birçok farklı alanda sıklıkla kullanıldığı ve başarımı ciddi anlamda artırdığı gözlemlenmiştir [31-38, 42-53]. Artırılmış istatistiğin ortaya çıkmasıyla, literatürde yer alan CASP algoritmaları; son zamanlarda kavramsal olarak kesin lineer (strictly linear, SL) ve geniş lineer (widely linear, WL) model tabanlı algoritmalar olarak ikiye ayrılmıştır. Örneğin; daha önce bahsettiğimiz CLMS, CRLS gibi kompleks düzlemde çalışan geleneksel algoritmalar, SL model tabanlı algoritmalar olarak adlandırılmaktadır. Literatürde, WL tabanlı algoritmalar ise ayrıca artırılmış kompleks-değerli algoritmalar olarak da bilinmektedir. Artırılmış istatistikler; WL model yapısını kullanan artırılmış kompleks-değerli en küçük ortalama kare (Augmented CLMS, ACLMS) [54] ve artırılmış kompleks-değerli özyinelemeli en küçük kareler (Augmented CRLS,

ACRLS) [55] algoritmalarının tasarımına yol açmıştır. Bu algoritmalar sayesinde hem dairesel hem de dairesel olmayan kompleks-değerli veriler kolaylıkla işlenebilmiştir. Hatta ACLMS ve ACRLS algoritmaları, dairesel olmayan veriler için CLMS ve CRLS algoritmalarından daha üstün bir başarımla sergilerken, dairesel veriler için CLMS ve CRLS ile aynı kararlı-durum hata cevabına daha yavaş yakınsama sergilemektedir [55, 56]. Bu yavaş yakınsamasının temel nedeni ise, bu algoritmaların WL yapılarından kaynaklı iki kat hesap yüküne sahip olmalarıdır [55-57]. Öte yandan, CRLS ve ACRLS algoritmaları, matris tersi alma işlemi [41, 55, 58] nedeniyle daha fazla hesaplama maliyeti pahasına daha hızlı yakınsama ve daha iyi kararlı durum hatası sunmaktadır. Genel olarak, CLMS, ACLMS, CRLS ve ACRLS algoritmaları; karmaşık-değerli verileri işlemek için çok etkili algoritmalar olsa da hem daha önce bahsedilen problemlerden hem de büyük veri işlemenin ve büyük sistem derecelerinin (filtre derecelerinin) getirmiş olduğu yüksek hesaplama maliyetlerinden muzdariptirler. Bu algoritmaların büyük veri akışlarında etkin bir şekilde kullanımını sağlamak için OC stratejisi dikkate alınarak yeniden tasarlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, Mengüç ve arkadaşları [59]'daki çalışmalarında; CLMS, ACLMS, CRLS ve ACRLS algoritmalarının OC versiyonlarını türetmiş ve büyük-ölçekli kestirim ve tahmin problemleri üzerinde başarımlarını analiz etmiştir. Önerilen bu OC tabanlı algoritmalar [59], ağırlık vektörlerini sadece bilgilendirici veriler ile güncellediğinden kendilerinin klasik versiyonlarına kıyasla başarımı olumsuz yönde etkilemeden veri işleme maliyetini; yani, hesap yükünü ciddi anlamda düşürmüştür.

Bu çalışmada, son zamanlarda önerilen OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının başarımları ilk defa regresyon problemleri üzerinde detaylı olarak test edilmiş ve literatürde yer alan ve klasik versiyonları olan CRLS ve ACRLS algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları; OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, OC mekanizmasının getirmiş olduğu avantajlardan dolayı kompleks düzlemde tanımlanmış olan büyük-ölçekli regresyon problemlerinde eğitim süresini ciddi anlamda kısalttığını ve aynı zamanda test başarımını negatif yönde etkilemediğini göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma ile OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, kompleks düzlemde tanımlanabilen büyük veri akışı uygulamalarında etkin ve güçlü algoritmalar olduğu kanıtlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Kesin lineer ve geniş lineer modeller

CASP perspektifinden, öncelikle SL model ile tanımlanan bir adaptif sistemin çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$y_k = \mathbf{x}_k^T \mathbf{h}_k \quad (1)$$

burada $\mathbf{x}_k = [x_k, x_{k-1}, \dots, x_{k-N+1}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ve $\mathbf{h}_k = [h_k, h_{k-1}, \dots, h_{k-N+1}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ sırasıyla adaptif sistemin giriş vektörünü ve standart ağırlık vektörünü temsil eder.

Ayrıca N ifadesi ise sistemin derecesini (örneğin, çıkış sinyali bir sonlu dürtü cevaplı filtre (FIR) tarafından üretiliyorsa, N aynı zamanda filtre derecesidir) temsil eder. **Denklem (1)**'de yer alan SL model tanımı, kompleks-değerli dairesel verilerin işlenmesine olanak sağlar [31, 32].

Eğer sistem WL model kullanılarak tanımlanacak olursa, sistemin çıkışı y_k 'nın aşağıdaki gibi ifade edilmesi gerekir:

$$y_k = \mathbf{x}_k^T \mathbf{h}_k + \mathbf{x}_k^H \mathbf{g}_k \quad (2)$$

burada $\mathbf{h}_k = [h_k, h_{k-1}, \dots, h_{k-N+1}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ve $\mathbf{g}_k = [g_k, g_{k-1}, \dots, g_{k-N+1}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ sırasıyla standart ve eşlenik ağırlık vektörlerini temsil eder. **Denklem (2)** artırılmış istatistik dikkate alınarak tanımlandığından tüm ikincideceden istatistiksel özellikleri yapısında barındırır ve hem dairesel hem de dairesel olmayan kompleks-değerli verilerin işlenmesine olanak sağlar [31, 32].

Bu iki model tanımının ardından hata sinyali, $e_k = d_k - y_k = (e_k^r + j e_k^i) \in \mathbb{C}$ kullanılarak hesaplanır, burada $j = \sqrt{-1}$, e_k^r ve e_k^i sırasıyla e_k 'ya ait reel ve imajiner kısımları, d_k ise ve beklenen (hedef) sinyali temsil eder.

2.2 Kompleks düzlemde çevrimiçi sansürleme

SL ve WL modeller dikkate alındığında, herhangi bir zaman indeksi k için beklenen skaler akış sinyali $d_k \in \mathbb{C}$ aşağıdaki gibi modellenebilir:

$$d_k = \mathbf{u}_k^T \mathbf{w}_o + v_k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

burada \mathbf{w}_o , \mathbf{u}_k ve v_k sırasıyla gerçek ağırlık vektörünü, giriş vektörünü ve giriş vektörüyle ilintisiz σ_v^2 varyanslı dairesel simetrik sıfır ortalamalı beyaz kompleks Gauss ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir. Ayrıca belirtmek gerekir ki; **Denklem (3)**'te SL model için $\mathbf{w}_o = \mathbf{h}_o \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ve $\mathbf{u}_k = \mathbf{x}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ olduğu, WL model için $\mathbf{w}_o = [\mathbf{h}_o^T, \mathbf{g}_o^T]^T \in \mathbb{C}^{2N \times 1}$ ve $\mathbf{u}_k = [\mathbf{x}_k^T, \mathbf{x}_k^H]^T \in \mathbb{C}^{2N \times 1}$ olduğu varsayılmaktadır. Burada \mathbf{h}_o gerçek standart ağırlık vektörü, \mathbf{g}_o gerçek eşlenik ağırlık vektörü ve $\mathbf{x}_k = [x_k, \dots, x_{k-N+1}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ ise giriş vektörüdür.

Sansürleme stratejisindeki ana amaç minimum kaynak gereksinimlerini kullanarak çevrimiçi olarak \mathbf{w}_o 'yı yani gerçek ağırlık vektörünü bulmaktır. Bu amaç doğrultusunda, ilk olarak FIR filtre yapısının çıkışının aşağıdaki gibi tanımlanması gerekir:

$$y_k = \mathbf{u}_k^T \mathbf{w}_k \quad (4)$$

burada \mathbf{w}_k ifadesi adaptif FIR filtrenin ağırlık vektörüdür. Hata sinyali ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$e_k = d_k - y_k = d_k - \mathbf{u}_k^T \mathbf{w}_k \quad (5)$$

Böylece OC stratejisi herhangi bir CASP algoritması için aşağıdaki gibi kullanılabilir:

$$(z_k, c_k) := \begin{cases} (d_k, 0), & \text{eğer } \left| \frac{e_k}{\sigma_v} \right| \geq \tau \\ (\circ, 1), & \text{aksi durum} \end{cases} \quad (6)$$

burada c_k ve $\tau_k > 0$ sırasıyla ikili sansürleme değişkenini ve k anındaki sansürleme eşik seviyesini temsil etmektedir.

Denklem (6)'dan gözlemlendiği üzere, eğer $c_k = 1$ olursa, ilgilenilen akış verileri önce daha az bilgilendirici veri olarak etiketlenir ve ardından başka bir işlemde kullanılmadan sansürlenir. Eğer $c_k = 0$ olur ise, ilgilenilen akış verileri önce en bilgilendirici veri olarak etiketlenir ve ardından güncelleme işlemine dahil edilir. **Denklem (6)**'da verilen OC stratejisi sayesinde her bir ölçüm anlık olarak "bilgilendirici (informative)" veya "bilgilendirici olmayan (noninformative)" ölçüm/verisi olarak sınıflandırılabilir. Sansürleme eşik seviyesi τ 'nın seçimi, sansürleme oranını doğrudan etkilediğinden, bu eşik seviyesine; CASP algoritmalarının arzu edilen sansürleme oranı P_{ce} 'yi elde etmesi için bir değer atanması gerekir. Bu kapsamda τ aşağıdaki denklem yardımıyla atanabilir [59]:

$$\tau = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{1 - P_{ce}} \right)}. \quad (7)$$

burada $P_{ce} = (K - p) / K$ 'dır ve K toplam veri sayısını temsil ederken, p bilgilendirici (sansürlenmemiş) veri sayısını temsil eder.

2.3 OC-ACRLS algoritması

Klasik CRLS ve ACRLS algoritmaları, bilindiği üzere deterministik maliyet fonksiyonu olan $J_k = \sum_{n=0}^k \beta^{k-n} |e_n|^2$ fonksiyonu minimize edilerek türetilmektedirler. Aksine, OC-ACRLS algoritmasını türetmek için ise öncelikle bu deterministik maliyet fonksiyonunda yer alan $|e_n|^2$ ifadesinin, **Denklem (6)**'da sunulan OC stratejisi dikkate alınarak aşağıdaki gibi tanımlanması gerekir [59]:

$$f_n := \begin{cases} |e_n|^2 - \tau^2 \sigma_v^2, & \text{eğer } |e_n| \geq \tau \sigma_v \\ 0, & \text{eğer } |e_n| < \tau \sigma_v \end{cases} \quad (8)$$

burada $e_n = d_n - y_n = d_n - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_n - \mathbf{g}_{k-1}^H \mathbf{x}_n^*$, en son filtre ağırlık katsayıları kümesi kullanılarak hesaplanan zaman indeksi n 'deki hata sinyalidir.

Ardından ise **Denklem (8)** kullanılarak kesilmiş (truncated) maliyet fonksiyonu $J_k^{(\tau)}$, yeniden şu şekilde yazılır:

$$J_k^{(\tau)} := \sum_{n=0}^k \beta^{k-n} f_n \quad (9)$$

burada $\beta \in (0,1]$ ifadesi üstel ağırlıklandırma (unutma) faktörünü temsil etmektedir.

ACRLS [55] algoritmasının türetilmesine benzer bir yol izlenerek maliyet fonksiyonu $J_k^{(\tau)}$ ifadesi \mathbf{h}_{k-1}^* ve \mathbf{g}_{k-1}^* 'ye göre minimize edilir ise OC-ACRLS algoritmasının ağırlık vektörü güncelleme kuralları aşağıdaki gibi elde edilmiş olur [59]:

$$\text{Eğer } |e_k| \geq \tau\sigma_v, \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k \\ \mathbf{g}_k := \mathbf{g}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k^* \\ \mathbf{C}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^H) \\ \mathbf{D}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{D}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^T) \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Aksi durum, } \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} \\ \mathbf{g}_k := \mathbf{g}_{k-1} \\ \mathbf{C}_k := \mathbf{C}_{k-1} \\ \mathbf{D}_k := \mathbf{D}_{k-1} \end{cases}$$

burada $\mathbf{z}_k = \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_{k-1} \mathbf{x}_k^*$ ve $e_k = d_k - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k - \mathbf{g}_{k-1}^H \mathbf{x}_k^*$, $\mathbf{k}_k = \frac{\mathbf{z}_k}{\beta + 2\text{Re}\{\mathbf{z}_k^H \mathbf{x}_k\}}$, \mathbf{C}_k ve \mathbf{D}_k sırasıyla önsel kestirim

hatası, kazanç vektörü ve klasik kovaryans \mathbf{R}_{xx} ve sözde-kovaryans \mathbf{P}_{xx} matrislerinin terslerinin örnek kestirimleridir.

Açıklama 1: Giriş sinyalinin istatistiksel özelliklerinden bağımsız olan klasik ACRLS algoritması [55] dairesel ve dairesel olmayan kompleks-değerleri verilerin işlenmesinde üstün başarımla ortaya koymasına rağmen, WL modelinden kaynaklanan klasik \mathbf{R}_{xx} ve sözde-kovaryans \mathbf{P}_{xx} matrislerinin tersinin örnek kestirimleri nedeniyle yönetilemez bir hesaplama yüküne sahiptir. Denklem (10)'dan gözlemlendiği gibi; OC-ACRLS algoritması [59] klasik ACRLS'den farklı olarak, yapısındaki OC stratejisi sayesinde \mathbf{h}_k , \mathbf{g}_k , \mathbf{C}_k ve \mathbf{D}_k 'yi yalnızca $|e_k| \geq \tau\sigma_v$ koşulu altında gelen bilgilendirici veriler için günceller. Bu önemli özelliği sayesinde, OC-ACRLS algoritması veri işleme maliyetini; yakınsama ve kararlı durum başarımlarını koruyarak, klasik ACRLS algoritmasına göre önemli ölçüde azaltır. Tablo 1'de OC-ACRLS algoritmasının sözde koduna ayrıca yer verilmiştir.

2.1 OC-CRLS algoritması

Denklem (9)'da yer alan maliyet fonksiyonu $J_k^{(\tau)}$ 'nin, hata sinyali $e_n = d_n - y_n = d_n - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_n$ ile tanımlanması ve arından \mathbf{h}_{k-1}^* 'e göre minimize edilmesi sonucunda ise OC-CRLS [59] algoritmasına ait güncelleme aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\text{Eğer } |e_k| \geq \tau\sigma_v, \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k \\ \mathbf{C}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^H) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Aksi durum, } \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} \\ \mathbf{C}_k := \mathbf{C}_{k-1} \end{cases}$$

burada $\mathbf{z}_k = \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{x}_k$, $e_k = d_k - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k$ ve $\mathbf{k}_k = \frac{\mathbf{z}_k}{\beta + \text{Re}\{\mathbf{z}_k^H \mathbf{x}_k\}}$ 'dır.

Açıklama 2: OC-CRLS algoritmasının hesaplama karmaşıklığı, OC-ACRLS algoritmasının yaklaşık yarısı kadardır. CRLS'nin aksine OC-CRLS algoritması [59], veri işleme maliyetinde önemli tasarruf sağlar. Ayrıca, Tablo 2'de OC-CRLS algoritmasının sözde koduna yer verilmiştir.

Tablo 1. OC-ACRLS algoritmasının sözde kodu

Parametreler: $0 < \beta < 1$ ve N	
Başlangıç Koşulları: $\mathbf{h}_0 = \mathbf{g}_0 = \mathbf{0} + j\mathbf{0}$, $\mathbf{C}_0 = \delta^{-1}\mathbf{I}$,	
$\mathbf{D}_0 = \mathbf{0}$, $\hat{\sigma}_{v,0}^2 = 0$, $P_{ce} = \frac{K-p}{K}$ ve $\tau = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1-P_{ce}}\right)}$	
Veri: $\{x_k, d_k\}_{k=1}^K$.	
Döngü: $k = 1, 2, \dots, K$	
$y_k = \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k - \mathbf{g}_{k-1}^H \mathbf{x}_k^*$	
$e_k = d_k - y_k = d_k - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k - \mathbf{g}_{k-1}^H \mathbf{x}_k^*$	
$\hat{\sigma}_{v,k}^2 = \rho \hat{\sigma}_{v,k-1}^2 + (1-\rho) e_k ^2$	
$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_{k-1} \mathbf{x}_k^*$	
$\mathbf{k}_k = \frac{\mathbf{z}_k}{\beta + 2\text{Re}\{\mathbf{z}_k^H \mathbf{x}_k\}}$	
Eğer $ e_k \geq \tau\sigma_v$, $\begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k \\ \mathbf{g}_k := \mathbf{g}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k^* \\ \mathbf{C}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^H) \\ \mathbf{D}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{D}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^T) \end{cases}$	
Aksi durum, $\begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} \\ \mathbf{g}_k := \mathbf{g}_{k-1} \\ \mathbf{C}_k := \mathbf{C}_{k-1} \\ \mathbf{D}_k := \mathbf{D}_{k-1} \end{cases}$	
Bitiş	

Tablo 2. OC-CRLS algoritmasının sözde kodu

Parametreler: $0 < \beta < 1$ ve N

Başlangıç Koşulları: $\mathbf{h}_0 = \mathbf{0} + j\mathbf{0}$, $\mathbf{C}_0 = \delta^{-1}\mathbf{I}$,

$$\hat{\sigma}_{v,0}^2 = 0, P_{ce} = \frac{K-p}{K} \text{ ve } \tau = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1-P_{ce}}\right)}$$

Veri: $\{x_k, d_k\}_{k=1}^K$.

Döngü: $k = 1, 2, \dots, K$

$$y_k = \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k$$

$$e_k = d_k - y_k = d_k - \mathbf{h}_{k-1}^H \mathbf{x}_k$$

$$\hat{\sigma}_{v,k}^2 = \rho \hat{\sigma}_{v,k-1}^2 + (1-\rho)|e_k|^2$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{C}_{k-1} \mathbf{x}_k$$

$$\mathbf{k}_k = \frac{\mathbf{z}_k}{\beta + \text{Re}\{\mathbf{z}_k^H \mathbf{x}_k\}}$$

$$\text{Eğer } |e_k| \geq \tau \hat{\sigma}_v, \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} + e_k^* \mathbf{k}_k \\ \mathbf{C}_k := \frac{1}{\beta} (\mathbf{C}_{k-1} - \mathbf{k}_k \mathbf{z}_k^H) \end{cases}$$

$$\text{Aksi durum, } \begin{cases} \mathbf{h}_k := \mathbf{h}_{k-1} \\ \mathbf{C}_k := \mathbf{C}_{k-1} \end{cases}$$

Bitiş

3 Benzetim çalışmaları ve tartışma

Bu bölümde, OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının öğrenme başarımı kompleks-değerli gerçek dünya regresyon problemleri üzerinde test edilmiştir. Bu kapsamda, iki adet gerçek veri seti kullanılmış. İlk veri kümesi, FIFA 19 Complete Player veri kümesidir [60]. İkinci veri kümesi ise büyük-ölçekli bir veri kümesi olan Block Feedback veri kümesidir [61]. Veri kümelerine ait bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

FIFA 19 veri kümesinde, futbol oyuncularının tüm istatistikleri ve oyun özellikleri yer almaktadır. Toplamda 73 adet önceden işlenmiş özneliğe sahip, 14743 adet giriş-çıkış örneğinden oluşmaktadır. Öncelikli olarak giriş verileri, 1 ile -1 arasında olacak şekilde normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur ve daha sonra aşağıdaki gibi kompleks-değerli forma dönüştürülmüştür:

$$\mathbf{x}_k = [1 + j1, x_{k,1} + jx_{k,2}, x_{k,3} + jx_{k,4}, \dots, x_{k,73} + j0]^T \quad (12)$$

burada kompleks-değerli her bir giriş verisi, ardışık reel-değerli çiftler ile eşleştirilmiş ve çift olmayan son giriş verisi ise $j0$ değeri ile eşleştirilmiştir. Denklem (12)'de $1 + j1$ değeri eşik değeri (bias) temsil etmektedir. Ayrıca belirtmek gerekir ki; verilerin kompleks düzlemde ifade edilmesi, reel düzleme kıyasla boyutu yarı yarıya azalmıştır. Bu da kompleks-düzlemin; artırılmış istatistik içermeyen OC-CRLS algoritması için önemli bir avantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

Block feedback veri kümesi ise herhangi bir gönderinin kaç yorum alacağını tahmin etmek için kullanılan büyük-ölçekli bir veri kümesidir. Toplam 272 öznelikten (NaN öznelikleri hariç) oluşmakta olup, her bir özneliğin toplam örnek sayısı 52397'dir. Bir önceki veri kümesinde olduğu gibi, benzetimlerde giriş verileri, 1 ile -1 arasında olacak şekilde normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur ve daha sonra aşağıdaki gibi kompleks-değerli forma dönüştürülmüştür:

$$\mathbf{x}_k = [1 + j1, x_{k,1} + jx_{k,2}, \dots, x_{k,271} + jx_{k,272}]^T \quad (13)$$

Benzetim çalışmalarında, algoritmaların regresyon başarımları ölçülürken ilgili veri kümelerinin %70'i eğitim aşamasında, %30'u ise test aşamasında kullanılmıştır. Eğitim aşamasındaki devir sayısı (epoch) 3000'e ayarlanmıştır. Ayrıca algoritmaların eğitim ve test başarımları; ortalama kare hata (Mean square error, MSE), regresyon katsayısı ve çalışma süreleri açısından incelenmiştir. Ayrıca, her iki veri kümesi için OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının sansürleme oranı $P_{ce} = \%50$ olarak ayarlanmıştır ve algoritmaların ait parametreler şu şekildedir.

FIFA 19 veri kümesi:

- CRLS, ACRLS, OC-CRLS ve OC-ACRLS için $\lambda = 0.9995$, $\rho = 0.55$, $\mathbf{C}_0 = 10^2 \mathbf{I}$, $\mathbf{D}_0 = \mathbf{0}$ ve $\hat{\sigma}_{v,0}^2 = 0$ olarak seçilmiştir.

Block feedback veri kümesi:

- CRLS, ACRLS, OC-CRLS ve OC-ACRLS için $\lambda = 0.9995$, $\rho = 0.65$, $\mathbf{C}_0 = 10^2 \mathbf{I}$, $\mathbf{D}_0 = \mathbf{0}$ ve $\hat{\sigma}_{v,0}^2 = 0$ olarak seçilmiştir.

FIFA 19 veri kümesi için Şekil 1, 2, 3 ve 4'te sırasıyla algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri, eğitim regresyonları, test MSE (dB) eğrileri ve test regresyonları verilmiştir. Block feedback veri kümesi için ise Şekil 5, 6, 7 ve 8'de sırasıyla algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri, eğitim regresyonları, test MSE (dB) eğrileri ve test regresyonları verilmiştir. Bu sonuçlara ek olarak ise Tablo 3 ve 4'te sırasıyla FIFA 19 ve Block feedback veri kümeleri için algoritmaların kestirilmiş sansürleme oranı, test MSE değerleri ve çalışma süreleri sunulmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre algoritmaların başarımları hakkında aşağıdaki yorumlar yapılmıştır.

Şekil 1'de FIFA 19 veri kümesi için algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri incelendiğinde; önerilen OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmaları eğitim verilerinin sadece % 50'sini kullanarak, kendilerinin klasik eşlenikleri olan CRLS ve ACRLS algoritmalarına yakın başarımlar sergilemiştir. Burada, OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmaları yapılarında bulunan OC stratejisi sayesinde sadece bilgilendirici veriler ile eğitim sürecini gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda, OC-ACRLS ve ACRLS algoritmaları artırılmış istatistikleri kullanan algoritmalar olduğundan dolayı OC-CRLS ve CRLS algoritmalarından daha üstün MSE (dB) başarımları elde etmiştir. Bu sonuçları daha da açığa kavuşturmak için Şekil 2'de aynı veri kümesi için algoritmaların eğitim

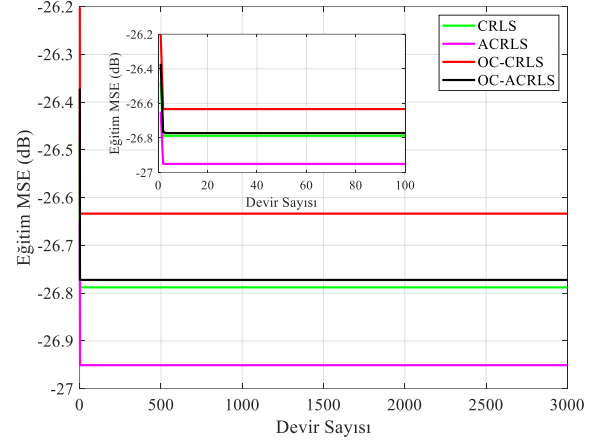
regresyon değerleri incelenmiştir. İncelenen bu sonuçlar, bütün algoritmaların, 0.89 değerine yakın korelasyon değerleri ürettiğini göstermiştir. Özellikle, OC-ACRLS algoritmasının diğer algoritmalarından bir miktar daha iyi korelasyon değeri ürettiği gözlemlenmiştir. Şekil 3'te ise eğitim süreci tamamlanan algoritmaların test MSE (dB) başarımları incelenmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere, OC-CRLS'nin test başarımları CRLS'den, OC-ACRLS'ninki ise ACRLS'den daha iyidir. Burada asıl vurgulanması gereken durum şudur: örneğin; önerilen OC-ACRLS algoritması eğitim aşamasında sadece bilgilendirici verileri kullanarak ve bu sayede eğitim süresini azaltarak, eğitim verilerinin % 100'ünü kullanan ACRLS algoritması ile neredeyse aynı eğitim MSE (dB) başarımları elde etmiştir. Ayrıca, Şekil 4'te test regresyon sonuçları incelendiğinde ise önerilen OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmaları en iyi korelasyon değerlerini elde etmiştir.

Şekil 5'te block feedback veri kümesi için algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri incelendiğinde; artırılmış istatistik tabanlı kompleks-değerli algoritmaların tamamı kendilerinin klasik versiyonlarından daha üstün eğitim MSE (dB) başarımları göstermiştir. Şekil 5'ten gözlemlendiği üzere en iyi MSE (dB) başarımlarını hızlı yakınsama oranı ve düşük MSE (dB) değerleri ile OC-ACRLS ve ACRLS algoritmaları göstermiştir. Şekil 5'te verilen bu eğitim MSE (dB) sonuçlarını, aynı zamanda Şekil 6'da verilen regresyon sonuçları da desteklemektedir. Buradan görüleceği üzere, önerilen OC-ACRLS algoritmasının korelasyon değeri 1'e oldukça yakındır. Şekil 7'de ise eğitim sürecinden geçirilen bu algoritmaların test MSE (dB) başarımları incelenmiştir ve Şekil 6'daki sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiştir. Yine gözlemlendiği üzere önerilen OC-ACRLS algoritması eğitim aşamasında sadece bilgilendirici verileri kullanarak ve bu sayede eğitim süresini ciddi anlamda azaltarak, eğitim verilerinin % 100'ünü kullanan ACRLS algoritmasından oldukça üstün test MSE (dB) başarımları elde etmiştir. Ayrıca, Şekil 8'de test regresyon sonuçları incelendiğinde ise önerilen OC-ACRLS algoritması 1'e oldukça yakın korelasyon değeri elde etmiştir.

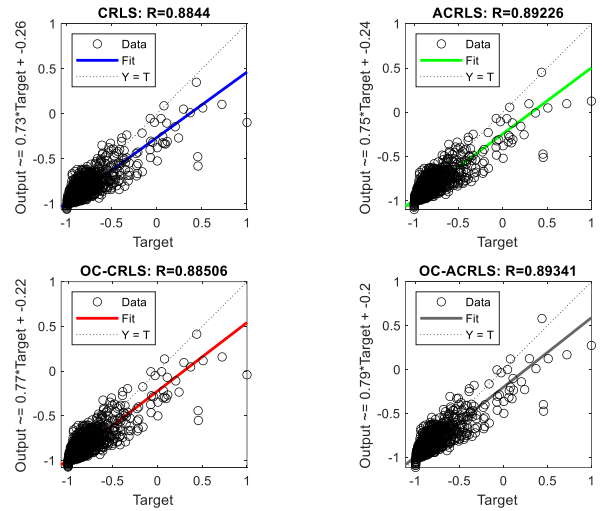
Tablo 3'ten gözlemleneceği üzere FIFA 19 veri kümesi için OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmaları için kestirilmiş sansürleme \hat{P}_{ce} değerleri, kullanıcı tarafından belirlenen gerçek sansürleme P_{ce} değerlerine oldukça yakındır. Ayrıca burada en iyi test MSE değerini OC-ACRLS algoritması elde etmiştir. Aynı zamanda, bu algoritmanın eğitim aşaması 405.6 saniye sürerken kendisinin klasik versiyonu olan ACRLS'in eğitim aşaması 768 saniye sürmüştür. Ayrıca, OC mekanizmasının OC-ACRLS algoritmasının eğitim süresini yaklaşık %50 oranında azalttığını burada belirtmekte fayda vardır. Bu sonuçlar, OC-ACRLS algoritmasının yüksek test MSE başarımlarından ve düşük eğitim süresinden dolayı büyük-ölçekli veri kümelerinin regresyonunda kolaylıkla kullanılabilceğini göstermiştir.

Block feedback veri kümesi, FIFA veri kümesine göre daha büyük boyutlu olduğundan, Tablo 4'te, önerilen OC-ACRLS algoritmasının hem eğitim süresi hem de test MSE değeri açısından diğer algoritmalara göre daha tercih edilebilir olduğu görülmektedir. Örneğin, OC-ACRLS

algoritması çok düşük test MSE değerini yaklaşık 6860 saniyelik bir eğitimin ardından sağlarken kendisinin klasik versiyonu olan ACRLS algoritması daha yüksek MSE değerini yaklaşık 15633 saniyede sağlamıştır. Sonuç olarak; hem OC-CRLS hem de OC-ACRLS ciddi anlamda daha kısa eğitim süreleri sağlayarak, tatmin edici test MSE başarımları elde etmiştir.



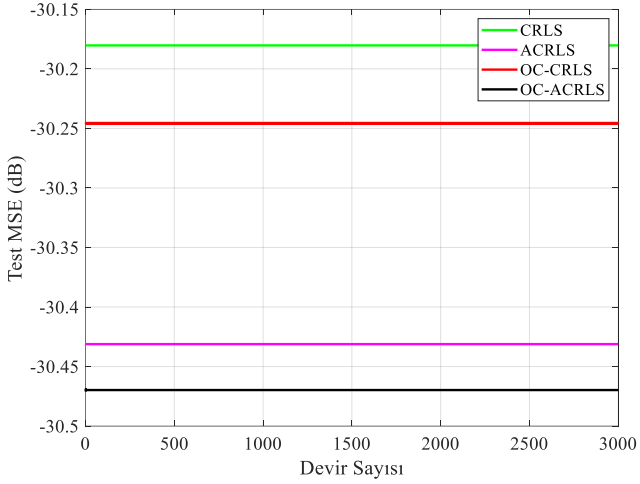
Şekil 1. FIFA 19 veri kümesi için algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri



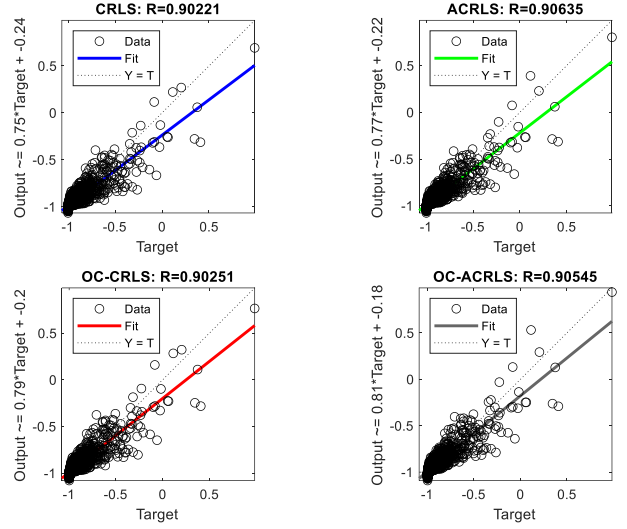
Şekil 2. FIFA 19 veri kümesi için algoritmaların eğitim regresyonları

Tablo 3. FIFA 19 veri kümesi için kestirilmiş sansürleme oranları, test mse değerleri ve çalışma süreleri, $P_{ce} = \%50$

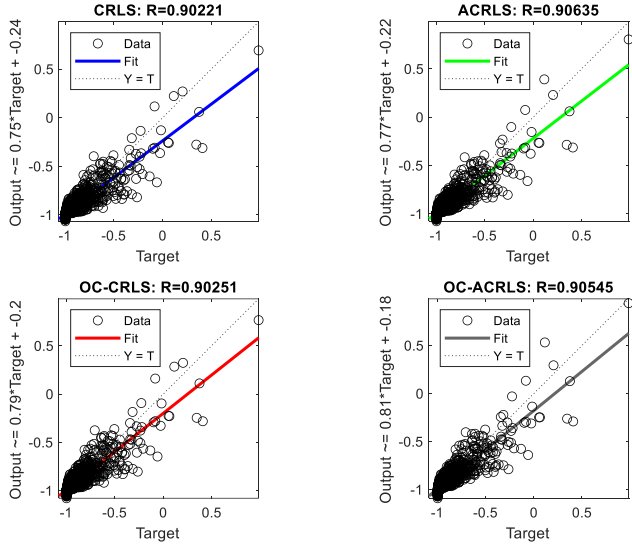
Algoritmalar	\hat{P}_{ce}	Test MSE	Çalışma Süresi (Saniye)
CRLS	-	9.5934e-04	379.5
OC-CRLS	% 56.82	9.4500e-04	210.9
ACRLS	-	9.0549e-04	768.9
OC-ACRLS	% 58.05	8.9748e-04	405.6



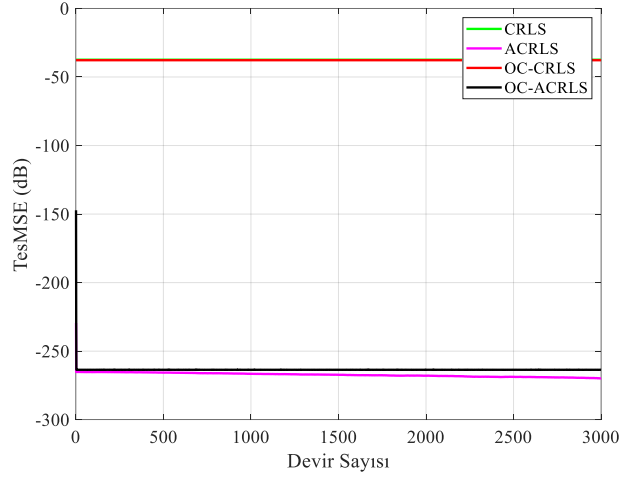
Şekil 3. FIFA 19 veri kümesi için algoritmaların test MSE (dB) eğrileri



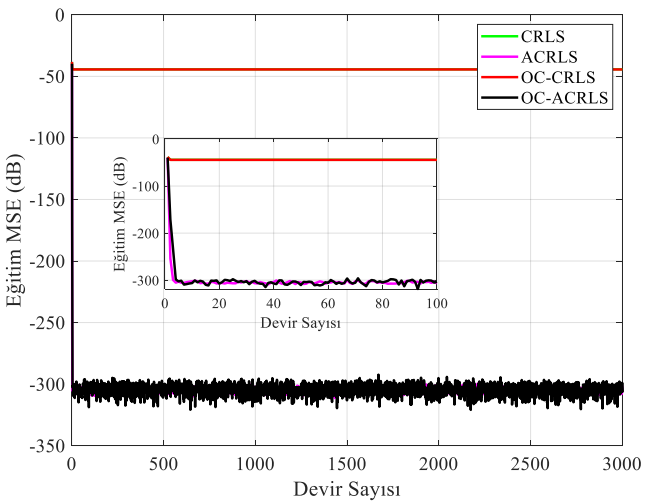
Şekil 6. Blok feedback veri kümesi için algoritmaların eğitim regresyonları



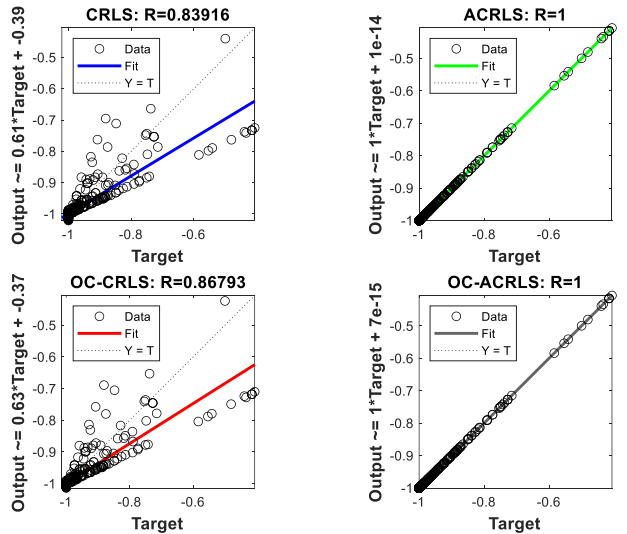
Şekil 4. FIFA 19 veri kümesi için algoritmaların test regresyonları



Şekil 7. Blok feedback veri kümesi için algoritmaların test MSE (dB) eğrileri



Şekil 5. Blok feedback veri kümesi için algoritmaların eğitim MSE (dB) eğrileri



Şekil 8. Blok feedback veri kümesi için algoritmaların test regresyonları

Tablo 4. Block feedback veri kümesi için kestirilmiş sansürleme oranları, test MSE değerleri ve çalışma süreleri, $P_{ce} = \%50$

Algoritmalar	\hat{P}_{ce}	Test MSE	Çalışma Süresi (Saniye)
CRLS	-	1.8170e-04	7885.8
OC-CRLS	% 45.81	1.6707e-04	4901.7
ACRLS	-	1.0459e-27	15633
OC-ACRLS	% 64.15	4.3695e-27	6860.1

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, son zamanlarda önerilen OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının başarımları ilk defa regresyon problemleri üzerinde detaylı olarak test edilmiş ve literatürde yer alan klasikleri (CRLS ve ACRLS) ile karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmaları, OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, OC mekanizmasının getirmiş olduğu avantajlardan dolayı kompleks düzlemde tanımlanmış olan büyük-ölçekli regresyon problemlerinde eğitim süresini yaklaşık % 50 oranda kısalttığını ve test başarımını negatif yönde etkilemediğini göstermiştir. Bu da OC-CRLS ve OC-ACRLS algoritmalarının, kompleks düzlemde tanımlanabilen büyük veri akışı uygulamalarında etkin ve güçlü algoritmalar olduğunu kanıtlamıştır.

Teşekkür

Bu çalışma kısmen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 121E324).

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

[1] Z. Han, M. Hong and D. Wang, Signal Processing and Networking for Big Data Applications (1. Basım). United Kingdom: Cambridge Core, 2017.
[2] K. Slavakis, G. B. Giannakis and G. Mateos, Modeling and optimization for big data analytics: (Statistical) learning tools for our era of data deluge. IEEE Signal Processing Magazine, 31 (5), 18-31, 2014.
[3] T. Bengtsson, P. Bickel and B. Li, Curse-of-dimensionality revisited: Collapse of the particle filter in very large scale systems. Probability and Statistics: Essays in Honor of David A. Freedman, 2, 316-334, 2008.
[4] M. I. Jordan, On statistics, computation and scalability. Bernoulli, 19 (4), 1378-1390, 2013.
[5] J. Mairal, F. Bach, J. Ponce and G. S.apiro, Online learning for matrix factorization and sparse coding. Journal of Machine Learning Research, 11, 19-60, 2010.
[6] M. Mardani, G. Mateos and G. B. Giannakis, Dynamic anomalography: Tracking network anomalies via sparsity and low rank. IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 7 (1), 50-66, 2013.

[7] S. Theodoridis, K. Slavakis and I. Yamada, Adaptive learning in a world of projections: A unifying framework for linear and nonlinear classification and regression tasks. IEEE Signal Process, 28, 97-123, 2011.
[8] J. Qiu, Q. Wu, Y. Xu and S. Feng, A survey of machine learning for big data processing. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 1 (67), 1-16, 2016.
[9] A. L'Heureux, K. Grolinger, H. F. Elyamany and M. A. M. Capretz, Machine learning with big data: challenges and approaches. IEEE Access, 5, 7776-7797, 2016.
[10] K. Slavakis, S. J. Kim, G. Mateos and G. B. Giannakis, Stochastic approximation vis-a-vis online learning for big data analytics. IEEE Signal Proc Mag., 31 (6), 124-129, 2014.
[11] D. Berberidis, V. Kekatos and G. B. Giannakis, Online censoring for large-scale regressions with application to streaming big data. IEEE Trans. Signal Process., 64 (15), 3854-3867, 2016.
[12] L. Evers and C. M. Messow, Sparse kernel methods for high-dimensional survival data. Bioinformat., 14 (2), 1632-1638, 2008.
[13] J. Tobin, Estimation of relationships for limited dependent variables. Econometrica: J. Econometr. Soc., 26 (1), 24-36, 1958.
[14] S. Maleki and G. Leus, Censored truncated sequential spectrum sensing for cognitive radio networks. IEEE J. Sel. Areas Commun., 31 (3), 364-378, 2013.
[15] T. Amemiya, Tobit models: A survey. J. Econom., 24 (1), 3-61, 1984.
[16] E. Msechu and G. B. Giannakis, Sensor-centric data reduction for estimation with WSNs via censoring and quantization. IEEE Trans. Signal Process., 60 (1), 400-414, 2012.
[17] K. You, L. Xie and S. Song, Asymptotically optimal parameter estimation with scheduled measurements, IEEE Trans. Signal Process., 61 (14), 3521-3531, 2013.
[18] D. Berberidis and G. B. Giannakis, Data sketching for large-scale Kalman filtering. IEEE Trans. Signal Process., 65(14), 3688-3701, 2017.
[19] Arroyo-Valles, R. S. Maleki and G. Leus, A censoring strategy for decentralized estimation in energy-constrained adaptive diffusion networks. IEEE 14th Workshop Signal Process. Adv. Wireless Commun., 155-159, 2013.
[20] R. Jiang, B. Chen, Fusion of censored decisions in wireless sensor networks. IEEE Trans. Wireless Commun., 4 (6), 2668-2673, 2005.
[21] Z. Wang, Z. Yu, Q. Ling, D. Berberidis and G. B. Giannakis, Decentralized rls with data-adaptive censoring for regressions over large-scale networks. IEEE Trans. Signal Process., 66 (6), 1634-1648, 2018.
[22] H. Zhu, H. Qian, X. Luo and Y. Yang, Adaptive queuing censoring for big data processing. IEEE Signal Process. Lett., 25 (5), 610-614, 2018.
[23] A. O. Sarp, E. C. Mengüç, M. Peker and B. Ç. Güvenç, Data-adaptive censoring for short-term wind speed predictors based on MLP, RNN, and SVM. IEEE Systems Journal, 16 (3), 3625-3634, 2022.

- [24] J. Ferreira, M. Mendonca and P. S. Diniz, Data selection in neural networks. *IEEE Open Journal of Signal Processing*, 2, 522-534, 2021.
- [25] M. J. M. Spelta and W. A. Martins, Normalized lms algorithm and data-selective strategies for adaptive graph signal estimation. *Signal Process.*, 167, 107326, 2020.
- [26] K. L. Yin, Y. F. Pu and L. Lu, Censored regression distributed functional link adaptive filtering algorithm over nonlinear networks. *Signal Process.*, 190, 108318, 2022.
- [27] Y. Eren, B. Ç. Güvenç and E. C. Mengüç, Online censoring based acoustic feedback cancellation for wearable hearing aids. *30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4, Karabük, Türkiye, 2022.
- [28] E. C. Mengüç, S. Çınar, M. Xiang and D. P. Mandic, Online censoring based weighted-frequency fourier linear combiner for estimation of pathological hand tremors. *IEEE Signal Process. Lett.*, 28, 1460-1464, 2021.
- [29] P. S. R. Diniz, On data-selective adaptive filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66 (16), 4239-4252, 2018.
- [30] A. Stott, S. Kanna and D. P. Mandic, Widely linear complex partial least squares for latent subspace regression. *Signal Processing*, 152, 350-362, 2018.
- [31] D. P. Mandic and S. L. Goh, *Complex Valued Nonlinear Adaptive Filters: Noncircularity Widely Linear and Neural Models*. United Kingdom: Wiley, 2009.
- [32] T. Adalı, S. Haykin, *Adaptive Signal Processing: Next Generation Solutions*. Wiley: IEEE Press, 2010.
- [33] Y. Xia, C. C. Took and D. P. Mandic, An augmented affine projection algorithm for the filtering of noncircular complex signals. *Signal Process.*, 90, 1788-1799, 2010.
- [34] B. Jelfs, D. P. Mandic and S. C. Douglas, An adaptive approach for the identification of improper complex signals. *Signal Process.*, 92, 335-344, 2012.
- [35] T. Adalı, P. J. Schreier and L. L. Scharf, Complex-valued signal processing: The proper way to deal with impropriety. *IEEE Trans. Signal Process.*, 59 (11), 5101-5125, 2011.
- [36] P. J. Schreier and L. L. Scharf, *Statistical Signal Processing of Complex- Valued Data: The Theory of Improper and Noncircular Signals (1. Basım)*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [37] E. C. Mengüç and N. Acır, An augmented complex-valued Lyapunov stability theory based adaptive filter algorithm. *Signal Processing.*, 137, 10-21, 2017.
- [38] E. C. Mengüç and N. Acır, An augmented complex-valued least-mean kurtosis algorithm for the filtering of noncircular signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66 (2), 438-448, 2018.
- [39] B. Widrow, J. McCool and M. Ball, The complex LMS algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 63 (4), 719-720, 1975.
- [40] A. Tarighat and A. H. Sayed, Least mean-phase adaptive filters with application to communications systems. *IEEE Signal Processing Letters.*, 11 (2), 220-223, 2004.
- [41] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory (4. Basım)*. Prentice-Hall, Upper Saddle River: Pearson Education, 2002.
- [42] A. Khalili, A. Rastegarnia, W. M. Bazzi and Z. Yang, Derivation and analysis of incremental augmented complex least mean square algorithm. *IET Signal Process.*, 9 (4), 312-319, 2014.
- [43] B. Picinbono and P. Chevalier, Widely linear estimation with complex data. *IEEE Trans. Signal Process.*, 43 (8), 2030-2033, 1995.
- [44] E. C. Mengüç and N. Acır, Complex-valued least mean kurtosis adaptive filter algorithm. *23rd Signal Process. Commun. Appl. Conf.*, 325-328, 2016.
- [45] A. Khalili and A. Rastegarnia, Tracking analysis of augmented complex least mean square algorithm. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.*, 30 (1), 106-114, 2016.
- [46] A. Hakkarainen, J. Werner, K. R. Dandekar and M. Valkama, Analysis and augmented spatial processing for uplink OFDMA MU-MIMO receiver with transceiver I/Q imbalance and external interference. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 15 (5), 3422-3439, 2016.
- [47] Z. Shan and T. S. P. Yum, A conjugate augmented approach to direction of-arrival estimation. *IEEE Trans. Signal Process.*, 53 (11), 4104-4109, 2005.
- [48] P. Chevalier and A. Blin, Widely linear MVDR beamformers for the reception of an unknown signal corrupted by noncircular interferences. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55 (11), 5323-5336, 2007.
- [49] S. Javidi, D. P. Mandic and A. Cichocki, Complex blind source extraction from noisy mixtures using second-order statistics. *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 57 (7), 1404-1416, 2010.
- [50] C. Park, C. C. Took and D. P. Mandic, Augmented complex common spatial patterns for classification of noncircular EEG from motor imagery tasks. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehab. Eng.*, 22 (1), 1-10, 2014.
- [51] H. Li, N. M. Correa, P. A. Rodriguez, V. D. Calhoun and T. Adalı, Application of independent component analysis with adaptive density model to complex-valued fMRI data. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58 (10), 2794-2803, 2011.
- [52] Y. Xia, S. C. Douglas and D. P. Mandic, Adaptive frequency estimation in smart grid applications: exploiting noncircularity and widely linear adaptive estimators. *IEEE Signal Process.*, 29 (5), 44-54, 2012.
- [53] Y. Xia and D. P. Mandic, Widely linear adaptive frequency estimation of unbalanced three-phase power systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.*, 61 (1), 74-83, 2012.
- [54] S. Javidi, S. L. Goh, M. Pedzisz and D. P. Mandic, The augmented complex least mean square algorithm with application to adaptive prediction problems. *Proc. 1st IARP Workshop Cogn. Inform. Process.*, 54-57, 2008.

- [55] S. Douglas, Widely-linear recursive least-squares algorithm for adaptive beamforming. Proc. the IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Process., 2041-2044, 2009.
- [56] B. Jelfs, D. P. Mandic and S. C. Douglas, An adaptive approach for the identification of improper complex signals. Signal Process., 92, 335-344, 2012.
- [57] C. Jahanchahi, S. Kanna and D. P. Mandic, Complex dual channel estimation: Cost effective widely linear adaptive filtering. Signal Process., 104, 33-42, 2014.
- [58] A. H. Sayed, Fundamentals of Adaptive Filtering (1. Basım). NJ: Wiley, 2003.
- [59] E. C. Mengüç, M. Xiang and D. P. Mandic, Online censoring based complex-valued adaptive filters. Signal Processing, 200, 108638, 2022.
- [60] Kaggle, Fifa 19 Dataset. <https://www.kaggle.com/karangadiya/fifa19>, Accessed 16 February 2022.
- [61] UC Irvine Machine Learning Repository, Block Feedback Dataset. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/BlockFeedback>, Accessed 8 May 2022.





Analysis of fault ride through the improvement of PV power plant based on artificial neural network

Yapay sinir ağına dayalı bir FV güç santralının arızalarının iyileştirilmesi yoluyla analizi

Altan Gencer^{1,*} 

¹ Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Electrical and Electronics Engineering Department, 50300, Nevşehir, Turkey

Abstract

The increasing adoption of renewable energy sources in industrial areas, driven by the need to both obtain a grid voltage from renewable energy sources and reduce high electricity bills, has led to an increased demand for solutions that can improve the power quality of these systems. A photovoltaic power plant (PVPP) based on a dc-chopper circuit protection system is proposed for the enhancement of the power quality of PVPP. The aim of the presented protection method is to protect the panels in the PVPP from the harmful effects of the high dc-voltage that occurs during grid faults. The adaptive neural network control system is applied in both the T-type inverter and the dc-chopper circuit protection system. The proposed protection system is implemented with a 250 kW PVPP to verify its validity with simulation results during grid fault. This approach can potentially improve the reliability and stability of PVPP, and contribute to the maintain of PVPP into the grid.

Keywords: Photovoltaic power plant, Artificial neural network, dc-chopper circuit,

1 Introduction

The use of solar photovoltaic energy as a source of renewable energy has been gaining significant importance in recent years [1,2]. As a result, the operation and design of photovoltaic power plant (PVPP) have become a crucial issue in relation to electrical grids [3]. The reliability and stability of the power system are crucial in ensuring a safe and efficient power supply and meeting the increasing demand for renewable energy sources [4,5]. Grid faults can occur due to various reasons such as lightning strikes, short circuits, or the connection of large loads on the electrical power grid system [6]. These faults can cause the voltage value in the electrical grid system to fall below its nominal value and can have detrimental effects on devices that are sensitive to voltage fluctuations [7]. It can also lead to a loss of power generation and cause damage to the PVPP system [8]. During a grid fault, the PVPP must be able to stay connected to the grid to prevent power outages. If the voltage value does not recover 90% within 1.5 seconds, the grid-connected PVPP is disconnected from the power system

Öz

Hem yenilenebilir enerji kaynaklardan bir şebeke gerilimi elde etme hem de yüksek elektrik faturalarını azaltma ihtiyacından kaynaklanan endüstriyel alanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek daha fazla benimsenmesi bu sistemlerin güç kalitesini iyileştirebilecek çözümlere olan talebin artmasına neden olmaktadır. Fotovoltaik enerji santralının (FVES) güç kalitesinin artırılması için da-kıyıcı devre koruma sistemine dayalı bir fotovoltaik enerji santrali önerilmiştir. Bir da-kıyıcı devre koruma sisteminin temel amacı, FV panelleri şebeke arızaları sırasında oluşan yüksek da-voltajın zararlı etkilerinden korumaktır. Uyarlanabilir sinir ağı kontrol sistemi, hem T tipi eviricinin denetim sistemine hem de da-kıyıcı devre koruma sistemine uygulanmıştır. Önerilen koruma sistemi, şebeke arızası sırasında benzetim sonuçlarıyla geçerliliğini doğrulamak için 250 kW'lık bir FVES ile uygulanmıştır. Bu yaklaşım potansiyel olarak FVES' in güvenilirliğini ve istikrarını artırabilir ve FVES' in şebekeye bağlantısında katkıda bulunabilir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik enerji santrali, Yapay sinir ağı, da-kıyıcı devresi

[9,10]. Therefore, the fault ride-through (FRT) mode of PVPP must be activated during grid faults to ensure continuity of power supply. The FRT mode enables the PVPP system to ride through the fault, generate power, and feed it to the grid [11].

Many successful applications in the literature have been proposed to protect PV systems from the effects of overcurrent and voltage that will occur during grid faults. These proposed protection systems are of two types, software and hardware. Software protection systems are more difficult to implement than hardware protection systems due to the fact that require special expertise. Ref [12] and [13] present a dc-chopper circuit protection scheme for the PV system during grid fault conditions. PI controller is used in the control scheme of dc-chopper circuit protection and PV system. However, The PI control system is a conventional control system. Traditional control systems have difficulty solving complex systems such as PV. Ref [14] presents a static synchronous compensator device (STATCOM) for PV and wind systems, named Wind-

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: altangencer@nevsehir.edu.tr (A. Gencer)

Geliş / Received: 17.02.2023 Kabul / Accepted: 13.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1252244

STATCOM and PV-STATCOM. However, this approach requires cost and additional equipment. STATCOM also requires the installation of a large amount of storage equipment. The hybrid system has difficulty protecting from over-currents and therefore causes mechanical stress. Ref. [15] implemented a dynamic voltage restorer (DVR) to the PV system during voltage sag. Ref. [16] Smart-Transformers (ST) are applied to improve fault ride-through strategies within a microgrid. However, the DVR and ST systems are more expensive than the dc-chopper system. Each of these methods has its own disadvantages and advantages, and selecting the best method for a specific application will depend on factors such as cost, complexity, and performance.

This article aims to suggest using Artificial Neural Networks (ANNs) to enhance Fault Ride-Through abilities in Photovoltaic systems. The specific objectives of this research include:

- 1) To review the current state-of-the-art in PV FRT, including challenges and limitations of existing approaches.
- 2) To present a case study of using ANNs to improve FRT capabilities of a PVPP, including a detailed explanation of the ANN architecture, training process, and performance results.
- 3) Overall, the main goal of this research is to demonstrate the potential of ANNs as a powerful tool for improving the stability and reliability of grid systems.

2 PVPP panel system

Solar PV cells convert sunlight into electrical energy. An equivalent electrical circuit of a PV cell depicts in Figure 1. By using this model, researchers can predict the cell's performance under different conditions and optimize the design of the cell to improve its efficiency. This could pave the way for the creation of solar cells that are both more efficient and cost-effective, and play a crucial role in fulfilling the world's growing energy requirements [17,18].

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{\frac{N_s K T}{q} a} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

If $V_t = \frac{N_s K T}{q}$ is substituted in Equation (1), Equation

(2) is obtained as follows [17,18].

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

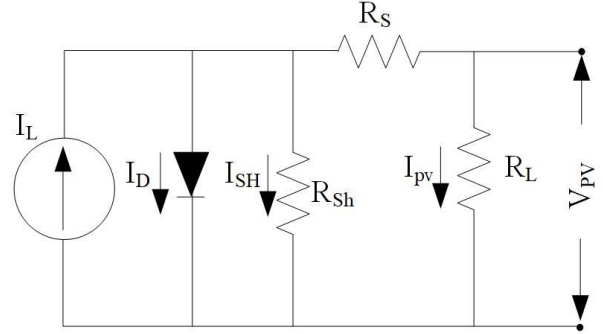


Figure 1. The equivalent electrical circuit model of a solar cell [17,18].

I_{sc} depicts a short circuit, I_0 depicts saturation current, N_s depicts a series connected cell, T depicts a temperature cell, K depicts a Boltzman constant, R_s depicts series resistance, R_{sh} depicts shunt resistance, and q depicts the charge of an electron ($q=1.6 \times 10^{-19} C$) [17, 18].

Figure 2 illustrates the T-type inverter, which utilizes fewer semiconductor switches compared to other inverter types, such as the three-level Neutral Point Clamped (NPC) inverter. This reduction in switches results in lower conduction loss and improved efficiency. A T-type inverter method also has a lower harmonic distortion compared to other inverter topologies, which leads to better power quality. The grid-connected PVPP is the most widely used PV system. A general structure of grid-connected PVPP is illustrated in Figure 2. The PV panels of the grid-connected PVPP consist of 7 series connected modules per string and 88 parallel strings. The power of the grid-connected PVPP is 250 kW.

A dc/ac inverter converts a dc voltage obtained from the PV panel output into ac voltage. This inverter generates the ac voltage required to connect the PV panel to a power grid. A T-type inverter requires fewer semiconductor switches than a three-level NPC to obtain the same voltage levels while still performing just as well. Therefore, a T-type inverter is used as dc/ac inverter in this study. Figure 2 shows the T-type inverter, and Table 1 lists its different switching states. Auxiliary switches are used in T-type inverters. The auxiliary switch is used to clamp the dc-link midpoint and a leg of each phase reduces the number of semiconductor switches. A negative level "N" employs a similar number of switches to a positive cycle. Therefore, T-type topology has higher efficiency and lower conduction loss than three-level NPC [19].

Each phase output of a 3-phase system is obtained by using semiconductor switches namely Q1, Q2, Q3 and Q4. These switches are on or off for the positive or negative periods of the sinusoidal wave. When Q1 is on, the current flows from V_{dc} (+) to the output and the output voltage is positive. When Q1 is off, current flows through Q3/D2. The simple delay time is applied during the on-off time. A short circuit in the dc-link is prevented using this delay time. This delay time is set to 1 ms. When Q2 is on, the current flows from V_{dc} (-) to the output and negative output voltage. When Q2 is off, current flows through Q3/D2 [19].

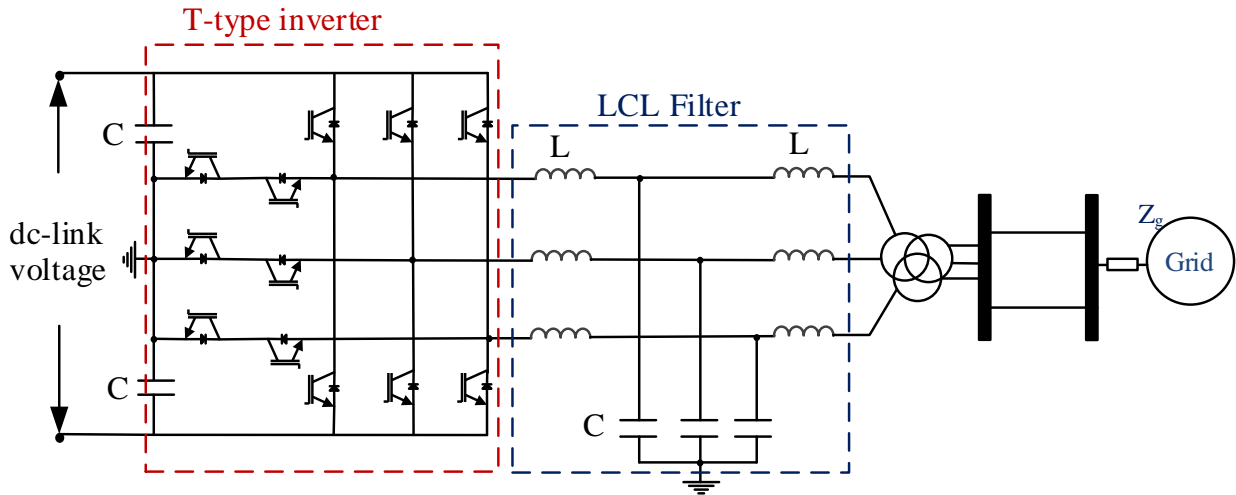


Figure 2. The T-type inverter for the grid-connected PVPP.

Table 1. Voltage Levels and Switching States in a T-type inverter [19].

Level	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Phase voltage
P	0	0	1	0	$V_{dc}/2$
0	0	1	0	1	0
N	1	0	0	0	$-V_{dc}/2$

A T-type inverter has the same switching structure as a three-level NPC. However, the three-level NPC has two extra switching devices, which complicates the control of its system.

3 Short circuit analysis of the grid-connected PVPP system

High-level currents occur in power systems during grid faults. Protection systems are designed to protect against the harmful effects of these high currents. The protection system protects the power system from the harmful effects of high-level currents during grid faults. If these protection systems are not well designed, high-level currents can cause serious damage to the power system.

A dc-chopper circuit system consisting of a self-turn-off device IGBT, and a resistor is given in Figure 3. Many protection methods are used in the literature. The dc-chopper circuit system is widely used with its lowest cost and simple structure among these methods. A dc-chopper circuit system is placed between the PV panels and the ac inverter. A switch signal of the IGBT in the protection system is off in normal operation. Therefore, a dc-chopper circuit is disabled during normal operation. A dc-chopper circuit does not affect the PV operation and supplies the grid system during normal operation. A dc-chopper circuit system works by detecting overvoltage in dc-link voltage. When value of dc-link voltage rises, a protection control system sends on-and-off signals to the IGBT. Therefore, the PV panel system will be protected from the harmful effects of over-voltages that will

occur during grid faults. When a dc-link voltage returns to a normal level, a dc-chopper circuit system will be disabled. The PV is quickly restarted and supplies the grid system. The current capacity of the IGBT in the dc-chopper circuit is chosen higher due to the fact that a high current will pass through the protection circuit [12,13,20].

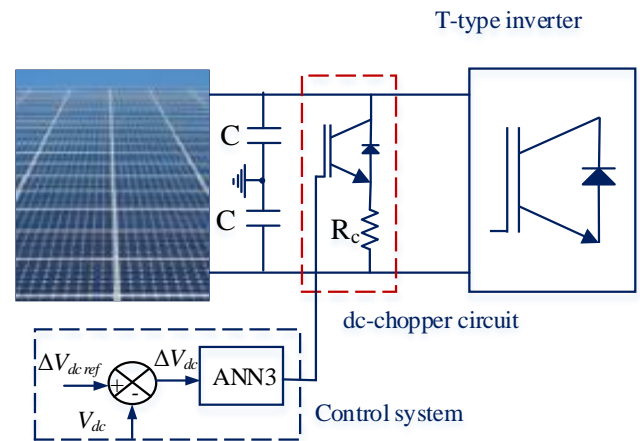


Figure 3. A dc-chopper circuit [12,13,20].

4 Proposed control system for PVPP

A proposed control system for PVPP is given in Figure 4. This study applies the grid-connected PVPP to realize the proposed T-type inverter power control optimization and conversion. The control system for the T-type inverter includes all the essential control methods necessary for the PVPP system to connect to the grid. A control system of an inverter is the most important part of a grid-connected PVPP. In Figure 4, the inverter control diagram is illustrated for normal operation. A control diagram of a grid-connected PVPP consists of two loops. The first loop is an i_d current, which controls the amplitude of the V_{dc} voltage. The T-type inverter's input dc-link voltage must have a value in the nominal operating range.

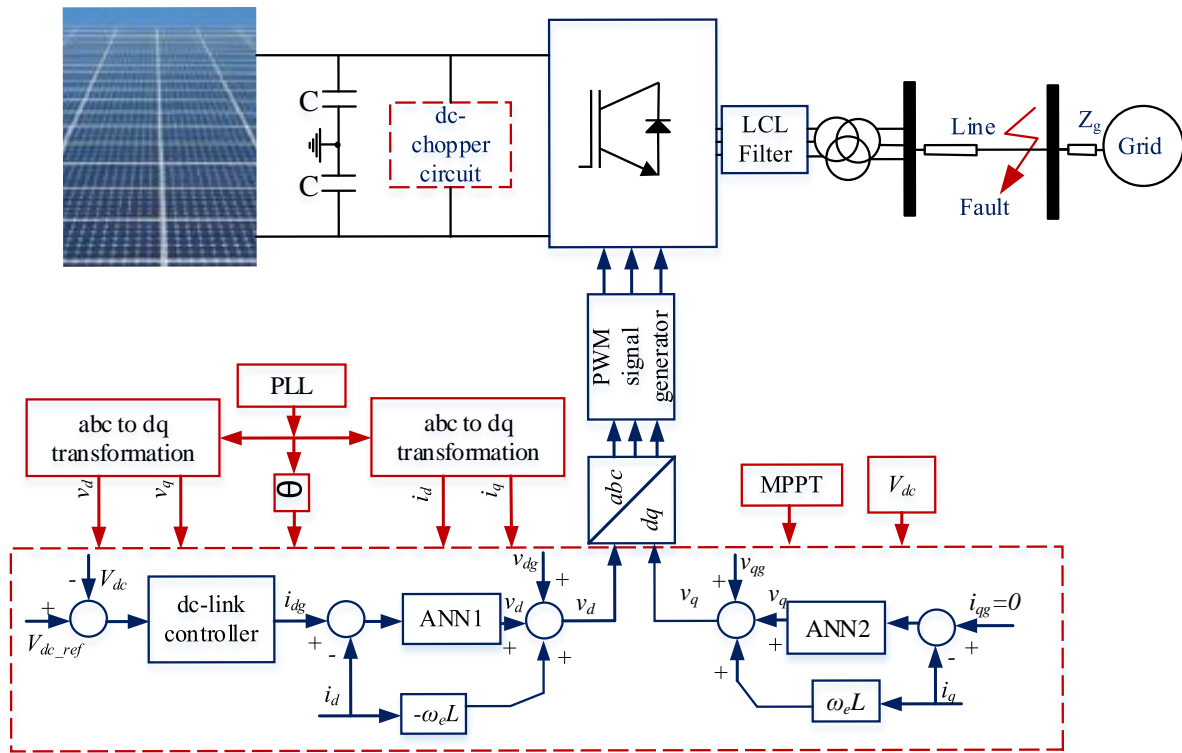


Figure 4. Proposed control system for PVPP

Therefore, a dc-link voltage is chosen as 481 V. A second cycle is the i_q current. i_q current value is selected as 0. ANN1 is designed to regulate the i_d current and ANN2 is designed to regulate the i_q current. The Levenberg Marquardt algorithm is used to train ANN1 and ANN2 datasets. In order to create the feedforward network, 10 neurons are selected for the hidden layer. ANN1 and ANN2 are generated using 2500 datasets of chosen i_d and i_q current values. The datasets are randomly divided with 15% being used for testing, another 15% for validation, and the remaining 70% for training purposes.

5 Simulation results

The block diagram of the grid-connected PVPP is designed for 250 kW. A simulation of grid-connected PVPP is realized using Matlab/Simulation. An asymmetrical fault is three phase-to-ground (3LG) fault. The 3LG fault is implemented between $t=1s$ and $t=1.1s$ on the grid system.

The dc-link voltage of a 250 kW PVPP with and without the dc-chopper circuit protection system under a 3LG symmetrical fault is illustrated in Figure 5. In order for a PVPP to maintain connected to a power grid, the PV panel's output voltage (V_{dc}) must be kept constant at 480V. The unprotected system oscillates between 500V and 600V of dc-link voltage value after a grid fault. Therefore, a PVPP system cannot be connected to a power grid. The dc-link voltage value of a PVPP system with a dc-chopper circuit reaches 480V after a grid fault. PV panel system mains continue to connect with the grid.

Active power of a 250 kW PVPP with and without the dc-chopper circuit protection system under 3LG symmetrical

fault is depicted in Figure 6. The PV panel's output active power must be kept constant at 250 kW. An active power of PVPP with unprotected method oscillates between 250kW and -500kW when a fault is implemented to the system. An active power of PVPP with a dc-chopper circuit reaches 250 kW again shortly after the fault is applied. At the same time, the PV panel system continues to inject 250 kW of active power into the grid.

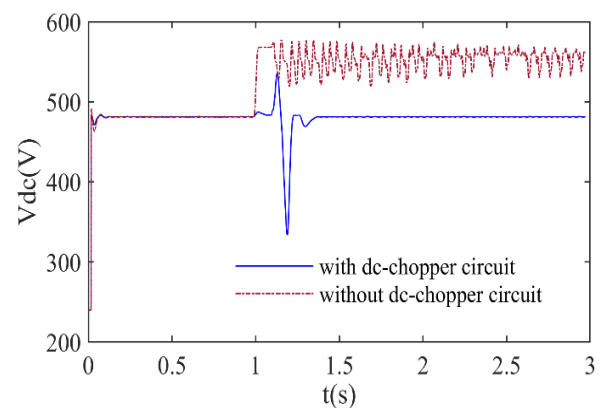


Figure 5. The dc-link voltage of a 250 kW PVPP with and without the dc-chopper circuit protection system under 3LG symmetrical fault

The phase-to-phase output of the T-type inverter without a filter is illustrated in Figure 7. The switching signals of the IGBT of an unprotected system are distorted when the fault

is applied to the system. Therefore, the shape of the sine wave obtained at the output of the inverter is also distorted.

A phase-to-phase output of the T-type inverter without a filter is illustrated in Figure 8. When the fault is applied to the system, the switching signals of the IGBT of a protected system with a dc-chopper circuit are quite smooth. Therefore, a shape of a sine wave obtained at the output of the inverter is also smooth.

The error histogram plot of the ANN1 model is given in Figure 9. The total error of the ANN1 is range from -0.00301 to 0.003655. There is an error rate of 0.000497 in the validation dataset, which consists of 2500 samples in a bin.

The regression values (R) of the test phase, validation, and training of ANN1 are 0.99954, 0.99957, and 0.99952, respectively. These figures are given in Figure 10. This value of R is nearly equal to 1. Therefore, the accuracy value of R is reliable for ANN1 training.

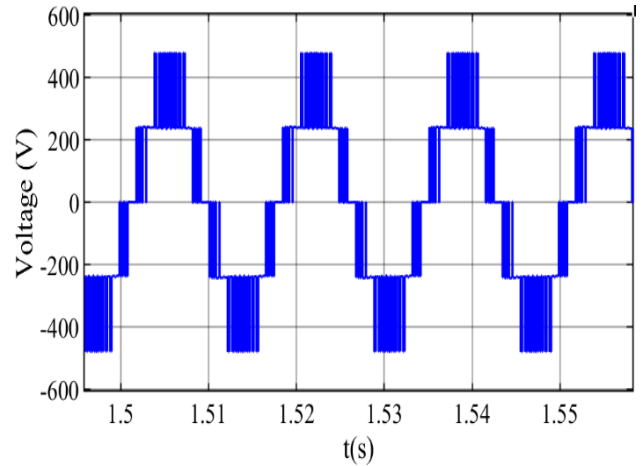


Figure 8. Non-filter of output voltages of the T-type inverter during grid fault with protection system.

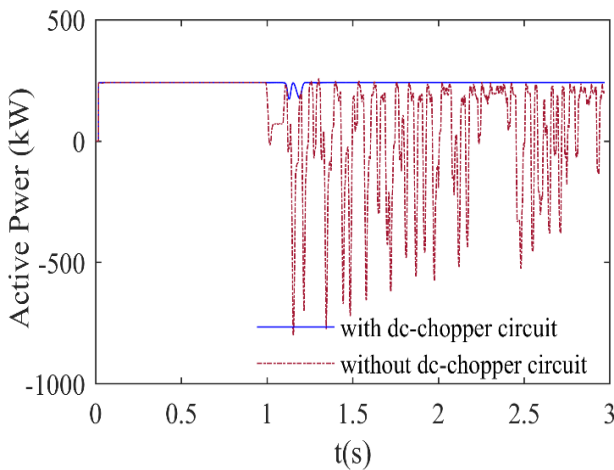


Figure 6. Active power of a 250 kW PVPP with and without the dc-chopper circuit protection system under 3LG symmetrical fault

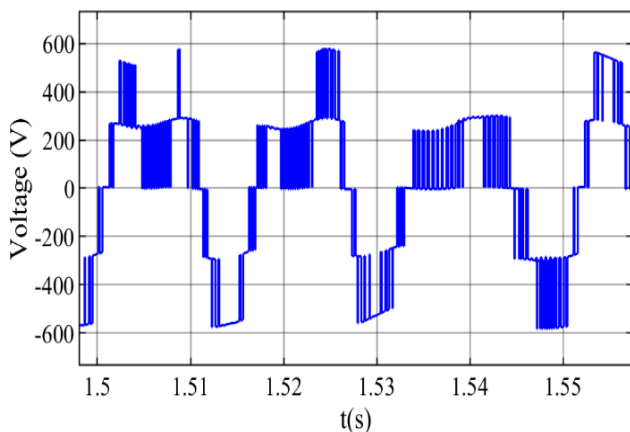


Figure 7. Non-filter of output voltages of the T-type inverter during grid fault with an unprotected system.

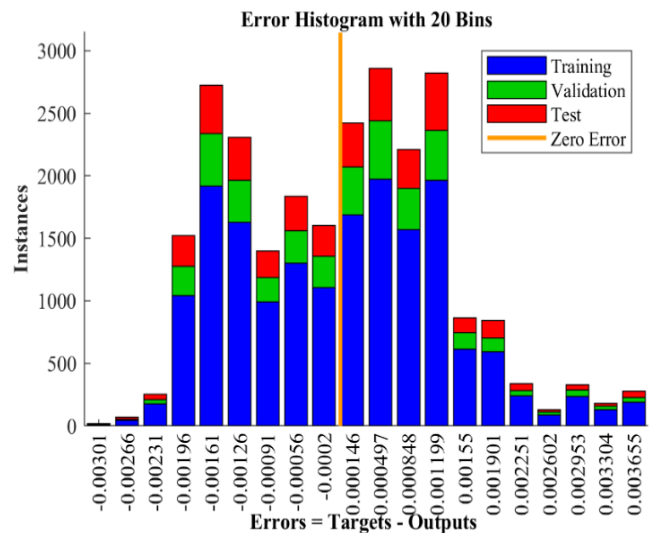


Figure 9. The error histogram plot of ANN1.

6 Conclusion

Fault ride through the improvement of PVPP based on the ANN system has the potential to greatly improve the reliability and stability of grid system. The ANN-based approach has several advantages over traditional methods, including its ability to model and predict nonlinear and dynamic systems and its robustness to system uncertainties. The switching signals of the IGBT of presented system with a dc-chopper circuit are quite smooth while the switching signals of IGBT of an unprotected system are distorted during grid fault. The active power of PVPP with a dc-chopper circuit reaches 250 kW again shortly after grid fault while an active power of PVPP with unprotected system oscillates between 250kW and -500kW even after the grid fault. This study presented also demonstrated the effectiveness of using ANN for FRT improvement in PV systems.

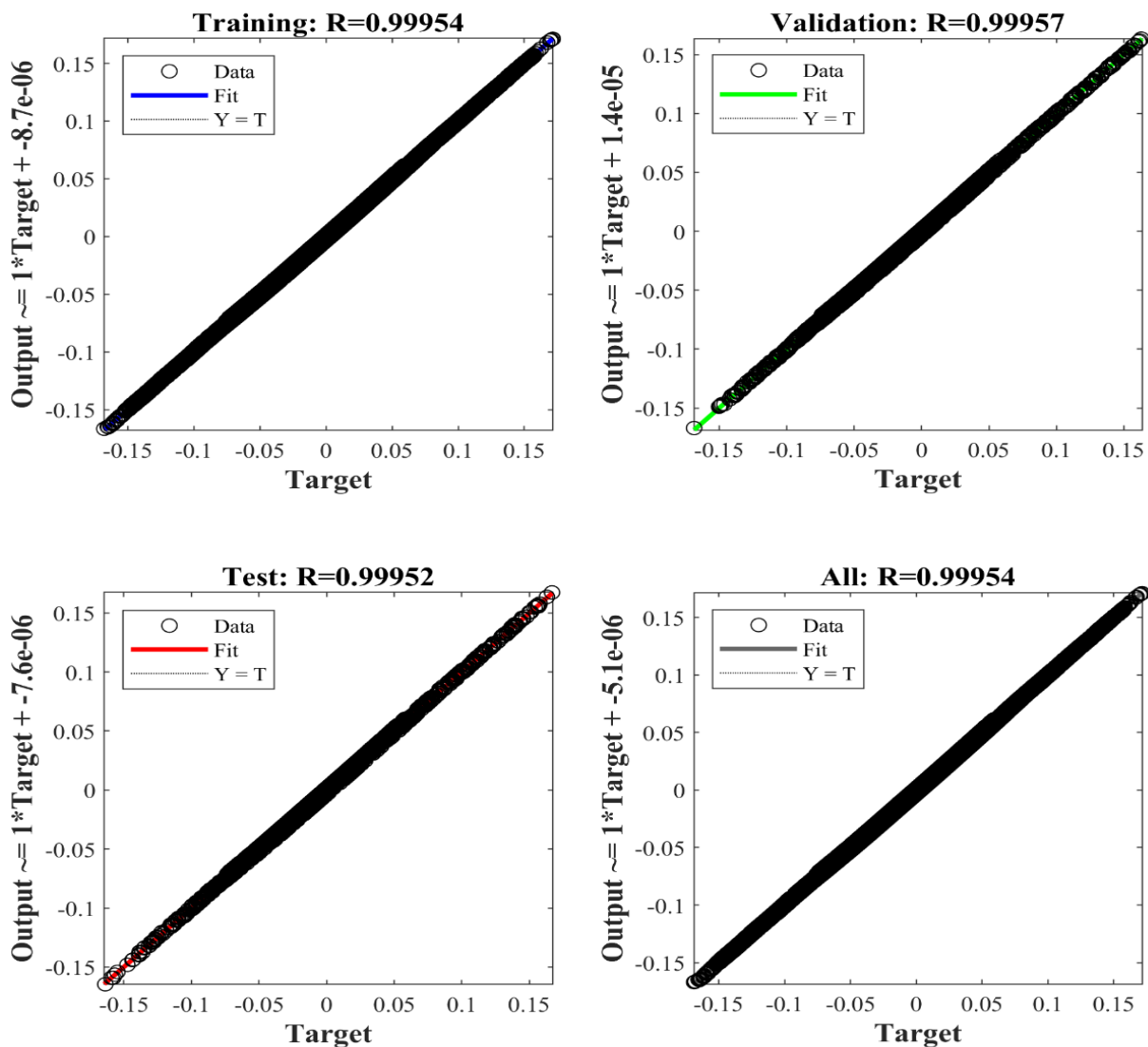


Figure 10. Regression plot of ANN1 model.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): %7

References

- [1] I. Isakov and I. Todorovic, Power production strategies for two-stage PV systems during grid faults, *Solar Energy*, 221, 30-45, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.085>.
- [2] C. Wang, C. Mishra and V. A. Centeno, A Scalable Method of Adaptive LVRT Settings Adjustment for Voltage Security Enhancement in Power Systems With High Renewable Penetration, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 13(1), 440-451, 2022, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2021.3116102>.
- [3] H. Mei, C. Jia, J. Fu and X. Luan, Low voltage ride through control strategy for MMC photovoltaic system based on model predictive control, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106530, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106530>.
- [4] M. Talha, S.R.S. Raihan and N A. Rahim, PV inverter with decoupled active and reactive power control to mitigate grid faults, *Renewable Energy*, 162, 877-892, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.067>.
- [5] I. R. S. Priyamvada and S. Das, Adaptive Tuning of PV Generator Control to Improve Stability Constrained Power Transfer Capability Limit, in *IEEE Transactions on Power Systems*, 37 (3), 1770-1781, 2022, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3114704>.
- [6] H. M. Hasanien, An Adaptive Control Strategy for Low Voltage Ride Through Capability Enhancement of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants, in *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3230-3237, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2466618>.
- [7] J. P. Roselyn, C. P. Chandran, C. Nithya, D. Devaraj, R. Venkatesan, V. Gopal and S. Madhura, Design and

- implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar PV system, *Control Engineering Practice*, 101, 104494, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104494>.
- [8] A. Mojallal and S. Lotfifard, Enhancement of Grid Connected PV Arrays Fault Ride Through and Post Fault Recovery Performance, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(1), 546-555, 2019, <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2748023>.
- [9] E. Z. Bighash, S. M. Sadeghzadeh, E. Ebrahimzadeh and F. Blaabjerg, Improving performance of LVRT capability in single-phase grid-tied PV inverters by a model-predictive controller, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 98, 176-188, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.034>.
- [10] M. J. Morshed and A. Fekih, A Novel Fault Ride Through Scheme for Hybrid Wind/PV Power Generation Systems, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(4), 2427-2436, 2020, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2958918>.
- [11] R. Aljarrah, H. Marzooghi, J. Yu and V. Terzija, Sensitivity analysis of transient short circuit current response to the penetration level of non-synchronous generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106556, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106556>.
- [12] A. Al-Shetwi, M. Z. Sujod and F. Blaabjerg, Low voltage ride-through capability control for single-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plant, *Solar Energy*, 159, 665-681, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.027>.
- [13] A. M.A. Haidar and N. Julai, An improved scheme for enhancing the ride-through capability of grid-connected photovoltaic systems towards meeting the recent grid codes requirements, *Energy for Sustainable Development*, 50, 38-49, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.007>.
- [14] R. Kumar, S. Diwania, R. Singh, H. Ashfaq, P. Khetrapal and S. Singh, An intelligent Hybrid Wind-PV farm as a static compensator for overall stability and control of multimachine power system, *ISA Transactions*, 123, 286-302, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.05.014>.
- [15] S. Kumari, M. D. Mahapatra and S. Pati, Voltage Profile Enhancement in a PV Connected Hybrid Power System using Dynamic Voltage Restorer, 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), 236-240, India, 17-19 August 2022, <https://doi.org/10.1109/ICESC54411.2022.9885632>.
- [16] J. Rodrigues, C. Moreira and J. P. Lopes, Fault-ride-through strategies for grid-tied and grid-forming smart-transformers suited for islanding and interconnected operation, *Electric Power Systems Research*, 189, 106616, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106616>.
- [17] R. B. Roy et al., A Comparative Performance Analysis of ANN Algorithms for MPPT Energy Harvesting in Solar PV System, in *IEEE Access*, 9, pp. 102137-102152, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3096864>.
- [18] M. K. Mishu, M. Rokonzaman, J. Pasupuleti, M. Shakeri, K. S. Rahman, S. Binzaid, S. K. Tiong and N. Amin, An adaptive TE-PV hybrid energy harvesting system for self-powered IoT sensor applications, *Sensors*, 21 (8), 2604, 2021, <https://doi.org/10.3390/s21082604>.
- [19] A. Gencer, Comparison of T-Type Converter and NPC for the Wind Turbine Based on Doubly-Fed Induction Generator. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9 (2), 123-128, 2021. <https://doi.org/10.17694/bajece.826624>
- [20] A. Gencer, Analysis and Control of Fault Ride Through Capability Improvement PMSG Based on WECS Using Active Crowbar System During Different Fault Conditions. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 24 (2), 63-69, 2018. <https://doi.org/10.5755/j01.eie.24.2.20637>





Particle swarm optimization based design of a terahertz antenna with a modified photonic band gap substrate for 6G future wireless communications

6G geleceğin kablosuz iletişimi için modifiye fotonik bant boşluğu substratına sahip bir terahertz antenin parçacık sürü optimizasyonu temelli tasarımı

Tayfun Okan¹ , Seda Habergötüren Ateş^{2*} , Nursel Akçam³ 

^{1,2,3} Gazi University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department, 06570, Maltepe/Ankara/Turkey

¹ Turkish Aerospace, 06980, Ankara/Turkey

Abstract

In this study, an antenna is proposed that operates at THz spectrum for sixth generation (6G) short-range future wireless communications. A modified photonic band gap (MPBG) substrate is employed to design an octagonal ring shaped microstrip patch antenna with wideband and high gain properties. Unlike the conventional photonic band gap (PBG) form, the proposed MPBG substrate structure is created by variable sized cylindrical air holes. The radii of each air cylinder in the row is determined with the help of particle swarm optimization (PSO) algorithm, where the goal is set to achieve the highest gain and impedance bandwidth ($S_{11} \leq -10$ dB) possible. The simulation results of the antennas that are built on 1) non-PBG, 2) conventional PBG and 3) the proposed MPBG substrate structures are compared. It is observed that the radiation performance is most enhanced by implementing MPBG structure. In comparison to the antenna without PBG, the reported MPBG structure offers almost 300% gain and 11% bandwidth improvement. To summarize, the designed antenna with its proposed MPBG substrate structure achieves an excellent radiation performance within a wide operating bandwidth.

Keywords: Terahertz antenna, Sixth generation (6G), Photonic band gap, Defective photonic crystal substrate, Particle swarm optimization

1 Introduction

Terahertz (THz) frequency band (0.1-10 THz) is taken into consideration by researchers; since there is an increasing demand to high data rate and wideband properties [1, 2]. As a result, THz antenna designs have been used in many various fields including imaging [3,4], biomedical applications [5-7], near field communications [8-11], wireless body area networks [12], vehicular communications [13] and future wireless communication [14-18]. Besides all advantages, the major drawback of these antennas is that they commonly exhibit short range wireless communications due to their high attenuated signal characteristic. Although, the THz spectrum has not yet been officially allocated by the competent authorities; in 2019, the Federal Communications Commission (FCC) has opened up 4 different unlicensed

Öz

Bu çalışmada, altıncı nesil (6G) kısa menzilli geleceğin kablosuz iletişimi için THz spektrumunda çalışan bir anten önerilmiştir. Geniş bant ve yüksek kazanç özelliklerine sahip sekizgen halka şeklinde bir mikroşerit yama anteni tasarlamak için değiştirilmiş bir fotonik bant aralığı (MPBG) kullanılır. Geleneksel fotonik bant aralığı (PBG) formunun aksine, önerilen MPBG substrat yapısı, değişken boyutlu silindirik hava delikleri tarafından oluşturulur. Sıradaki her hava silindirinin yarıçapı, hedefin mümkün olan en yüksek kazanç ve empedans bant genişliğini ($S_{11} \leq -10$ dB) elde etmek olan parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması yardımıyla belirlenir. 1) PBG olmayan, 2) geleneksel PBG ve 3) önerilen MPBG substrat yapıları üzerine kurulan antenlerin simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Radyasyon performansının en çok MPBG yapısının uygulanmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. PBG'siz antenle karşılaştırıldığında, bildirilen MPBG yapısı neredeyse %300 kazanç ve %11 bant genişliği iyileştirmesi sunuyor. Özetlemek gerekirse, önerilen MPBG substrat yapısı ile tasarlanan anten, geniş bir çalışma bant genişliği içinde mükemmel bir radyasyon performansı elde etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Terahertz anten, Altıncı nesil (6G), Fotonik bant aralığı, Kusurlu fotonik kristal substrat, Parçacık sürüsü optimizasyonu

bands, between 95 GHz to 3 THz, to be used for experimental 6G communication studies [19].

Microstrip antennas are frequently preferred in all frequency bands thanks to their low cost, low profile, easy to manufacture form [13]. In [14], four arm windmills shaped fractal microstrip antenna is designed. The presented antenna has a very compact size and wide operating frequency band. On the other hand, it does not include the sub-THz band. A high efficiency wideband microstrip patch antenna is reported in [15]. This antenna is printed on FR-4 substrate material, which is not a highly preferred material due to its performance at high frequencies. Another microstrip THz antenna is studied in [16] where radiation properties are improved with the help of a shorting pin. To overcome low gain, 12 element microstrip array antenna is designed in [17]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sedahabergoturen@gazi.edu.tr (S. H. Ates)
Geliş / Recieved: 10.12.2022 Kabul / Accepted: 20.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1217148

and particle swarm optimization method is utilized for microstrip patch antenna that has a partial ground plane in [18].

All the above mentioned microstrip THz antenna studies put forth a different design and dielectric material that the antenna is printed on. However, overall antenna performance improvements are not satisfactory. For example, if the bandwidth increases, the gain or efficiency value decreases. In summary, a trade-off situation exists. Therefore, different methods and structures are employed to enhance the bandwidth, gain and efficiency of antennas all at the same time. Defective photonic crystal substrate is one of the most efficient techniques used for this purpose. Even though, this structure is named differently within the studies as photonic band gap (PBG), modified photonic crystal or defective photonic crystal substrate; they all express the same substrate structure. A trapezoidal shaped microstrip THz antenna is designed in [20] and a surrounding PBG substrate framework is developed instead of periodic PBG for better performance outputs. In [21], bandwidth and gain properties of the reported antenna is enhanced by introducing a defected ground structure beside PBG. Particle swarm optimization algorithm is used in [22] to determine the optimum structure of PBG substrate. A PBG antenna with quadratic holes is investigated in [23] and the effect of the distance between air gaps is analyzed in [24]. Many of the THz antenna studies [25, 26] are analyzed at frequencies lower than 1 THz due to their high computational complexity. THz antennas that have periodic air cylinders embedded substrates are reported in many other studies [27-29] as well. To the best of authors' knowledge, only in [30] and [31], PBG substrates are realized with different sized aperiodic air cylinders. Radiation performances are further improved in these studies in comparison to conventional PBG THz antennas. However, the simulated results are performed only for a small frequency interval below 1 THz, and no algorithm or optimization is included to obtain the optimum size of air cylinders.

It is seen from the early studies that PBG substrates limit the effect of surface leaky waves beneath the patch. This helps to achieve noticeable improvement in radiation characteristics. Different from conventional photonic crystal substrates, a modified defective photonic crystal substrate is developed and employed in this study to reach the most successful simulation results possible. The proposed octagonal ring shaped microstrip patch antenna, with its aforementioned substrate structure, exhibits high impedance bandwidth, gain and efficiency results within the 0-2 THz frequency interval.

2 Antenna configuration

The main focus of this study is to present a THz antenna with a wideband and high gain property that can be used for 6G wireless communication systems. At first, a simple planar microstrip antenna is designed and it is evolved by modifying its conducting parts with time. PBG substrate is implemented afterwards and it is modified to further improve the radiation characteristics. Design process is started by determining the dielectric material that the antenna is printed

on. Rogers RO4350B is used as substrate material with a thickness of 64 μm . It has a permittivity of 3.66 and a loss tangent of 0.0037.

Copper is preferred as a conductor in this THz study. The reason it is used instead of any other material is that copper is suitable to be used for every low, medium and high voltage power network [32]. It is also very efficient thanks to its high conductivity value and it can be soldered with ease for durable connections. Graphene is employed as a conductor in some of the recent THz antenna studies [33-37]. Conductivity value of this material can be varied by changing its chemical potential. However, it is analyzed that antennas using copper as their conducting parts have higher gain values in comparison to antennas that use graphene as a conductor [32]. Hence the reason why graphene is not used in this study.

The proposed antenna design is depicted in Fig. 1. Grey parts represent copper that has a thickness of 18 μm and white sections represent the dielectric substrate material. An octagonal ring shaped radiator is excited by a trapezoidal microstrip feeding line. The antenna element is shifted by 100 μm (O) and the length of partial ground plane is 320 μm (L_g). A modified photonic band gap (MPBG) substrate structure is developed and implemented in this study, where defective photonic crystal substrate is created by drilling 6×6 holes. The diameters of the air cylinders in the first row of the substrate are determined as D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 and D_6 , respectively. As seen in Fig. 1, these drilled holes are shifted to right one at a time in each row. The last hole in the row is shifted to the beginning in the next row. It is observed that using such a dynamic MPBG structure improves the performance of the antenna in comparison to conventional periodic PBG. Optimum diameter values of the air cylinders are specifically determined with the help of PSO algorithm [38]. PSO algorithm is an optimization technique available in CST Microwave Studio software program. The goal is set to have the highest gain and operating bandwidth possible. Only the diameter values are set to switchable and optimum values are determined as a result of this optimization process. The details of optimum antenna dimensions are shared in Table 1. As seen from the table, proposed antenna has an overall dimension of $1000 \times 1000 \times 100 \mu\text{m}^3$. It is also possible to define it in wavelength form for better comparison with other antenna studies as $0.33\lambda \times 0.33\lambda \times 0.03\lambda$ (where λ is the wavelength at the lowest operating frequency). The equations that the values in Table 1 derived from are given below, where W_p, L_p and f_r states patch width, patch length and desired resonant frequency, respectively [39]. Moreover, ϵ_{reff} and T_{sub} represents effective dielectric constant and substrate thickness. The antenna design is started once the initial width (W_p) and length (L_p) parameters are determined from the given equations. Afterwards, an octagonal structure is created, the patch and radiator element are shifted to the left by O and finally a trapezoidal transmission line is introduced to enhance antenna performances. The values in Table 1 are determined to reach the optimum gain and bandwidth performance at the desired frequency. The details of basic antenna design are not provided, since the focus of this study

is the implementation of PSO algorithm to determine the diameters of air cylinders. During the optimization process, lower and upper bounds of air cylinders are set as 60 and 120 mm, respectively. The goal is set to have a gain value above 10 dBi and fractional bandwidth of minimum 100%. Swarm size, maximum number of iterations and maximum number of solver equations are selected as 30, 15 and 451, respectively. Moreover, Latin Hypercube distribution is selected as the choice of initial point set.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{T_{sub}}{W_p} \right)^{-0.5} \quad (1)$$

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2)$$

$$L_p = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 0.824 T_{sub} \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{T_{sub}} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W_p}{T_{sub}} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$T_{sub} = 0.0606 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

The evolution stages of the proposed antenna design are depicted in Fig. 2. As seen in Fig. 2, a planar octagonal shaped microstrip patch antenna is designed initially with the help of the above given classical equations of antenna theory. It is observed from the simulations that having a partial ground plane that has a length equal to the length of the feeding line (L2) provides an enhancement in the performance. Therefore, including Ant.-1 all the antennas in the evolution stages have the same partial ground plane. The impedance bandwidth ($S_{11} \leq -10$ dB) of the two main bands of Ant.-1 are 0.118 THz and 0.49 THz. This corresponds to a fractional bandwidth percentage of 45.9% and 34.3%, respectively. The resonant frequencies of these bands are at 0.232 THz and 1.214 THz. Trapezoidal feeding line is implemented afterwards to widen the bandwidth. As seen in Fig. 3, this not only has an effect on the first main band, but also reduces the initial frequency value of the second band, where $S_{11} \leq -10$ dB, to 0.792 THz. In the next evolution stages, Ant.-3 is formed by shifting the antenna element to left by 100 μ m (O) and Ant.-4 is designed by etching a longitudinal elliptical slot to the radiating patch. This longitudinal slot provides a better impedance matching (50 Ω). It results an increase in resonant frequency and an improvement in the θ -polarized radiation. The optimum dimensions of this slot (R_x and R_y) are determined in such a way that it fulfills the aforementioned features. Once the bandwidth and radiation performance of Ant.-4 is analyzed and compared with similar THz antenna studies, it can be said that even Ant.-4 itself can be presented as a study that contributes to the literature. Nevertheless, a MPBG substrate

structure, which is the main focus of this study, is employed in the last design stage and further enhancements are achieved. The two main band intervals, resonant frequencies and reflection coefficient (S_{11}) values at that frequencies are provided in Table 2. As seen from the table and Fig. 3, each evolution stage enhances the bandwidth performance of antenna. Moreover, proposed antenna with its MPBG substrate has the highest bandwidth in 0-2 THz interval which is more than 1.522 THz.

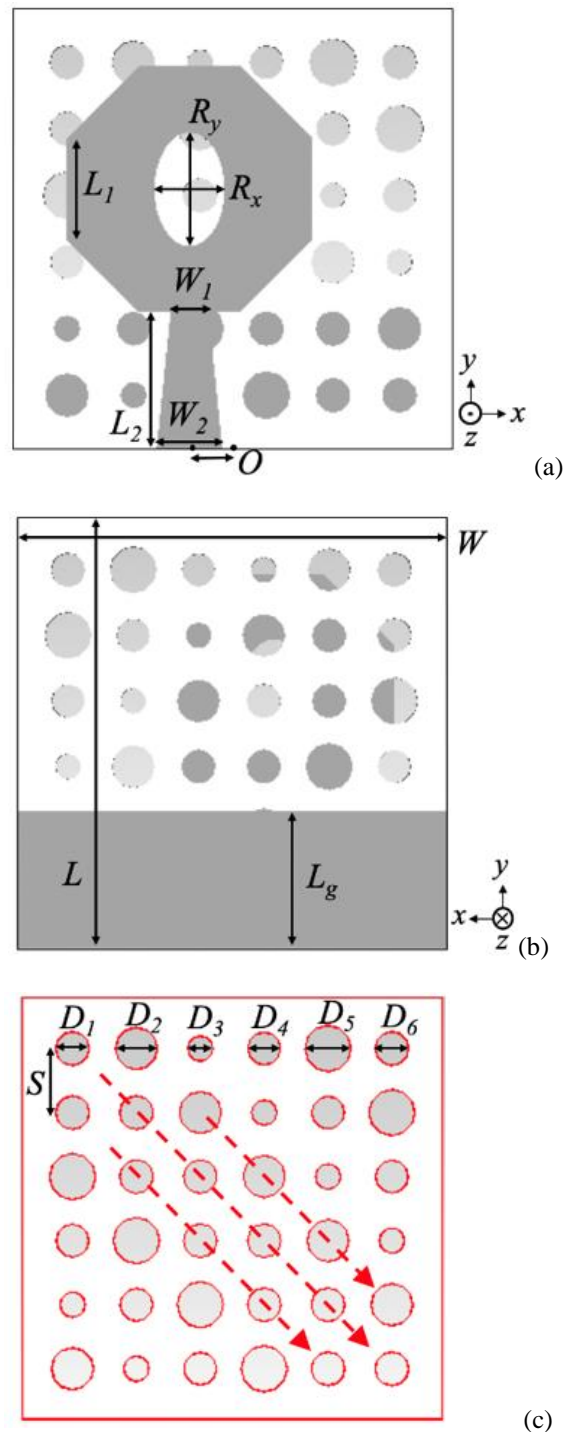


Figure 1. Antenna configuration (a) top view, (b) bottom view, (c) PBG substrate structure

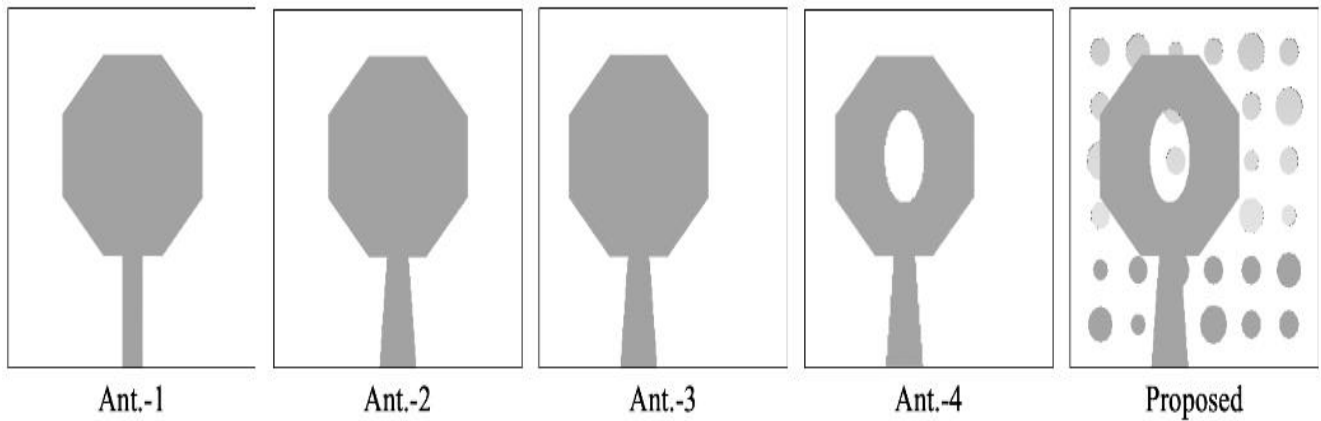


Figure 2. Evolution stages of the proposed antenna design

Table 1. Antenna layout dimensions

Parameter	W	L	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	S
Value (μm)	1000	1000	80	100	60	78	110	80	152
Parameter	L_1	L_2	W_1	W_2	R_x	R_y	L_g	O	
Value (μm)	230	320	86	150	80	130	320	100	

Table 2. The two main bands in 0-2 THz interval

Design	2 main bands (THz)	Bandwidth		Res. freq. (THz)	S_{11} (dB)
		(THz)	(%)		
Ant.-1	0.198-0.316	0.118	45.9	0.232	-14.53
	1.184-1.674	0.49	34.3	1.214	-43.53
Ant.-2	0.104-0.298	0.194	96.5	0.236	-20.36
	0.792-2	1.208	86.5	1.324	-33.39
Ant.-3	0.1-0.358	0.258	112.6	0.252	-22.98
	0.886-2	1.114	77.2	1.324	-31.79
Ant.-4	0.1-0.358	0.258	112.6	0.25	-23.18
	0.8-2	1.2	85.7	1.99	-42.11
Proposed	0.1-0.4	0.3	120	0.274	-19.41
	0.778-2	1.222	88	1.93	-38.82

3 Simulation results

Up until this section, the proposed antenna structure is discussed. The simulation results performed by using CST Microwave Studio [40] are analyzed in detail under this title by comparing the performance of the proposed design with different PBG structures. It is also important to emphasize that the antenna is electrically large in THz spectrum. This substantially increases the number of mesh cells and results in as computational complexity, which is one of the major difficulties faced throughout the simulation process.

Microstrip patch antennas are preferred frequently regardless of their operating frequency. These antennas have simple radiation characteristics that are common knowledge. Fringing fields constitute the primary source for the radiation of microstrip patch antennas. The amount of these fields is mainly dependent on the thickness and dielectric constant of the substrate material. Low dielectric constant results an enhancement in the fringing fields and radiation performance [29]. This enables the antenna to have high bandwidth, gain and directivity features.

THz antennas generally have thin substrates due to their minimized forms. However, thick substrate with a low dielectric constant is necessary for a desired radiation performance. Hence the reason why metamaterials have been used in some of the previous antenna studies to reduce the refractive index of the substrate material and to decrease the permittivity and permeability values. But unfortunately, metamaterials might not be very functional for THz antennas as these antennas have nanoscale structures [34]. Periodic air cavity substrate structures are developed as a solution, which results the formation of PBG in the dielectric substrate. Photonic crystals help to lower the dielectric constant of the antenna. They reduce the amount of accumulation of fields within the substrate and improve the radiation performance.

Another parameter that has an effect on the dielectric constant value of PBG structures is the lattice factor, which is defined as the ratio of air cylinder radius (R) to the distance between cylinders (S) [29]. Lattice factor value is optimized in this study to achieve the maximum gain value for the conventional PBG antenna structure. As seen in Fig. 4, an increase in lattice factor does not always result in an increase in realized gain. 8.03 is the highest gain value for conventional PBG antenna and this value is obtained when lattice value is 0.25. Therefore; R and S values are taken as 28 μm and 104 μm , respectively to meet the 0.25 lattice factor value.

The proposed antenna with MPBG substrate uses variable radii of air cylinders. The minimum and maximum values of these radii are 30 μm and 55 μm , respectively. The distance between air cylinders is 152 μm , so the lattice factor for MPBG structure varies from 0.197 to 0.362. The details of the proposed MPBG structure were given in the previous section.

Fig. 5 (a) depicts the frequency versus reflection coefficient (S11) graph of four different antenna structures that are: 1) an antenna without a PBG structure (Ant.-4), 2) an antenna with a conventional PBG substrate (R=28 μm ,

S=104 μm), 3) the proposed antenna with MPBG substrate and 4) an antenna with a surrounding MPBG structure. In the former antenna type, only the surrounding photonic air cylinders are utilized. Table 3 is created to summarize the bandwidth, gain and efficiency simulation results. As seen in Table 3, all the simulated antenna structures have two bands throughout the 0-2 THz interval, except conventional PBG antenna. Conventional PBG antenna has three bands and it offers one of the highest bandwidths in the first band with the proposed MPBG antenna. On the other hand, the conventional PBG structure has relatively narrow bandwidths in the rest of the two bands. The proposed antenna has the highest bandwidth within the 0-2 THz interval, which is 1.522 THz. Its bandwidth in the first and second bands are 0.3 THz and 1.222 THz, respectively. This correspond to the fractional bandwidth percentage of 120% and 88%, respectively. In comparison to the antenna without PBG, the reported design provides 8% and 11% improvement in the fractional bandwidth percentage for first and second bands, respectively.

Fig. 5(b) represents gain and efficiency results of all four antennas. The antenna without a PBG substrate has the lowest gain and efficiency values; whereas, the proposed MPBG antenna structure has the highest gain and efficiency values within the operating frequency range. The proposed design provides almost 300% gain improvement in comparison to the antenna without PBG. To the best of authors' knowledge, one of the highest gain enhancements is achieved with this study when the proposed technique is applied to the base antenna structure without PBG. Furthermore, both conventional PBG and surrounding MPBG substrate structures provide nearly the same values that are higher than the antenna without PBG, but lower than the proposed MPBG antenna structure. To summarize, although conventional PBG structure improves the radiation performance, it can further be improved by applying the proposed MPBG substrate structure.

The presented MPBG substrate structure is implemented to different substrate materials in Fig. 6. RT5880 has a lower dielectric constant ($\epsilon_r=2.2$), whereas glass ($\epsilon_r=6$) and RO3010 ($\epsilon_r=11.2$) have higher values in comparison to the RO4350B ($\epsilon_r=3.66$) substrate material that the proposed design is printed on. As discussed in the previous section, high permittivity dielectric substrate is not a desired feature for THz antennas. Hence, the result with RO3010 exhibits very narrow bands. Another important observation is that, although RT5880 has a lower dielectric constant, it does not offer a higher bandwidth. S11 value rises above -10 dB at 0.223 THz due to the design of the radiating patch. Moreover, the second band of the proposed antenna starts at 0.778 THz; whereas it starts at 1 THz for RT5880. As a result, the best performance is obtained with the proposed RO4350B material.

Radiation pattern of the antenna should also be analyzed to fully examine its radiation characteristic. 0.272 THz, 1.35 THz and 1.93 THz are the three resonant frequencies of the antenna; and Fig. 7 depicts the simulated far field radiation pattern of the proposed antenna at these resonant frequencies

in polar form. As seen from the figure, the E-plane (xz-plane) and H-plane (yz-plane) fields of the antenna has omnidirectional radiation properties at 0.272 and 1.93 THz. Besides that, the number of sidelobes increase considerably at higher frequencies. The co-polarized field in H-plane has a very directional pattern at 1.35 THz with low sidelobes and a directivity value of 10.8 dBi. It also has a wide half power beam width (HPBW) of 58°. This directional radiation feature has enabled the antenna to have a very high gain at 1.35 GHz frequency.

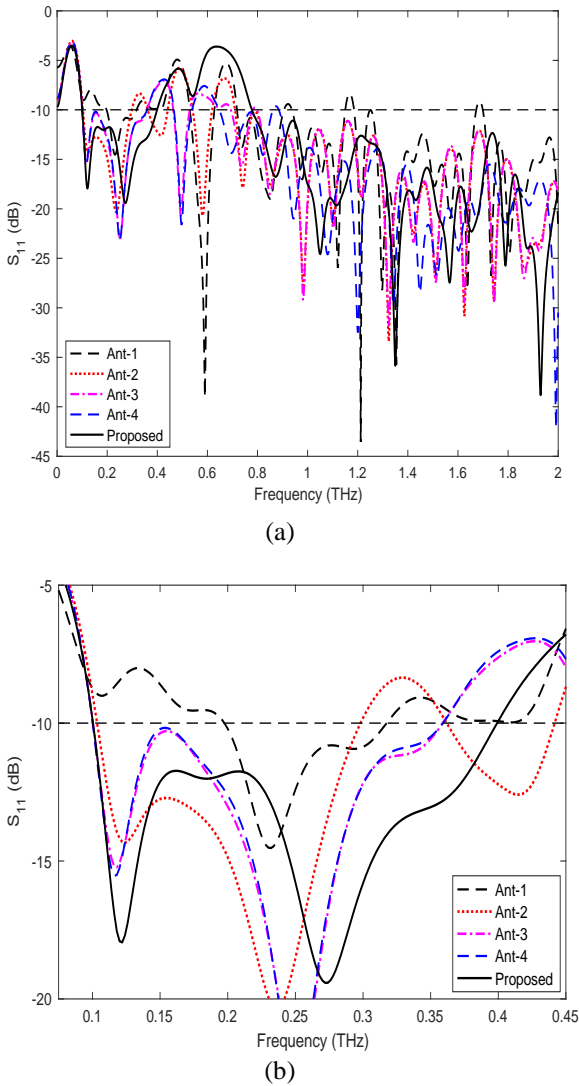


Figure 3. Effect of antenna evolution on reflection coefficient (a) for 0-2 THz interval and (b) in the first main band.

The proposed MPBG antenna structure is compared in Table 4 with some other state-of-art PBG THz antennas to verify the success of its radiation performance. All the studies presented in the comparison table have PBG substrates, but some are implemented in different form. It is easy to say that the proposed antenna with its MPBG substrate structure exhibits the highest gain value by far. Except from the study in [22], it also has the best radiation efficiency performance. Bandwidth is another important

parameter for most of the antenna designs, and it needs to be compared independent on frequency for a fair comparison. Therefore, fractional bandwidth values are calculated for each study. The reported design has the highest fractional bandwidth percentage values for both bands.

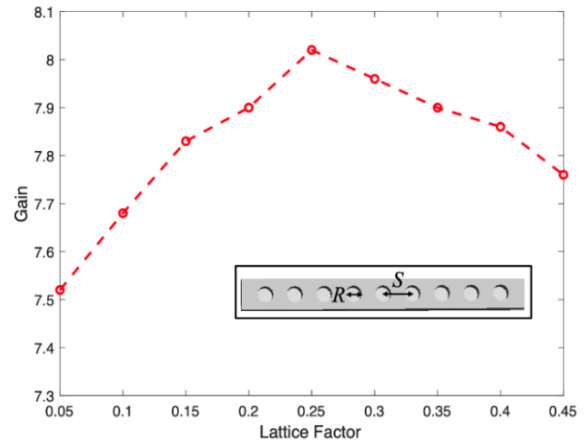


Figure 4. The effect of lattice factor on realized gain value of conventional PBG antenna at 1.3 THz.

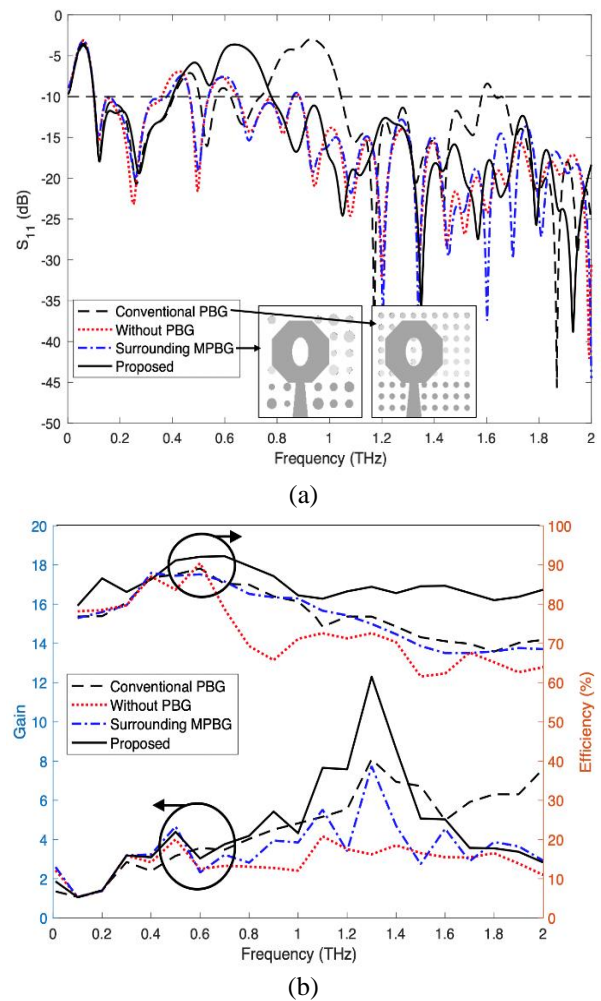


Figure 5. The effect of different substrate structure on antenna (a) bandwidth, (b) gain and efficiency

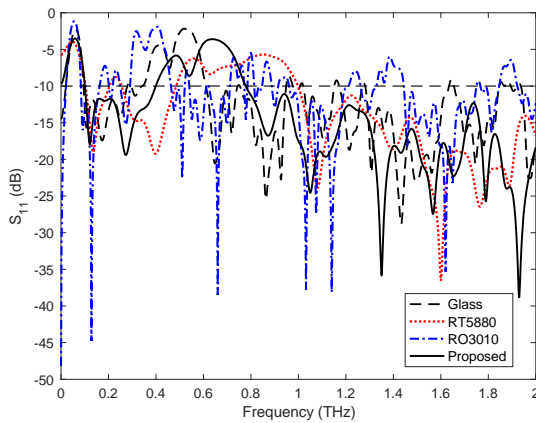


Figure 6. The effect of different substrate material on S_{11}

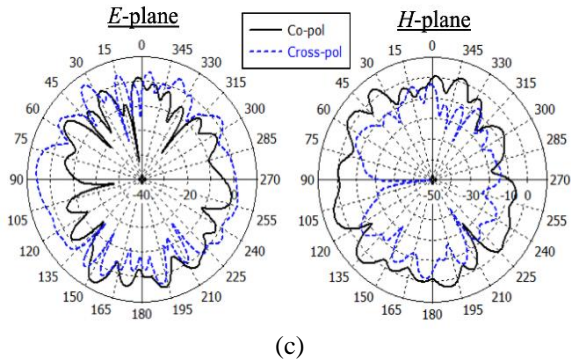
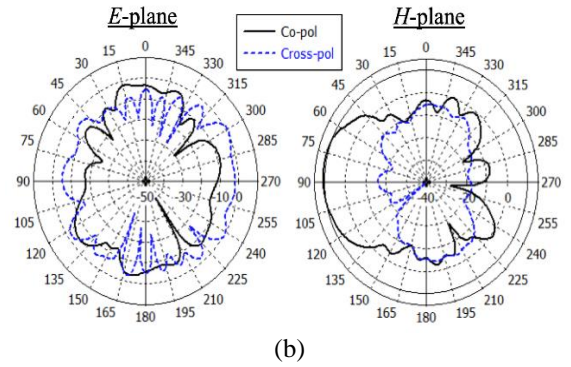
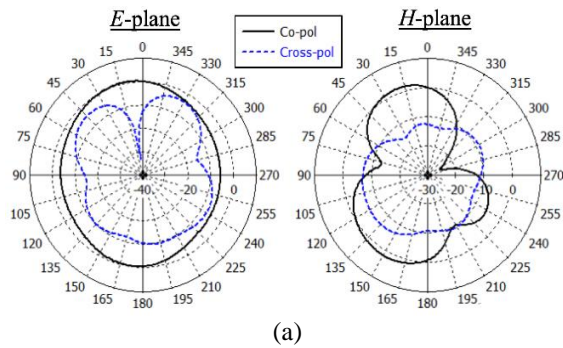


Figure 7. Far field radiation pattern of the proposed antenna structure for E-plane and H-plane at (a) 0.272 THz, (b) 1.35 THz and (c) 1.93 THz

Table 3. Bandwidth, gain and efficiency simulation results

Design	Main Bands (THz)	Bandwidth		Max. Realized Gain	Max. Efficiency (%)
		(THz)	(%)		
Without PBG (Ant.-4)	0.1-0.358	0.258	112	4.17 (@1.1 THz)	83.33 (@0.358 THz)
	0.888-2	1.112	77		
Conventional PBG	0.1-0.404	0.304	120.6	8.03 (@1.3 THz)	87.02 (@0.404 THz)
	1.044-1.58	0.536	40.9		
Surrounding MPBG	0.1-0.378	0.278	16.3	7.74 (@1.3 GHz)	86.21 (@0.378 THz)
	0.886-2	1.114	77.2		
Proposed	0.1-0.4	0.3	120	12.3 (@1.3 THz)	90.33 (@0.778 THz)
	0.778-2	1.222	88		

Table 4. Comparison with other THz studies available in literature

Study	Bandwidth (THz)	Bandwidth (%)	Max. Gain	Max. Efficiency (%)	Substrate Form
[20]	0.742	59.3	11	N.A.	Surrounding PBG
[21]	≈ 0.03	≈ 4.35	6.79	N.A.	Aperiodic PBG
[22]	0.128	21.2	9.17	91.08	Modified PBG
[23]	≈ 0.09	≈ 3.34	5	62	Quadratic hole PBG
[25]	≈ 0.265	34.3	8.45	88.3	Conventional PBG
[27]	0.3	14	4.97	79.62	Conventional PBG
[31]	≈ 0.35	≈ 66.66	9	88.72	Variable sized PBG
Proposed	0.3	120	12.3	90.33	Variable sized PBG (MPBG)
	1.222	88			

4 Conclusions

In this study, variable sized air cylinder cavities are implemented to the dielectric substrate to form a modified PBG substrate structure. Unlike conventional PBG structure, the diameter values of these cylinders are not the same throughout the substrate and they are determined to provide the highest gain and bandwidth values possible. PSO algorithm is used to assign the optimum values. The evolution stages and their positive effects on antenna bandwidth, gain and efficiency are analyzed. Moreover, the presented MPBG structure brings the antenna an almost 300% enhancement in gain and 8 to 11% improvement in fractional bandwidth percentage in comparison to the antenna without PBG. It is observed that the proposed MPBG THz antenna achieves an excellent radiation performance within a wide operating bandwidth.

Similarity rate (iThenticate): %5

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- [1] I. Malhotra, KR. Jha and G. Singh, Analysis of highly directive photoconductive dipole antenna at terahertz frequency for sensing and imaging applications. *Optics Communications*,397, 129-139, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.04.008>
- [2] A. El-Fatimy, JC. Delagnes, A. Younus, E. Nguema, F. Teppe, W. Knap, E. Abraham and P. Mounaix, Plasma wave field effect transistor as a resonant detector for 1 terahertz imaging applications. *Optics Communications*, 282(15), 3055-3058, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.04.054>
- [3] G. Geetharamani and T. Aathmanesan, Split ring resonator inspired THz antenna for breast cancer detection. *Optics & Laser Technology*,126, 106111, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106111>
- [4] S. Asgari, N. Granpayeh and T. Fabritius, Controllable terahertz cross-shaped three-dimensional graphene intrinsically chiral metastructure and its biosensing application. *Optics Communications*,474, 126080, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126080>
- [5] R. Zhang, K. Yang, QH. Abbasi, KA. Qaraqe and A. Alomainy, Analytical modelling of the effect of noise on the terahertz in-vivo communication channel for body-centric nano-networks. *Nano Communication Networks*, 15, 59-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2017.04.001>
- [6] T. Okan, High efficiency unslotted ultra-wideband microstrip antenna for sub-terahertz short range wireless communication systems. *Optik*, 242, 166859, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166859>
- [7] KR. Jha and G. Singh, Design of highly directive cavity type terahertz antenna for wireless communication. *Optics Communications*,284 (20), 4996-5002, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.06.052>
- [8] X. Ma, Z. Chen, W. Chen, Y. Chi, Z. Li, C. Han and Q. Wen, Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems. *Nano Communication Networks*, 24, 100284, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2020.100284>
- [9] T. Nagatsuma, K. Oogimoto, Y. Inubushi and J. Hirokawa, Practical considerations of terahertz communications for short distance applications. *Nano Communication Networks*, 10,1-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nancom.2016.07.005>
- [10] Q. Rubani, SH. Gupta, S. Pani and A. Kumar, Design and Analysis of a Terahertz Antenna for Wireless Body Area Networks. *Optik*, 179, 684-690, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.202>
- [11] IF. Akyildiz, JM. Jornet and C. Han, Terahertz band: next frontier for wireless communications. *Physical Communication*, 12, 16-32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2014.01.006>
- [12] FR. Yang, Y. Qian, R. Coccioli and T. Itoh, Analysis and Application of Photonic Band-Gap (PBG) Structures for Microwave Circuits. *Electromagnetics*, 19 (3), 241-254, 1999. [10.1080/02726349908908642](https://doi.org/10.1080/02726349908908642)
- [13] B. Dokmetas, GO. Arican, N. Akcam and E. Yazgan E, A novel millimeter-wave U-shaped radiating slot antenna with DGS structures for 5G cellular application. In: *IEEE, 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, pp: 669-672 28-30 November 2019. <https://doi.org/10.23919/ELECO47770.2019.8990502>
- [14] S. Singhal S, Four Arm Windmill Shaped Superwideband Terahertz MIMO Fractal Antenna. *Optik*, 219, 165093, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165093>
- [15] MG. Silveirinha and CA. Fernandes, Computation of the Electromagnetic Modes in Two-Dimensional Photonic Crystals: A Technique to Improve the Convergence Rate of the Plane Wave Method. *Electromagnetics*. 26 (2), 175-187, 2006. <https://doi.org/10.1080/02726340500486492>
- [16] A. Sharma and G. Singh, Rectangular Microstrip Patch Antenna Design at THz Frequency for Short Distance Wireless Communication Systems. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 30 (1), 1-7, 2008.
- [17] Á. Gómez, A. Vegas, MA. Solano and A. Lakhtakia On One- and Two-Dimensional Electromagnetic Band Gap Structures in Rectangular Waveguides. *Microwave Frequencies. Electromagnetics*, 25(5), 437-460, 2005. <https://doi.org/10.1080/02726340590957443>
- [18] M. Singh and S. Singh, Design and Performance Investigation of Miniaturized Multi-Wideband Patch Antenna for Multiple Terahertz Applications. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 44,100900, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2021.100900>

- [19] TS. Rappaport, Y. Xing, O. Kanhere, S. Ju, A. Madanayake, S. Mandal, A. Alkhateeb and GC. Trichopoulos, Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond. *IEEE Access*. 7,78729-78757, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522>
- [20] A. Singh and S. Singh, A trapezoidal microstrip patch antenna on photonic crystal substrate for high speed THz applications. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*,14, 52-62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2015.01.003>
- [21] S. Ullah, C. Ruan, TU. Haq and X. Zhang, High performance THz patch antenna using photonic band gap and defected ground structure. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 33 (15), 1943-1954, 2019. <https://doi.org/10.1080/09205071.2019.1654929>
- [22] MNE. Temmar, A. Hocini, D. Khedrouche and M. Zamani, Analysis and design of a terahertz microstrip antenna based on a synthesized photonic bandgap substrate using BPSO. *Journal of Computational Electronics*, 18, 231-240, 2019.
- [23] BO. De Andrade and LM. De Mendonca, Frequency invariance, gain improvement, and fast design in 3D-printed photonic band gap antennas with quadratic holes. *Microwave and Optical Technology Letters*. 61 (10), 2295-2305, 2019. <https://doi.org/10.1002/mop.31897>
- [24] JPP. Pereira, JP. Da Silva and HD. De Andrade, A new design and analysis of a hexagonal PBG microstrip antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57 (9), 2147-2151, 2015. <https://doi.org/10.1002/mop.29279>
- [25] G. Singh, Design considerations for rectangular microstrip patch antenna on electromagnetic crystal substrate at terahertz frequency. *Infrared Physics & Technology*, 53 (1), 17-22, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2009.08.002>
- [26] MN. Eddine-Temmar, A. Hocini, D. Khedrouche and TA. Denidni, Analysis and Design of MIMO Indoor Communication System Using Terahertz Patch Antenna Based on Photonic Crystal with Graphene. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 43,100867, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2020.100867>
- [27] S. Anand, DS. Kumar, RJ. Wu and M. Chavali, Analysis and design of optically transparent antenna on photonic band gap structures. *Optik*,125 (12), 2835-2839, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.11.061>
- [28] E. Rahmati and M. Ahmadi-Boroujeni, Improving the efficiency and directivity of THz photoconductive antennas by using a defective photonic crystal substrate. *Optics Communications*, 412, 74-79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.011>
- [29] KR. Jha and G. Singh, Analysis and design of terahertz microstrip antenna on photonic bandgap material. *Journal of Computational Electronics*, 11 (4), 364-373, 2012.
- [30] MN. Eddine-Temmar, A. Hocini, D. Khedrouche and TA. Denidni, Enhanced Flexible Terahertz Microstrip Antenna Based on Modified Silicon-Air Photonic Crystal. *Optik*, 217, 164897, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164897>
- [31] A. Hocini, MN. Temmar, D. Khedrouche and M. Zamani, Novel Approach for the Design and Analysis of a Terahertz Microstrip Patch Antenna Based on Photonic Crystals. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*,36,100723,2019. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2019.100723>
- [32] MS. Khan, AD. Capobianco, SM. Asif, A. Iftikhar, BD. Braaten and RM. Shubair, A properties comparison between copper and graphene-based UWB MIMO planar antennas. In: *IEEE, International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Puerto Rico; 26 June-1 July 2016:1767-1768*. <https://doi.org/10.1109/APS.2016.7696590>
- [33] T. Zhou, Z. Cheng, H. Zhang, M. Le Berre, L. Militaru and F. Calmon, Miniaturized tunable terahertz antenna based on graphene. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56 (8), 1792-1794, 2014. <https://doi.org/10.1002/mop.28450>
- [34] R. Goyal R and DK. Vishwakarma, Design of a graphene-based patch antenna on glass substrate for high-speed terahertz communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60 (7), 1594-1600, 2018. <https://doi.org/10.1002/mop.31216>
- [35] JY. Liu, TJ. Huang, FY. Han, LZ. Yin and PK. Liu, Terahertz routing with graphene magnetic metamaterials. *Optics Communications*, 464, 125506, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125506>
- [36] P. Upende and A. Kumar, Quad-Band Circularly Polarized Tunable Graphene Based Dielectric Resonator Antenna for Terahertz Applications. *Silicon*, 2021.
- [37] CM. Krishna, S. Das, S. Lakrit, S. Lavadiya, BTP. Madhav and V. Sorathiya, Design and analysis of a super wideband (0.09-30.14 THz) graphene based log periodic dipole array antenna for terahertz applications. *Optik*, 247, 167991, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167991>
- [38] AE. Yilmaz and M. Kuzuoglu, Calculation of optimized parameters of rectangular microstrip patch antenna using particle swarm optimization. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49 (12), 2905-2907, 2007. <https://doi.org/10.1002/mop.22918>
- [39] CA. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. New York, J. Wiley, 2005.
- [40] CST Microwave Studio Suite, CST Inc.; 2018.





A mathematical model for vaccine cold chain network design considering social sustainability

Sosyal sürdürülebilirlik kapsamında aşı soğuk zincir ağ tasarımı için matematiksel model önerisi

Nur Hivda Yıldız¹ , Nadide Aktaş² , Neslihan Demirel^{3*} 

^{1,2,3} Kayseri University, The Faculty of Applied Disciplines, International Trade and Logistics

Abstract

Breakages that may occur in the cold chain cause serious economic, environmental, and social costs, as well as a substantial risk for human and public health. Therefore, it is necessary to design an effective, robust, and strong vaccine cold chain network. Sustainable Development Goal 3 titled “Good Health and Well Being” emphasizes children's health and specifies reducing the mortality rate for under five ages. In this study, we consider the Expanded Programme on Immunization (EPI) vaccine cold chain in Türkiye and develop a linear programming model for a multi-product, multi-period, multi-stage vaccine cold chain network in light of Sustainable Development Goal 3. The study aims to maximize fully immunized children for up to five years and propose a framework for a vaccine cold chain network design. The proposed model is applied to a real case. Finally, various scenario analyzes are applied to show the results of the model under different conditions.

Keywords: Expanded program on immunization, Linear programming, Network design, Social sustainability, Vaccine cold chain

1 Introduction

Immunization is considered one of the indisputable human rights. However, annually an excessive amount of people, including infants that are around 20 million, do not have access to vaccines, specifically in developing countries. Children under 5 years are particularly at risk. Approximately 5.2 million children under the age of 5 died in 2019. These deaths correspond to the age ranges that are under 28 days (2.4 million deaths), 1 to 11 months (1.5 million deaths), and 1 to 4 years (1.3 million deaths) [1]. Many factors play a role in child mortality. Despite the fact that leading causes of death remain almost the same, there is progress in reducing the under-5 mortality rate [1]. In addition to these improvements, advances in the scope of vaccination are also vital. Thanks to vaccination, child mortality rates have declined significantly since 1990. Today, more than 20 diseases mostly life-threatening are able to be prevented by vaccines [2].

UNICEF indicates that vaccines are among the ultimate improvements in global health and development and the safest method to protect children from critical diseases [3].

Öz

Aşıların tabii olduğu soğuk zincirde meydana gelebilecek kırılmalar; ciddi ekonomik, çevresel ve sosyal maliyetlerin yanında insan ve halk sağlığı açısından da önemli risklere neden olmaktadır. Bu nedenle etkili, sağlam ve güçlü bir aşı soğuk zincir ağının tasarlanması gerekmektedir. Diğer yandan, “Sağlıklı Bireyler” başlıklı Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 3, çocukların sağlığına vurgu yapmakta ve beş yaş altı ölüm oranlarının düşürülmesini hedeflemektedir. Bu çalışmada, Türkiye'deki Genişletilmiş Bağışıklama Programı EPI aşı tedarik zinciri ele alınarak Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 3 ışığında çok ürünlü, çok dönemli, çok aşamalı bir aşı soğuk zincir aği için doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir. Çalışma, beş yaşa kadar tam bağışıklanmış çocuk sayısını en üst düzeye çıkarmayı ve aşı soğuk zincir ağ tasarımı için bir çerçeve önermeyi amaçlamaktadır. Önerilen model vaka çalışmasına uygulanmıştır. Son olarak, çeşitli senaryo analizleri ile model sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Genişletilmiş bağışıklama programı, Doğrusal programlama, Ağ tasarımı, Sosyal sürdürülebilirlik, Aşı soğuk zinciri

Unfortunately, the ratio of children who receive the vaccines has remained the same last few years [2]. On the other hand, the third title of the Sustainable Development Goals (SDG) aims to “ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages”. Specifically, goal 3.2 aims to reduce newborn and under 5 mortalities at least as low as 12 and 25 respectively per 1000 live births in every country, and goal 3.8 aims to increase to access vaccines for all [4]. It is essential for countries to increase their immunization rates to the best possible level in order to reach SDG 2030.

Studies in the literature regarding the vaccine cold chain cover countries with varying levels of development. Yet, developing countries are of particular importance. Türkiye, which is one of the developing countries, takes into account the vaccines within the scope of the EPI, which WHO recommends for the protection of children from childhood diseases and also provides significant improvements in vaccination services in countries. Since EPI has successfully been implemented, the immunization rate in Türkiye has increased, the infant mortality rate has decreased as low as 9, and the under-5 mortality rate has decreased as low as 9.5

per 1000 live births in 2020 [5-7]. However, considering the current conditions, in consequence of the various problems in several countries, there are more refugees than ever in Türkiye, such as millions of Syrian, Afghani, Pakistani, and other nationalities up to 320.000 people [8]. Unfortunately, Syria, Afghanistan, and Pakistan have higher mortality rates than other countries [9]. It is a fact that worsening humanitarian conditions accelerate the spread of infectious diseases [10] and also cause children to miss their doses of vaccination [11]. Sudden refugee movements with large groups and poor access to vaccination programs may affect the immunization rates adversely in Türkiye [10, 11].

Vaccines are medical products that require exceptional care. Some of them are sensitive to temperature, some to light, and some both. Each vaccine needs different storage conditions, therefore knowing which vaccine can be stored for how long and at what temperature is of foremost importance so that the vaccines do not lose any quality until they are used. Vaccines lose their effectiveness if they are exposed to temperatures from the recommended temperature range. The effectiveness of vaccines is protected by the cold chain. The cold chain refers to the process in which vaccines are transported, stored, and handled under optimum temperature conditions, starting from the point of production until they are administered [12]. The interruption of the cold chain causes product losses and disruption of vaccination programs. A vaccine cold chain is a complex structure that includes various processes, the right temperature, the right equipment, and locations from the vaccine supply to the destinations. Maintaining the efficacy of vaccines depends on understanding and properly addressing this structure [13]. An accomplished vaccination process and higher immunization rate are only possible with the successful design of the vaccine cold chain, which is stronger, robust, and efficient. Hereby, it can be possible to reduce disease transmission.

The unique characteristic of the vaccine cold chain makes the processes more challenging for developing Countries, such as the need for quick response, sufficient resources, strategic decisions regarding equipment, personnel, and transportation vehicles. On the other hand, population density, access and transportation conditions that differ due to the geographical structure also cause difficulties. Chen et al. [14] specify other situations that negatively affect the cold chain process for developing countries in their paper and some of them correspond to the current problem in Türkiye. For instance, migrant populations, changes in birth rates, poor forecasts, and unexpected epidemics or pandemics (such as COVID-19) may cause variations in demand and affect the vaccination process and resources [14].

In developing countries, vaccination coverage may be increased by the efficient delivery of EPI vaccines. The literature contains vaccine cold chain studies with different perspectives. Unfortunately, studies addressing the optimization of the EPI vaccine cold chain from an operations research perspective are limited. In this study, the EPI vaccine distribution chain in Türkiye is considered and four of the EPI vaccines have been involved in the analysis (BCG, DtaP-Hib-IPV, PCV, OPV). Since under five ages are

at most risk, 0-4 age children has been taken into account. All doses of vaccines included in the analysis are completed before the age of 4. This study aims to propose a framework for a vaccine cold chain network design to maximize the number of immunized children up to 4 years old. A linear programming model has been developed for a vaccine cold chain network. The proposed model has been applied to a real case. This study has academic, practical, and policy-related contributions. We hope that using the proposed framework will assist policy and decision makers, and practitioners in making integrated decisions for their complex cold chain networks that consider various issues, such as multi-periods, multi-products, storage, and multi-stage. The main contributions of the study can be summarized as below: (a) the proposed model may be used as a framework for the countries which have similar vaccine cold chain processes, (b) the model helps maximizing the immunized population, (c) scenario analyses assist to improve the process and to make the policies regarding vaccination, and (d) lastly, the study has several positive effects for achieving SDG.

The paper is organized as follows. Section 2 consists of relevant literature. The problem statement, mathematical model, and case study are stated in Section 3. Results and scenario analyzes are discussed in Section 4. Section 5 finalizes the study with the conclusion, limitations, and future work suggestions.

2 Related work

In this section, we review the existing literature regarding the vaccine cold chain including mathematical models. Table 1 summarizes the related literature. Vaccine cold chain studies mostly focus on the case study, and they aim to optimize the distribution chain by minimizing the cost, maximizing the immunized children, and considering equity in distribution. Jacobson et al. [15] developed a MIP model for the procurement and delivery of childhood vaccines. They aimed to minimize the total cost of fully immunizing a child by considering the cost of the purchased vaccine, the costs of clinic visits, and the costs of preparing the vaccine by healthcare staff.

Some of the researchers proposed optimization models with the aim of minimizing the overall costs of vaccine supply chains [16, 19]. Hovav and Tsadikovich [16] presented a mathematical model for influenza vaccine distribution and inventory management. Hovav and Herbon [19] applied the model that they developed to the supply chain of the vaccination program conducted by Israel health services. Yang et al. [25] developed a mathematical model to minimize the total costs of EPI vaccine distribution networks in low- and middle-income countries. Saif and Elhedli [18] aimed to minimize total cost and environmental impacts. They proposed mixed-integer concave minimization problem and solved the problem with simulation-optimization approach.

Current doses of vaccines are insufficient when there are outbreaks that require vaccination of the entire population. Thus, an allocation problem arises as to who should be vaccinated.

Table 1. Literature review

Author(s)	Year	Case study	Objective function			Model
			Minimize	Maximize	Multi-objective	
Jacobson et al. [15]	1999		✓			MIP
Chen et al. [14]	2014	✓		✓		LP
Hovav and Tsadikovic [16]	2015	✓	✓			MIP
Smalley et al. [17]	2015	✓	✓			MIP
Saif and Elhedli [18]	2016	✓			✓	MIP
Hovav and Herbon [19]	2017	✓	✓			MIP
Carvalho et al. [20]	2019	✓			✓	MILP
Günay et al. [10]	2019	✓		✓		MILP
Lim et al. [21]	2019	✓	✓			MIP
Sadjadi et al. [22]	2019	✓	✓			MILP
Abbasi et al. [23]	2020	✓	✓			MILP
Enayati and Ozaltın [24]	2020		✓			MILP
Yang et al. [25]	2020	✓	✓			MIP
Qasem et al. [26]	2020	✓		✓		MIP
Alizadeh et al. [27]	2021	✓			✓	MIP
Georgiadis and Georgiadis [28]	2021	✓	✓			MILP
Rastegar vd. [29]	2021	✓		✓		MILP
Tavana et al. [30]	2021	✓		✓		MILP
Gilani and Sahebi [31]	2022	✓			✓	MILP
Balcik et al. [32]	2022	✓	✓			IP
Khodaei et al. [33]	2022	✓	✓			MIP

MILP: Mixed integer linear programming, MIP: Mixed integer programming, LP: Linear programming IP: Integer programming

Considering the risk and transmission levels within a population, it can be determined which groups should be given priority [26]. The vaccine allocation problem has been addressed by many researchers [17, 10, 23, 24, 26, 29]. Smalley et al. [17] proposed a mathematical model to find the optimal vaccine allocation strategy to minimize cholera cases in Bangladesh. They analyzed different distribution strategies for different age groups. Günay et al. [10] developed a MILP model to determine the optimal quantities of polio vaccines to be administered in regions with high Syrian refugee populations in Türkiye. The model aimed to maximize the refugee population vaccinated against polio and applied in five cities that have the highest refugee population. In addition, different vaccination strategies were compared for cost-effectiveness in the study. Abbasi et al. [23] developed a mathematical model for vaccine allocation that included operational constraints such as vaccine stocks, storage, and transportation capacities, as well as non-operational constraints such as exposure risks. Enayati and Özalın [24] considered the equity distribution of influenza vaccines in the model they had developed. The model aimed to minimize necessary vaccine doses to prevent a disease outbreak at the initial stages of the epidemic. Qasem et al.

[26] determined the optimal number of cholera vaccines that needed to be distributed based on the risk level of age groups and the population of regions. The authors compared different vaccine policies considering age, population, and both. Rastegar et al. [29] presented an inventory-location model for equitable distribution of influenza vaccine during the COVID-19 pandemic. Then, the authors analyzed the model's performance using real-world data from the influenza vaccine distribution chain in Iran. Balcik et al. [32] discussed the equitable and effective allocation of COVID-19 vaccines to different priority demand groups within the country such as elderly and healthcare workers. They also considers multiple vaccine types and regional characteristics such as storage capacities and infection risk levels. The model aimed to minimize the total deviation from the adequate coverage level. Khodaei et al. [33] developed a MIP model to minimize logistic costs, considering the equitable distribution of COVID-19 vaccines. The authors applied the model to actual vaccine distribution data during the COVID-19 pandemic in Europe. Similarly, Tavana et al. [30] focused on equitable distribution of COVID-19 vaccine in developing countries and developed an inventory-location model. The authors classified vaccines as cold, very cold,

and ultracold based on the temperature level requiring for storage and transportation.

Additionally, Lim et al. [21] developed a mathematical model for the optimal design of an EPI vaccine distribution network. Sadjadi et al. [22] aimed to design a vaccine supply chain in Iran. They considered several factors like demand and cost uncertainties, perishability, limited capacity, and different priorities for demands. Alizadeh et al. [27] discussed a vaccine supply chain network design for influenza vaccines during the COVID-19 pandemic. The developed model focused on three main issues; demand allocation based on customer prioritization, loss of customer demand, and cost. The authors applied the model to a case study in Mazandaran, Iran. Few studies in the literature addressed the planning of the vaccine supply chain [14, 28]. Chen et al. [14] developed a planning model for the EPI vaccine distribution chain in developing countries. The model aimed to maximize the number of fully immunized children under current network capacity and adapted to the supply chains of three countries: Niger, Thailand, and Vietnam. Georgiadis and Georgiadis [28] developed a mathematical model for the optimal planning the COVID-19 vaccine supply chain. The developed model considered vaccine perishability, multiple cold storage technologies, transportation lead-times, and demanding vaccination targets. Sustainability of the vaccine supply chain has been also one of the remarkable issues in the literature. Gilani and Sahebi [31] focused on modeling a sustainable COVID-19 vaccine supply chain. The authors developed a multi-stage and multi-period MILP model for a case study in Iran. They offered a multi-objective model including economic, environmental, and social aspects. Costs, emissions, and jobs created within the process are considered for the economic, environmental, and social aspects, respectively. Carvalho et al. [20] focused on the optimal design of a sustainable vaccine supply chain in Europe. They proposed a multi-objective and multi-period MILP model considering triple bottom line. Cash flow, environmental impact, and jobs created within the process are considered for the economic, environmental, and social aspects, respectively. The study aimed to ensure the fulfillment of vaccination through efficient utilization of resources. The developed model was applied to a case study.

Immunization in preventive health care practices rather than cost is vital for public health and social sustainability (SDG 3.2 and 3.8). Child health and long-term public health are possible through effective design and management of the vaccine cold chain. Studies considering child vaccinations [10, 14, 15, 21, 25] are limited, and the number of papers maximizing the vaccinated population [10, 14, 26] is insufficient in the literature. In addition, studies consider social sustainability as job creation within the vaccine cold chain [20, 31]. In this light, we aim to develop a mathematical model to maximize the number of fully immunized children under budgetary constraints aiming directly at goal number three of the SDG. To the best of the authors' knowledge, except for Günay et al. [10], no study takes child immunization into account for Turkey. Our study differs from Günay et al. [10] in that it takes into account the

whole child population, more than one vaccine, vaccination under four years old, and SDG-3.

3 Material and method

Although vaccine distribution network varies for each country, they consist of four tiers in general: a central store, regional stores, provincial stores, and clinics [34]. In this study, we discuss the supply chain of vaccines administered within the scope of the EPI in Türkiye. Figure 1 shows the EPI vaccine cold chain network structure in Türkiye. In Türkiye, the EPI supply chain also consists of four tiers. The Ministry of Health is responsible for supplying vaccines, storage, transferring vaccines to the end user, and monitoring the entire process in Türkiye. Vaccines from various manufacturers are first shipped to the central store and according to the amount of vaccine demanded by the regional store they are shipped from central store to the regional store at certain periods by refrigerated trucks. There are 14 refrigerated trucks in Türkiye that deliver vaccines from the central store to the regional stores. The demand of the provincial stores is met from the regional stores to which it is affiliated. The same structure continues between clinics and provincial stores, which are the last stage of the chain. Vaccines are delivered to provincial stores and clinics by refrigerated vehicles smaller than trucks.

In this study, we focus on the part of the vaccine cold chain between the central store and the provincial stores and develop an LP model for a multi-period, multi-product, multi-stage cold chain network for EPI vaccines. The aim of the developed model is to maximize the number of fully immunized children aged 0-4 years by administering all doses of each vaccine. Determined structures and assumptions of the developed model are given below:

- By the phrase "fully immunized child", we mean children who have received all the doses on the EPI immunization schedule.
- Although there are ten vaccines in Türkiye's EPI vaccine schedule, four of these vaccines are considered due to the collectability of the data.
- Wastage rate has been incorporated into the model to take into account the loss of vaccines as a result of breaking the cold chain.
- A capacity utilization rate for both facilities and vehicles has been determined for effective storage and handling in each store and shipping vehicle.
- Safety stock for regional stores have been considered.
- The capacity limitations for the vehicles that deliver vaccines from the regional stores to the provincial stores are ignored.

Different number of doses that is required for immunization for different vaccines is considered in the model. Since vaccines should be placed in the refrigerator in a way that allows sufficient air flow between them [35], a certain part of the total capacity is considered for efficient storage and transportation.

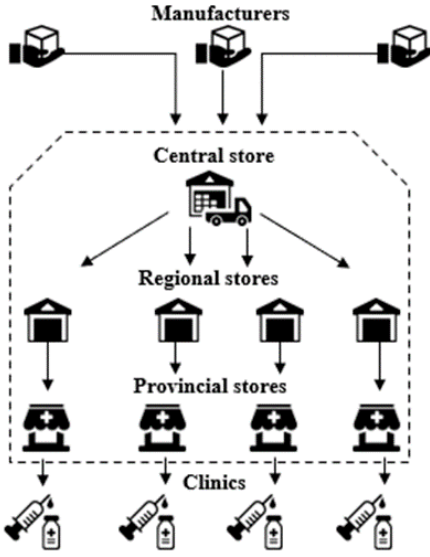


Figure 1. Vaccine cold chain network in Türkiye

3.1 Mathematical model

Indices

- I Index of vaccines, $i \in I$
- J Index of regional stores, $j \in J$
- K Index of provincial stores, $k \in K$
- K^j Index subset of provincial stores that can be served by j , $k^j \in K^j \in K$
- T Index of periods, $t \in T$

Parameters

- n_i Number of doses administered of vaccine i within the vaccine regimen
- F_i Minimum fraction of demand for vaccine i at location j that must be met each period
- T_{ikt} Target population for vaccine i at location k each period
- r_i Target immunization coverage expressed as a decimal number for vaccine i
- α_i Fraction of lost vaccine i
- α_{ij} Fraction of lost vaccine i arisen while transferring vaccine to regional store and/or at regional store
- α_{ik} Fraction of lost vaccine i arisen while transferring vaccine to provincial store and/or at provincial store
- c_i Cost of vaccine i
- c_i^w Waste cost of vaccine i
- B Annual budget of the vaccination campaign
- β Capacity utilization factor considering effective storage
- Σ Fraction of safety stock
- w_i Waste factor for vaccine i
- p_i Effective package volume of one dose of vaccine i
- D_{ij} Annual demand for vaccine i at j (dose)
- cap_j Cold chain capacity of regional store j
- cap_k Cold chain capacity of provincial store k
- t_{cap} Transportation capacity of refrigerated trucks between the central store and regional stores

Decision Variables

- X_{ijt} Number of transported doses of vaccine i from central store to location j in period t
- Y_{ijkt} Number of transported doses of vaccine i from location j to location k in period t
- I_{ijt} Inventory of location j for vaccine i at the end of period t
- D_{ikt} Demand of location k for vaccine i in period t
- Z_{ikt} Number of administered doses at location k in period t
- V_j Annual number of fully immunized children at location j
- Q_i Amount of loss of vaccine i

The model for maximizing the number of fully immunized children formulated as follows:

$$\text{Max} \sum_j V_j \quad (1)$$

$$D_{ij} = \sum_{\substack{t \in T \\ k \in K^j}} D_{ikt} \quad i \in I, j \in J \quad (2)$$

$$D_{ikt} = T_{ikt} \cdot r_i \cdot n_i \cdot w_i \quad i \in I, k \in K, t \in T \quad (3)$$

$$I_{ijt} = (I_{ijt-1} + X_{ijt}) (1 - \alpha_{ij}) - \sum_{k \in K^j} Y_{ijkt} \quad i \in I, j \in J, t \in T \quad (4)$$

$$I_{ijt} \geq D_{ij} \cdot \sigma \quad j \in J, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ijt} \cdot p_i \leq cap_j \cdot \beta \quad j \in J, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} Y_{ijkt} \cdot p_i \leq cap_k \cdot \beta \quad t \in T, k \in K^j, j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ j \in J}} X_{ijt} \cdot p_i \leq cap_t \cdot \beta \quad t \in T \quad (8)$$

$$F_i \cdot D_{ikt} \leq Y_{ijkt} \leq D_{ikt} \quad i \in I, k \in K, t \in T, j \in J \quad (9)$$

$$V_j \leq \sum_{\substack{t \in T \\ k \in [K^j]}} Z_{ikt} / n_i \quad i \in I, j \in J \quad (10)$$

$$Z_{ikt} \leq Y_{ijkt} \cdot (1 - \alpha_{ik}) \quad i \in I, k \in K^j, t \in T, j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{\substack{i \in I \\ k \in K \\ t \in T}} c_i \cdot Z_{ikt} + \sum_{i \in I} c_i^w \cdot Q_i \leq B \quad (12)$$

$$Q_i = \sum_{\substack{j \in I \\ t \in T}} X_{ijt} \cdot \alpha_{ij} + \sum_{\substack{j \in J \\ t \in T}} (I_{ijt-1}) \cdot \alpha_{ij} + \sum_{\substack{j \in J \\ k \in K \\ t \in T}} Y_{ijkt} \cdot \alpha_{ik} \quad i \in I \quad (13)$$

$$X_{ijt}, Y_{ijkt}, D_{ikt}, I_{ijt}, Z_{ikt}, Q_i \geq 0 \quad \forall i, j, k, t \quad (14)$$

Equation (1) represents the objective function that maximizes the annual number of fully immunized children. Constraint (2) indicates that the annual vaccine *i* demands of regional store *j* is equal to the annual demand of the provincial stores to which the vaccine is shipped. Constraint (3) determines the requested dose amount of vaccine *i* in the provincial stores for each period, taking into account the target immunization coverage and the waste factor. Constraint (4) determines the stock amount of regional store *j*. Constraint (5) ensures the minimum stock quantity of regional stores. Constraint (6) stipulates that the total volume of vaccines shipped from the central store to the regional stores at the *t* time period must not exceed the capacity of the regional stores, considering effective storage. Constraint (7) is a storage capacity constraint for provincial stores. Constraint (8) indicates the transportation capacity between the central store and the regional stores. Constraint (9) indicates the range of required vaccine *i* supply at each provincial store *k* in each time period. Constraint (10) determines the number of fully immunized children in the location where the regional store *j* is located. Constraint (11) stipulates that the number of doses administered in the provincial stores in the period *t* must not exceed the amount shipped to the provincial store, taking into account the amount of loss. Constraint (12) states that the total cost of administered and lost vaccines must not exceed the budget. Constraint (13) indicates the amount of vaccine lost during shipment to the regional store and the provincial store or while stored there. Lastly, Constraint (14) shows the non-negative decision variables.

3.2 Case study

The proposed model has been applied for the vaccine cold chain in Kars province located in the Eastern Anatolia Region of Türkiye with a population of 284.923. The data has been obtained from the Kars Provincial Health Directorate, the EPI circular of the Republic of Türkiye Ministry of Health, literature research, and the Ministry of Health's official website. There is 1 regional store with a vaccine storage capacity of 27 m³, 8 provincial stores, and 28 clinics in the province. Table 2 contains data for the four EPI vaccines considered in the model.

In Table 2, vaccines are numbered from 1 to 4 and referred so in the following sections of the study. The number of doses required for immunization against each disease varies. For example, for complete immunization, a single dose is required for the vaccine 1, while four doses are required for the vaccine 4. Some vaccines are reconstituted with a diluent before administration, these are called lyophilized vaccines. Vaccine 1 is a lyophilized vaccine, and the required volume of diluent is 0.7 c.c. [14]. The effective package volumes of vaccines, which are taken into account in transportation and storage, are also given in the table. The package volumes of the vaccines in Table 2 are based on data obtained from other studies in the literature [14, 25]. In the model, the volume of diluent is included in the dose-volume of the vaccine 1. Based on the studies in the literature, the costs have been taken as \$2 for vaccines 1, 2, and 3 per doses and \$3.60 for the vaccine 4 [17, 34] and adapted to the Turkish lira using the current exchange rate (1\$≈10₺). The annual vaccination budget for Türkiye was 882.841.000 ₺ in 2016. For the case study, the annual vaccination budget for considered four EPI vaccines has been determined as 40.000.000 ₺. Vaccines may be lost for several reasons while being stored and shipped between stores. The wastage rates in Table 2 have been calculated by summing the rate of vaccine lost while being shipped to or stored in the regional store (α_{ij}), and in the provincial store (α_{ik}). The wastage rates have been considered as 15% for both stages and 30% in total. The wastage rate directly determines the waste factor that is required for vaccine requirement planning and must be defined for each vaccine [36]. Waste factor information has been calculated with the formula $100/100-\% \alpha_i$ for each vaccine. Table 3 contains data regarding provincial stores in Kars.

Table 2. Data about vaccines

No.	Vaccine	Doses administered	Packed volume / dose (c.c)	Diluent volume / dose (c.c)	Waste factor	Fraction of wastage vaccine	Cost (₺)	Waste cost (₺)
1	BCG	1	1.2	0.7	1.42	%30	20	5
2	OPV	2	1.0	-	1.42	%30	40	8
3	PCV	3	12	-	1.42	%30	60	15
4	DTaP-Hib-IPV	4	16.8	-	1.42	%30	144	36

Table 3. Data about provincial stores in Kars province

No	Provincial Stores	Total capacity (m ³)	Target population aged 0-4 (monthly)
1	Selim	0.2	263
2	Arpaçay	0.25	268
3	Susuz	0.25	70
4	Akyaka	0.2	92
5	Digor	0.2	275
6	Sarıkamış	0.4	518
7	Kağızman	0.28	581
8	Merkez	0.5	1315

The total vaccine capacity of each provincial store and the target population for 2020 has been obtained from the Kars Provincial Health Directorate. It has been aimed to immunize 90% of the target population according to the EPI circular of the Ministry of Health. The capacity utilization rate has been determined for effective storage and handling of the regional store, provincial stores, and transportation vehicles as 40% of the total capacity [14].

4 Results and discussion

We have tested the model using a computer with 1.50 GHz processor and 2 GB of RAM and the computation time required to solve the model optimality using the GAMS-CPLEX solver is less than 1 CPU second. The number of fully immunized children expressing the objective function value is 42.188 in Kars in 2020. The dose amounts requested by the regional store for each vaccine during the year are indicated in Table 4.

Table 4. Annual demand of the regional store

D _{ij}	Value
D ₁₁	518.076
D ₂₁	103.728
D ₃₁	155.604
D ₄₁	207.456

The total demand in all periods for each vaccine of the provincial stores constitutes the annual demand of the regional store given in Table 4, since the demand of provincial stores is met by the regional store. Transported doses of vaccines from central stores are given in Table 5.

Table 5. The amount of vaccine *i* transported from the central store to the regional store in the *t* period (dose)

X _{ijt}	Value	X _{ijt}	Value	X _{ijt}	Value	X _{ijt}	Value
X ₁₁₁	6.152	X ₂₁₁	12.304	X ₃₁₁	18.833	X ₄₁₁	24.608
X ₁₁₂	5.063	X ₂₁₂	10.126	X ₃₁₂	15.188	X ₄₁₂	20.251
X ₁₁₃	5.063	X ₂₁₃	10.126	X ₃₁₃	15.188	X ₄₁₃	20.251
X ₁₁₄	5.063	X ₂₁₄	10.126	X ₃₁₄	15.128	X ₄₁₄	20.251
X ₁₁₅	5.063	X ₂₁₅	10.126	X ₃₁₅	15.128	X ₄₁₅	20.251
X ₁₁₆	5.063	X ₂₁₆	10.126	X ₃₁₆	15.128	X ₄₁₆	20.251
X ₁₁₇	5.063	X ₂₁₇	10.126	X ₃₁₇	15.128	X ₄₁₇	20.251
X ₁₁₈	5.063	X ₂₁₈	10.126	X ₃₁₈	15.128	X ₄₁₈	20.251
X ₁₁₉	5.063	X ₂₁₉	10.126	X ₃₁₉	15.128	X ₄₁₉	20.251
X ₁₁₁₀	5.047	X ₂₁₁₀	10.095	X ₃₁₁₀	15.128	X ₄₁₁₀	20.190
X ₁₁₁₁	5.043	X ₂₁₁₁	10.085	X ₃₁₁₁	15.128	X ₄₁₁₁	20.170
X ₁₁₁₂	5.043	X ₂₁₁₂	10.085	X ₃₁₁₂	15.128	X ₄₁₁₂	20.170

617.873 doses of vaccine have been transported totally from the central store to the regional store during all periods. From central store to the regional stores vaccine 1 has the lowest amount in terms of transported quantities, while vaccine 4 has the highest (40% of the total amount of the four vaccines). Regional store's stock amounts are determined as 1.089, 2.178, 3.268, and 4.357 for all the periods for vaccines 1, 2, 3, and 4, respectively. According to the results, vaccine 4 constitutes 40% of the annual stock of the regional store.

The total annual demand of each provincial store is directly proportional to the target population of that provincial store. Therefore, the demand of the provincial store 8 has the highest target population, while the demand of the provincial store 3 has the lowest target population.

On the other hand, the amount of dose transported to the provincial store 8, which has a higher demand than other provincial stores, is the highest, in the optimum solution. A total of 191.592 doses of vaccine (63.4% of the total transported vaccine) have been transported during all periods.

In the optimum solution, each vaccine has been administered in all provincial stores in each period. The total number of doses administered during all periods in all provincial stores is 421.871. The highest dose has been administered in the provincial store 8 and 38.6% of the total amount of vaccine have been administered. Figure 2 shows the comparison of results for all provincial stores.

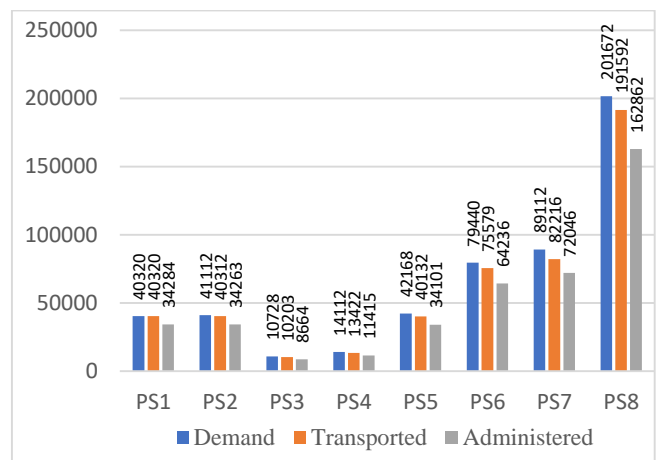


Figure 2. Comparison of results for provincial stores

When we examine the results of the case study that has been solved with the data of 2020, we conclude that the provincial store with the highest total demand depending on the target population is the provincial store 8. Accordingly, the number of doses transported is higher than in other provincial stores, which means more vaccinated children.

4.1 Scenario analysis

The achievement of national immunization programs depends on effective and up-to-date policies and strategies. This part of our study, the effects of budget and wastage rates which are the main problems encountered especially in developing countries in achieving immunization targets on model behavior has been examined. In order to analyze the

impact of different budgets and fractions of the lost vaccine on the model, we have developed various scenarios. Then, we have examined the change in the number of immunized children for each scenario.

Table 6. Scenarios

Change	Scenarios 1-6 (Budget)	Scenarios 7-12 (α_{ij})	Scenarios 13-18 (α_{ik})
-30%	28.000.000	10.5%	10.5%
-20%	32.000.000	12%	12%
-10%	36.000.000	13.5%	13.5%
Base	40.000.000	15%	15%
+10%	44.000.000	16.5%	16.5%
+20%	48.000.000	18%	18%
+30%	52.000.000	19.5%	19.5%

In Table 6, scenarios 1-6 have been developed by first decreasing the budget value by 30%, 20%, and 10% respectively, then by increasing it at the same rates. In the following scenarios (7-18), α_{ij} (fraction of lost vaccine i raised while transferring vaccine to the regional store and/or at the regional store) and α_{ik} (fraction of lost vaccine i raised while transferring vaccine to the provincial store and/or at the provincial store) values have been first decreased by 30%, 20%, and 10%, respectively, and then increased at the same rates. Figure 3 shows the changes in the objective function for scenarios 1-18.

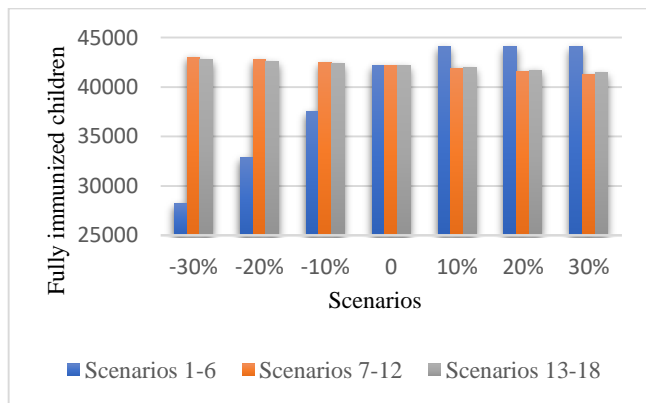


Figure 3. Scenarios

When the annual vaccine budget has been reduced, vaccines could not be administered in each provincial store during each period. For the scenario which the budget has been reduced by 30%, the objective function value is 28.198 and this is the lowest objective function value. For the 20% reduction in the budget, objective function value is 32.871 and for the 10% reduction, it is 37.544. On contrary, when the annual budget has been increased, the objective function value is increased correspondingly. Remarkable that, 10% increase in budget is a sufficient amount to obtain maximum immunization number. That is because, immunization number has no change when 20% and 30% increase take place in budget. Scenario analysis regarding budget change clearly states that decrease in budget threatens the number of immunized children, while increase in budget increases the number up to a level.

Scenarios 7-12 demonstrate that when α_{ij} has been reduced by 30% objective function value increases to 43.033. Nevertheless, the increase in the α_{ij} value decreases the objective function value to 41.892, 41.558, and 41.211, respectively. As at the regional level, the number of fully immunized children increases as the fraction of lost vaccine decreased at the provincial level. The objective function value is 42.761 for the scenario which the α_{ik} value is reduced by 30% and this is the highest value. The lowest objective function value is 41.469 and it is obtained with the scenario which the α_{ik} value is increased by 30%. The objective function values of scenarios 7-18 show that reducing vaccine losses means more immunized children. Decision makers and authorities may specify the lost related problems and intervene to improvements regarding the personnel, equipment, storage, transportation process, etc.

In brief, comparing the objective function values for the 18 scenarios, we conclude that the budget-related scenarios are the ones that affect the objective function value the most. However, reducing vaccine losses is very important to reach more children, especially in developing countries with limited budgets for immunization. As a result, avoiding cold chain breaks and increasing the budget are both important for public health and should be evaluated as a whole to make immunization process efficient and reach the targets in developing countries.

5 Conclusion

Although, the COVID-19 pandemic accelerates and enhances the vaccine related studies, studies on childhood vaccines are insufficient. On the other hand, effectively designing and modeling vaccine cold chains is difficult because of having many characteristic constraints. Especially in developing countries, creating an efficient distribution chain is a top priority because of limited budgets for public health and mortality rates depending on preventable diseases with immunization. In this study, we have presented an EPI vaccine cold chain network and proposed a mathematical model with the aim of maximizing the number of fully vaccinated children aged up to 4 years old. We have presented the application of the model in Kars which is one of the important provinces of Türkiye. The number of fully immunized children that expressing the objective function value of the model has been determined as 42.188 for 2020 in Kars. Scenario analyses help to implement some critical policy decisions. Budget scenarios show that if the budget is increased by 10%, the number of children that fully immunized will reach the maximum. In other words, since there will be no difference in the number of children immunized in case of an increase of more than 10% in the budget, the most efficient budget value will be the budget that is %10 more than the current value. Contrary to scenario about budget, other scenarios state that the fewer the number of vaccines lost, the greater the number of children that are fully immunized.

SDG emphasizes that child health needs to be protected as much as possible. As mentioned above, Türkiye has a critical position as the country has more refugees than ever. To be able to provide healthy conditions for every child in

the country and equal right to live, this study presents vital insights for decision-makers and practitioners. Additionally, since developing countries have a similar vaccine cold chain networks such as importing vaccines and storing them in a central store and transporting the vaccines to regional and provincial stores and clinics, the model presented in the study may also be used in these countries with the aim of increasing the immunized population. Yet, the study has some limitations such as considering four vaccines of the EPI schedule. In the study, the capacities of the vehicles that deliver vaccines from the regional stores to the provincial stores are ignored and it is assumed that only regional stores have safety stock. Future studies may consider all EPI vaccines, all of the stages of supply chain from production to vaccination, different age ranges, and risk rates.

Acknowledgements

The authors offer special thanks to Kars Provincial Health Directorate.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 14

References

- [1] World Health Organization, Children: improving survival and well-being, 08/09/2020. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/children-reducing-mortality>. Accessed: 19 April 2022.
- [2] World Health Organization, Vaccines and immunization, 2021. https://www.who.int/health-topics/vaccines-and-immunization#tab=tab_1. Accessed: 19 April 2022.
- [3] UNICEF, Immunization, 2021. <https://www.unicef.org/immunization>. Accessed: 16 November 2021.
- [4] Sustainable Development Goals, Goal 3: Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages, 2022. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/health/>. Accessed: 14 April 2022.
- [5] Statista, Infant mortality rate (under one year old) in Turkey from 1950 to 2020, 2022. <https://www.statista.com/statistics/1073263/infant-mortality-rate-turkey-historical/>. Accessed: 18 April 2022.
- [6] UNICEF, Trends in under-five mortality rate in Turkey, 2022. <https://data.unicef.org/country/tur/>. Accessed: 18 April 2022.
- [7] World Bank, Mortality rate under-5 (per 1,000 live births), 2022. <https://data.worldbank.org/indicator/SH.DYN.MORT?locations=TR>. Accessed: 18 April 2022.
- [8] United Nations High Commissioner for Refugees, Refugees and Asylum Seekers in Turkey, 2022. <https://www.unhcr.org/tr/en/refugees-and-asylum-seekers-in-turkey>. Accessed: 18 April 2022.
- [9] World Bank, Mortality rate under-5 (per 1,000 live births), 2022. https://data.worldbank.org/indicator/SH.DYN.MORT?most_recent_value_desc=true. Accessed: 18 April 2022.
- [10] E. E. Günay, K. Park, S. Aydoğan and G. E. Okudan Kremer. Vaccine Distribution Strategies against Polio: An Analysis of Turkey Scenario. Industrial and manufacturing systems engineering conference proceeding and posters, Orlando, Florida, USA, 2019.
- [11] UNICEF, Immunization, 2022. <https://www.unicef.org/turkey/en/immunization>. Accessed: 16 November 2022.
- [12] K. Shafaat, A. Hussain and B. Kumar, An Overview: Storage of pharmaceutical products. World J Pharm Sci, 2499-515, 2013.
- [13] B. Y. Lee and L. A. Haidari, The importance of vaccine supply chains to everyone in the vaccine world. Vaccine, 35(35): 4475-4479, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2017.05.096>
- [14] S. I. Chen, B. Norman, j. Rajgopal, T. M. Assi, B. Y. Lee and S. T. Brown, A planning model for the WHO-EPI vaccine distribution network in developing countries. IIE Transactions, 46(8): 853-865, 2014. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2013.813094>
- [15] S. H. Jacobson, E. C. Sewell, R. Deuson and B. G. Weniger, An integer programming model for vaccine procurement and delivery for childhood immunization: A pilot study. Health Care Management Science, 2(1): 1-9, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1019011106198>
- [16] S. Hovav and D. Tsadikovitch, A network flow model for inventory management and distribution of influenza vaccines through a healthcare supply chain. Operations Research for Health Care, 5: 49-62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2015.05.003>
- [17] H. K. Smalley, P. Keskinocak, J. Swann and A. Hinman, Optimized oral cholera vaccine distribution strategies to minimize disease incidence: A mixed integer programming model and analysis of a Bangladesh scenario. Vaccine, 33(46): 6218-6223, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.09.088>
- [18] A. Saif, and S. Elhedhli, Cold supply chain design with environmental considerations: A simulation-optimization approach. European Journal of Operational Research, 251(1): 274-287, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.10.056>
- [19] S. Hovav and A. Herbon, Prioritizing high-risk subgroups in a multi-manufacturer vaccine distribution program. The International Journal of Logistics Management, 28(2): 311-331, 2017. <https://doi.org/10.1108/IJLM-12-2015-0227>
- [20] M. I. D. Carvalho, D. Ribeiro and A. P. Barbosa-Povoa, Design and planning of sustainable vaccine supply chain. Pharmaceutical Supply Chains- Medicines Shortages, Springer, 2019. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15398-4_2
- [21] J. Lim, B. A. Norman and J. Rajgopal, Redesign of vaccine distribution networks. International Transactions in Operational Research, 29(1): 200-225, 2019. <https://doi.org/10.1111/itor.12758>
- [22] S. J. Sadjadi, Z. Ziaei and M. S. Pishvae, The design of the vaccine supply network under uncertain condition: A robust mathematical programming

- approach. *Journal of Modelling Management*, 841-871, 2019. <https://doi.org/10.1108/JM2-07-2018-0093>
- [23] B. Abbasi, M. Fadaki, O. Kokshagina, N. Saeed and P Chhetri, Modeling vaccine allocations in the COVID-19 pandemic: A case study in Australia, 2020. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3744520>
- [24] S. Enayati and O. Y. Özalın, Optimal influenza vaccine distribution with equity. *European Journal Operational Research*, 283(2): 714-725, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.025>
- [25] Y. Yang, H. Bidkhorı and J. Rajgopal, Optimizing vaccine distribution networks in low and middle-income countries. *Omega*, 99, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102197>
- [26] A. G. Qasem, A. Shamsan and F. Aqlan, Optimal Cholera Vaccine Allocation Policies in Developing Countries: A Case Study. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Detroit, Michigan, USA, pp. 2279-2287, 2020.
- [27] M. Alizadeh, M. M. Paydar, S. M. Hosseini, and A. Makui, Influenza vaccine supply chain network design during the COVID-19 pandemic considering dynamical demand, *Scientia Iranica*, 2021. <https://doi.org/10.24200/sci.2021.58365.5694>
- [28] G. P. Georgiadis and M. C. Georgiadis, Optimal planning of the COVID-19 vaccine supply chain. *Vaccine*, 39(37): 5302-5312, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.07.068>
- [29] M. Rastegar, M. Tavana, A. Meraj and H. Mina, An inventory-location optimization model for equitable influenza vaccine distribution in developing countries during the COVID-19 pandemic. *Vaccine*, 495-504, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.12.022>
- [30] M. Tavana, K. Govindan, A. K. Nasr, M. S. Heidary and H. Mina, A mathematical programming approach for equitable COVID-19 vaccine distribution in developing countries. *Annals of Operations Research*, 1-34, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04130-z>
- [31] H. Gilani and H. Sahebi, A data-driven robust optimization model by cutting hyperplanes on vaccine access uncertainty in COVID-19 vaccine supply chain. *Omega*, 110: 1-21, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102637>
- [32] B. Balcık, E. Yucesoy, B. Akca, S.Karakaya, A. A.Gevsek, H. Baharmand and F. Sgarbossa, A mathematical model for equitable in-country COVID-19 vaccine allocation. *International Journal of Production Research*, 1-25, 2022. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2110014>
- [33] V. Khodae, V. Kayvanfar and A. Haji, A humanitarian cold supply chain distribution model with equity consideration: The case of COVID-19 vaccine distribution in the European union. *Decision Analytics Journal*, 4, 100126. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100126>
- [34] Z. Azadi, S. D. Eksioğlu and H. N. Geismar, Optimization of Distribution Network Configuration for Pediatric Vaccines using Chance Constraint Programming, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.05488>
- [35] World Health Organization, 1998, Safe vaccine handling, cold chain and immunizations: A manual for the Newly Independent States. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/64776>
- [36] S. Guichard, K. Hymbaugh, B. Burkholder, S. Diorditsa, C. Navarro, S. Ahmed and M. Rahman, Vaccine wastage in Bangladesh. *Vaccine*, 28(3): 858-863, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2009.08.035>





Sürdürülebilir yeşil bir kalkınma için salınan karbonun yakalanması, depolanması ve kullanımına yönelik bir araştırma

A research on capture, storage and utilization of released carbon for a sustainable green development

Sena Kumcu^{1,*} , Bahar Özyörük² 

^{1,2} Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara Türkiye

Öz

Günümüzde küresel ısınma çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bunda başta fosil yakıtlı enerji santralleri olmak üzere, demir-çelik sanayisi, ağır sanayi gibi pek çok sektörün payı büyüktür. Dolayısıyla, küresel ısınma probleminin asıl unsurları olan bu sektörlerin temiz enerji üretimine geçişi çok önemlidir. Bu sebeple, karbonsuzlaşma sürecinin başarıyla tamamlanabilmesi ve sürdürülebilir, rekabetçi bir kalkınmanın sağlanabilmesi için çeşitli teknolojiler ve yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler arasında yer alan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojisi (CCUS- carbon capture, utilization and storage technology) karbon emisyonunu azaltma konusunda yakın ve orta vadede kesin ve hızlı bir şekilde karbonsuzlaşmayı sağlayacak bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada ise ülkemizin Avrupa 2050 net sıfır emisyon hedefine ulaşmasını sağlamak için bu teknoloji ele alınmıştır. Bu doğrultuda optimum CCUS tedarik zinciri ağı tasarımı üzerine detaylı bir literatür araştırması yapılmış ve literatürde yer alan boşluklar tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda ülkemizde bir CCUS tedarik zinciri ağının bütünlük bir şekilde ele alınabilmesi için öneriler sunulmuştur. Bu çalışmanın gelecekte yapılan çalışmalar için araştırmacılara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS), Karbon emisyonu azaltma, Karbonsuzlaşma teknolojileri

1 Giriş

Günümüzde karbon emisyonunun çevreye verdiği zararlar çok ciddi boyutlara ulaşmıştır. Bu sebeple büyük oranda karbon emisyonuna sebep olan enerji, ağır sanayi ve ulaştırma sektörleri gibi sektörlerin temiz enerji üretimine geçişleri çok önemlidir. Bu sektörlerin karbonsuzlaşma süreçlerinin başarıyla tamamlanabilmesi ve sürdürülebilir, rekabetçi bir kalkınmanın sağlanabilmesi için çeşitli teknolojilerin ve yaklaşımların geliştirilmesi gerekmektedir. Bu teknolojiler arasında günümüzde trend olarak; nükleer enerji, değişken yenilenebilir enerji (VRE-variable

Abstract

Today, global warming has reached very serious dimensions. Many sectors such as fossil fuel power plants, iron and steel industry and heavy industry have a great share in this. Therefore, the transition of these sectors, which are the main elements of the global warming problem, to clean energy production is very important. For this reason, various technologies and approaches need to be developed in order to successfully complete the decarbonization process and ensure sustainable, competitive development. Among these technologies, carbon capture, utilization and storage technology (CCUS) is a technology that will ensure decarbonization in the near and medium term in order to reduce carbon emissions. In this study, this technology was discussed to ensure that our country reaches the 2053 green development goal. Accordingly, a detailed literature search on the design of the optimum CCUS supply chain network was conducted and gaps in the literature were identified. As a result of the analyzes, suggestions were presented for an integrated handling of a CCUS supply chain network in our country. It is thought that this study will shed light on researchers for future studies.

Keyword: Carbon capture, utilization and storage (CCUS), Carbon emission reduction, Decarbonization technologies

renewable energy) kaynakları ve karbon yakalama ve depolama (CCS- carbon capture and storage) gibi CO₂ gazı salınımını azaltılmasına yönelik geliştirilen teknolojiler karşımıza çıkmaktadır [1]. İklim değişikliği konusu öne çıkmaya başladığından beri hükümetlerin yatırımlarını iyileştirmesi ve net sıfır emisyonuna yönelik politikaların gelişmesiyle birlikte bu teknolojiler yükselen bir trend yakalamışlardır. Bu teknolojiler arasında CCS teknolojisi ise yakın ve orta vadede net sıfır emisyonlu enerjiye geçmek için kullanılan bir köprü teknolojisi olarak görülmektedir [2] Ancak bu teknoloji maliyetli bir teknolojidir ve yapılan

* Sorumlu yazar / Corresponding author: , e-posta / e-mail: senakumcu@gazi.edu.tr (S. Kumcu)

Geliş / Received: 20.07.2022 Kabul / Accepted: 04.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1145904

çalışmalarda depolanan karbonun bir kısmının kullanılmak üzere dönüştürülmesi ile CCS maliyetlerinin düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Yakalanan karbonun başka bir kullanım amacıyla dönüştürülmesi teknolojilerine ise karbon yakalama kullanma ve depolama teknolojileri (CCUS) adı verilmektedir.

Bu çalışmada; CCUS teknolojileri ile ilgili literatürde optimizasyon tekniklerini kullanan çalışmalar incelenmiş ve ülkemizde bütünlük bir model geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Önerilen bu modelin geliştirilmesiyle gelecekte ülkemiz için sadece bir bölgede sınırlı kalmayıp birçok bölge açısından karbon emisyonuna sahip olan kaynaklarının değerlendirildiği kapsamlı bir çalışmanın gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda karbon emisyonunu azaltma teknolojilerinden biri olan karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerine ülkemizde yatırım yapılması için bir yol haritası ortaya konması hedeflenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde, küresel iklim politikaları ve karbon emisyonunu azaltma teknolojileri incelenmiştir, üçüncü bölümde karbon yakalama ve depolama teknolojilerine ait literatür çalışmaları sunulmuştur, dördüncü bölümde kapsamlı bir model geliştirme önerileri verilmiştir ve beşinci bölümde sonuç bölümü yer almaktadır.

2 Türkiye'nin sera gazı emisyonu kaynakları

Küresel ısınma, dünyanın karşı karşıya olduğu en zor ve en önemli problemlerden biridir. Bugüne kadar küresel ısınma problemini çözme yolunda atılan ilk adım ilk adım Kyoto Protokolüdür. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi adı altında oluşturulan Kyoto Protokolü, 1997'de imzalanmasına rağmen 16 Şubat 2005 tarihinde yürürlüğe girebilmiştir [3]. Daha sonra Kyoto Protokolünün genişletilmesiyle 2016 yılında Paris İklim Anlaşması ile günümüzde küresel iklim politikaları son halini almıştır. Paris Anlaşması'nın uzun vadeli hedefi, ortalama küresel sıcaklık artışını sanayi öncesi seviyelerden 2 °C (3.6 °F) artış seviyesi ile sınırlı tutmaktır ve 1.5 °C indirilmesi için çaba harcanmasıdır. Çünkü sıcaklık artışını 2 °C yerine 1.5 ile sınırlanması iklim değişikliği risk ve etkilerini önemli ölçüde azaltacağı kabul edilmektedir [4]. Bu stratejiye önemli ölçüde katkı sağlamak amacıyla 11 Aralık 2019 yılında Avrupa Birliği (AB), "Avrupa Yeşil Mutabakatı" belgesini yayınlamıştır [5]. Bu belge ile karbon emisyonlarının mümkün olan en kısa sürede azaltılması ve 2050 yılına kadar sıfır karbon emisyonu hedeflenmektedir. Bu hedef petrol, kömür gibi fosil yakıt kullanımını azaltarak, karbon emisyonunu azaltma teknolojilerine yönelmeyi de beraberinde getirmektedir. Aynı zamanda ülkelerin sera gazı salınımlarını azaltmak için kullanılan araçlardan bir tanesi de etkin bir karbon fiyatlandırma mekanizmasının uygulanmasıdır. Karbon fiyatlandırma yöntemleri olarak iki ana karbon fiyatlandırma yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; emisyon ticaret sistemi (ETS) ve karbon vergisidir [5]. ETS, toplam sera gazı emisyonu seviyesini sınırlayarak düşük emisyonlu endüstrilerin ekstra tahsisatlarını daha büyük emisyonlara satmasına izin veren bir yöntemdir. Karbon vergisi ise sera gazı emisyonları veya daha yaygın olarak fosil yakıtların karbon içeriği üzerinde bir vergi oranı

tanımlayarak doğrudan karbon fiyatı belirlenmesine dayalı bir yöntemdir. Karbon vergisi, karbon fiyatının önceden tanımlanmış olması bakımından ETS'den farklı bir yöntemdir [6].

6 Ekim 2021 tarihinde Paris Anlaşmasını onaylamasıyla birlikte Türkiye için iklim değişikliği ile mücadelesinde hedef ve politikalarını yeniden belirleyeceği bir dönem başlamıştır. Gelişen ekonomisi ile dünyanın önemli enerji tüketicileri arasında yer alan Türkiye'nin 2019 sera gazı envanteri sonuçlarına bakıldığında ise, toplam sera gazı emisyonu bir önceki yıla göre %3.1 azalmış ve 506.1 milyon ton (Mt) CO₂ eşdeğeri (eşd.) olarak hesaplanmıştır. Türkiye'nin 1990-2019 yılları arasındaki sera gazı emisyon istatistikleri Şekil 1'de yer almaktadır [7]. Ayrıca TÜİK'in açıklamış olduğu 1990-2019 verilerine göre Türkiye'nin neden olduğu sera gazı emisyonlarında en büyük payın %72 ile enerji kaynaklı emisyonlara ait olduğu tespit edilmiştir. Enerji kaynaklı emisyonları sırasıyla %13.4 ile tarımsal faaliyetler, %11.2 ile endüstriyel işlemler ve ürün kullanımı ve %3.4 ile atık sektörü takip etmektedir.



Şekil 1. Türkiye'nin 1990-2019 arasındaki sera gazı emisyon istatistikleri [7].

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının 2020 yılında son açıkladığı verilere göre toplam birincil enerji arzı 147.2 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) olarak gerçekleşmiş olup 2019 yılındaki 144.2 milyon TEP'lik değere göre %2.05 oranında artmıştır. Bir önceki yıla göre katı yakıt arzı %3.1 oranında azalarak 40.6 milyon TEP, petrol arzı %2.2 oranında artarak 42.2 milyon TEP, doğal gaz arzı %7.2 oranında artarak 39.8 milyon TEP ve yenilenebilir enerji arzı %2.8 oranında artarak 24.6 milyon TEP düzeyinde gerçekleşmiştir. Yenilenebilir kaynaklar bazında incelendiğinde; bir önceki yıla göre rüzgâr %14.3, güneş %10.0, jeotermal %9.6, biyoenerji ve atıklar %7.6 oranında artış göstermiştir [8]. Türkiye son 10 yılda elektrik, kömür, petrol ve doğal gaz talep artış oranları bakımından ise Avrupa'da ilk sırayı almaktadır [9]. Türkiye'nin 2020 yılı itibarıyla, toplam elektrik üretiminin %34.8'i kömürden, %25.6'sı hidrolik kaynaklardan, %22.6'sı doğalgazdan, %8.1'i rüzgardan, %3.6'sı güneşten, %3.3'ü jeotermalden, %1.68'i biyoyakıtlardan ve atık ısıdan ve %0.2'si sıvı yakıtlardan karşılanmıştır. EPDK verilerine göre Ocak-2021 itibarıyla projesi inşa halinde devam eden santrallerden yakın ve orta vadede devreye girmesi planlanan kurulu güç kapasitesinin %29.6'sının kömür santrallerine ait olduğu

tespit edilmiştir. Ardından nükleer (%24.8), doğalgaz (%14.2), hidrolik (%8.7), rüzgar (%13.1) ile güneş (%6.5) santralleri gelmektedir [10].

Türkiye'nin ilk defa Paris Anlaşması'nı onaylayarak katıldığı 12 Kasım 2021 tarihinde 26.sı düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (BMİDK)'nda, Paris Antlaşmasından sonra geçen 6 yılda yaşanan en yüksek sıcakların olduğu ve küresel ısınmanın 1.5 derece sınırlandırma hedefi için somut eylemlere geçilmesi gerektiği konuşulmuştur. Konferansta alınan kararlar incelendiğinde iklim değişikliğine daha çok sebep olan fosil kaynakların sera gazı salınımının etkilerini bertaraf etme yönünde olduğu görülmüş ve bu doğrultuda karbon emisyonu azaltma faaliyetlerinin artarak devam etmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [11].

Türkiye açısından konferansta alınan kararları eyleme geçirme adına durumun daha ciddi olduğu düşünülmektedir. Dünyada sera gazı salınımında 16.sırada olan Türkiye fosil enerji kaynaklarından yakın vadede vazgeçecek gibi gözükmemektedir. Hali hazırda kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıt ile çalışan termik santral inşaatları devam etmektedir. Bu sebeple sera gazı salınımında en çok payı olan enerji sektöründeki karbon salınımını azaltma yollarını benimsemeye Avrupa Birliği'nin 2050 karbonsuzlaşma hedefine de ulaşamayacağı düşünülmektedir.

Tarihte ilk kez Covid 19 pandemisinden dolayı 2020 yılında kömürden elektrik üretimi %8 oranında düşmüştür. Ancak uzun dönem için kömürden elektrik üretimi ile ilgili projeksiyonlar; CO_2 emisyonlarını kabul edilebilir sınırlara çekebilecek karbon tutma, kullanma ve depolama yöntemlerinde (CCUS) sağlanabilecek önemli ilerlemelere, devreden çıkarılacak verimsiz kömür santrallerine, kömür ve doğal gaz fiyatlarının değişimine, hava kalitesini artırmaya dolayısıyla sera gazı emisyonlarını azaltmaya veya sınırlamaya yönelik yeni ulusal politikaların veya uluslararası anlaşmaların yürürlüğe girmesine, kömür dışı kaynak kullanan diğer santrallerle yaşayacağı zorlu rekabet ve finansman koşullarına ve sabit karbon vergisi gibi doğrudan maliyet artırıcı uygulamalara, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelen ulusal politikalara göre önemli ölçüde değişebilecektir [12].

Karbon salınımını azaltma konusunda günümüzde yükselen bir trend olarak karşımıza çıkan CCUS teknolojileri bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1 Karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS)

Kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtlar kullanımı global boyutta hızla artmaktadır. Özellikle fosil yakıt kullanan enerji santralleri atmosfere yoğun şekilde sera gazı emisyonu salınımı yapmaktadır. Bunun önüne geçebilmek ve 2050 karbon nötr hedefine ulaşmak doğrultusunda yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojilerden birisi de karbon yakalama ve depolama (carbon capture and storage) (CCS) teknolojileridir. Ancak bu teknoloji maliyetli bir teknolojidir, ancak yapılan çalışmalarda depolanan karbonun bir kısmının kullanılmak üzere dönüştürülmesi ile CCS teknoloji maliyetlerinin düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Yakalanan karbonun başka bir kullanım amacıyla

dönüştürülmesi teknolojisine karbon yakalama kullanma ve depolama teknolojileri (CCUS) adı verilmektedir.

Şu anda küresel olarak faaliyette olan yaklaşık 35 ticari CCUS tesisi bulunmaktadır ve yıllık toplam yakalama kapasitesi neredeyse 45 Mt CO_2 'dir. Bu projelerin yaklaşık üçte ikisi Kuzey Amerika'da yoğunlaşmış olsa da, ticari CCUS tesisleri şu anda 25'ten fazla ülkede geliştirilmektedir [13-14]. Son birkaç yılda CCUS teknolojileri daha güçlü iklim hedefleri ve finansal teşvikler sayesinde yeni bir ivme kazanmıştır. Fakat, Dünya'yı endüstri öncesi dönemdeki seviyeye göre 1.5 C° fazla ısıtan karbon yayılımını engelleyebilmek için bu projelerden daha fazlasına ihtiyaç olduğu bilinmektedir [15]. Uluslararası Enerji Ajansı raporunda CCUS projelerinin, karbondioksit yayılımını neredeyse beşte bir oranında; iklim krizi ile mücadeledeki maliyeti ise %70 oranında azaltabileceği belirtilmiştir. CCUS'in gerekli olmasının en önemli nedenlerinden biri, ağır sanayinin; yani gübre üreticileri, çelik fabrikaları ve çimento üreticilerinin daha temiz enerjiyle çalışmaya uyum sağlamasının zor ve pahalı olmasıdır [12]. Bu projeler arasında ise ülkemiz henüz yer almamaktadır. Bu doğrultuda çeşitli kamu kurum ve kuruluşları tarafından proje önerileri yürütülmektedir.

CCUS teknolojilerinin optimize edilmesi için şu kararların doğru bir şekilde verilmesi gerekmektedir; (1) ne kadar CO_2 yakalanacak? (2) hangi kaynaklardan yakalanacak? (3) CO_2 yakalamak için hangi teknoloji kullanılacak? (4) boru hatları nereye inşa edilecek? (5) CO_2 taşıyan boru hattının çapı ne olmalı? (6) hangi rezervuarlarda CO_2 depolanacak? (7) rezervuarlara ne kadar CO_2 enjekte edilecek? (8) kaynak ve rezervuar arasındaki dağıtım ağı nasıl olmalıdır? (9) yakalanan CO_2 hangi kullanım alanlarında değerlendirilebilir? [16]. CCUS teknolojileri için önemli bir role sahip olan bu kararlardan; karbondioksit yakalama seçenekleri, taşıma seçenekleri, depolama alanları ve kullanım alanları detaylı bir şekilde aşağıda ele alınmıştır.

2.1.1 Karbondioksit yakalama seçenekleri

CO_2 yakalamanın üç farklı seçeneği vardır. Bu yöntemler aşağıda belirtilmiştir [17];

1. Yanma sonrası yakalama: yanmadan sonra baca gazı akışından CO_2 yakalanması,
2. Yanma öncesi yakalama: yanmadan önce gazlaştırma veya reforming gibi kimyasal yöntemlerden sonra gaz karışımının elde edilmesi (CO_2 ve hidrojen gazı karışımı) ve sonra bu karışımdan CO_2 'nin yakalanması;
3. Oksiyakıt ile yakalama: yakıtı yakmak için (neredeyse) saf oksijen kullanılması

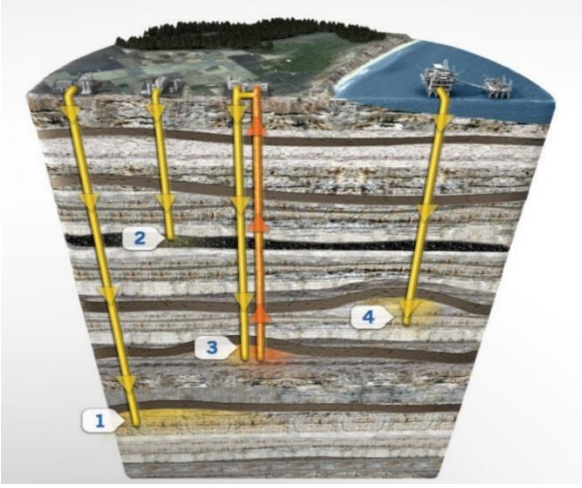
2.1.2 Karbondioksit taşıma seçenekleri

Başlıca karbondioksit taşıma seçenekleri aşağıda verilmiştir [18];

1. Boru hattı ile taşıma
2. Gemi tankerleri ile taşıma
3. Kara tankerleri ya da trenler ile taşıma seçenekleri bulunmaktadır.

2.1.3 Karbondioksit depolama alanları

Karbondioksitin tutulması için birkaç alternatif metot bulunmaktadır. Bunlar; (1) yer altı tuzlu oluşumlarında, (2) kömür çıkarılmayan yer altı kömür ocaklarında, (3) petrol sahalarından petrol üretimini arttırılmasında (EOR) ve (4) tükenmiş petrol ve doğal gaz sahalarında jeolojik depolama alternatifleri bulunmaktadır. Şekil 2’de bu numaralandırılan sırada karbondioksit depolama alternatifleri gösterilmektedir [19]:



Şekil 2. Karbondioksit depolama alanları [19].

2.1.4 Karbondioksitin kullanım alanları

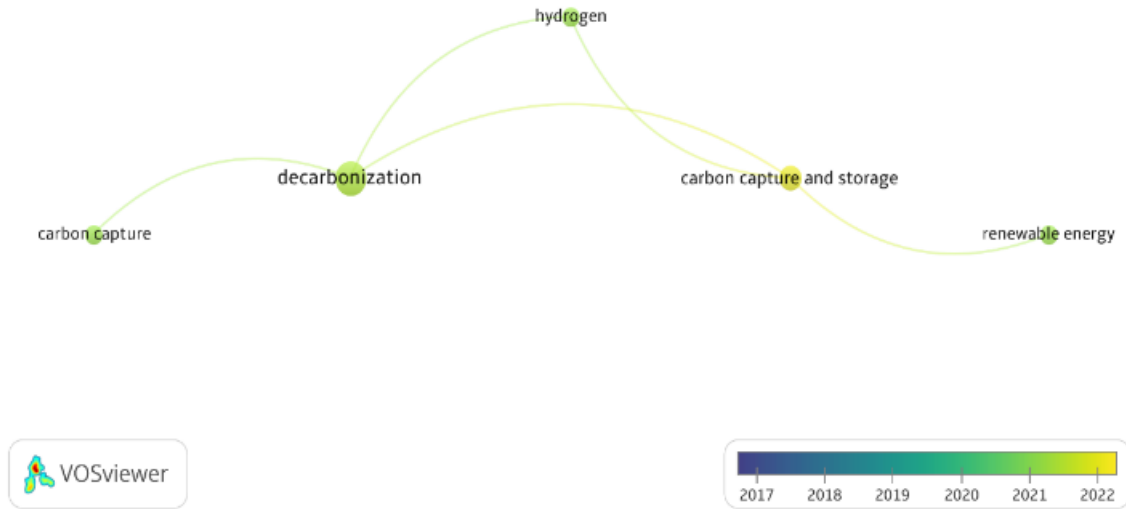
CCS ile yakalanmış, konsantre CO_2 'nin herhangi bir değer katan yeniden kullanılması ile CCUS kavramı ortaya çıkmıştır. CO_2 'in yeniden kullanılmasına olanak sağlayan bu teknolojiler finansal, çevresel, sosyal ve daha birçok alanda fayda sağladığı tespit edilmiştir. CCUS teknolojisiyle yakalanan karbondioksitin kullanım alanları aşağıda verilmiştir; arttırılmış petrol geri kazanımı (EOR), diğer petrol ve doğal gaz endüstrisi uygulamalarında, gıda işleme,

muhafaza ve paketlenme, kahve kafeinsizleştirme, selüloz ve kağıt işleme, çelik imalatı, kömür yataklarında metan gazının üretiminde, kimya endüstrisinde metanol ve üretilmesinde, yangın tüplerinde ve yangın söndürme sistemlerinde, dondurulmuş gıda meyve ve sebze stoklanması ve muhafazasında, madenlerde patlayıcı maddelerin soğutulmasında, tehlikeli sıvıların transferinde ve daha birçok uygulama alanında kullanıldığı bilinmektedir [20].

3 Materyal

3.1 Bibliyometrik analiz

14.11.2022 tarihinde SCOPUS veritabanında “Decarbonization Technologies” kelimesiyle arama yapılmış ve bu anahtar kelimenin özet, başlık ve anahtar kelimelerde taratılması sonucunda 1999 yılından günümüze kadar 61 adet çalışma tespit edilmiştir. Gelecekte yapılacak çalışmalara yön verebilmek adına, karbon emisyonunu azaltma teknolojileri hakkında daha detaylı bilgi elde etmek için elde edilen eserlerin bibliyometrik analizi Vosviewer (1.6.17) programı aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bibliyometrik analizde sık kullanılan bir yöntem olan bilimsel haritalama tekniği kullanılmış ve Vosviewer (1.6.17) programı aracılığıyla görselleştirilmiştir. Günümüzde bu alandaki trendleri belirlemek ve gelecekte yapılacak çalışmalara yön verebilmek amacıyla bu çalışmanın konusuna uygun olarak yayınlanmış eserlerde en sık birlikte kullanılan anahtar kelimeler belirlenmiştir. Vosviewer (1.6.17) programında yapılan ortak kelime analizi ile bir eserde en az 3 kez birlikte kullanılma sıklığı dikkate alınmış ve birbirleriyle bağlantısı olan 5 kelimenin olduğu tespit edilmiştir. En sık birlikte kullanılan kelimelerin günümüzdeki trendlerini belirlemek için yıllara göre ortak kelime analizi gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Yıllara göre ortak kelime analizi

Şekil 3'te de görüldüğü gibi, 2017'den günümüze doğru yapılan çalışmalarda en sık birlikte kullanılan kelimelerin ağ yapısı çıkarılmıştır. Bu analize göre 2017'den günümüze kadar olan çalışmalarda karbon emisyonunu azaltma konusunda "yenilenebilir enerji kaynakları", "karbon yakalama", karbon yakalama ve depolama" ve "hidrojen" kelimelerinin en sık kullanılan kelimeler olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlarla iklim değişikliğini azaltma konusunda günümüzde trend olan bu teknolojilere yapılan yatırımların artması için bu konularda daha çok çalışmanın yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu teknolojiler arasında yer alan karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin yüksek maliyetli olması bu alanda çeşitli zorluklar doğurmuştur. Bu kapsamda bu zorlukların üstesinden gelecek CCS sistemlerinin tasarımını optimize edecek yöntemlerin geliştirilmesi çok önemlidir [2].

Bu çalışmada da günümüzde karbon emisyonunu azaltma konusunda gelişmekte olan teknolojilerden biri olan karbon yakalama ve depolama (CCS) ya da karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS) konusunda yapılan optimizasyon çalışmaları bir sonraki bölümde incelenmiştir.

3.2 Karbon yakalama teknolojilerinde optimizasyon tekniklerini kullanan çalışmalar

CCS ve CCUS tedarik zinciri tasarımı malzeme, süreç ve farklı tedarik zinciri düzeylerindeki etkileşime dayanan karmaşık sistemlerdir. Bu sistemlerin karmaşıklığı sebebiyle yaşanan zorlukların üstesinden gelecek optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda bu çalışmada literatürde yer alan CCS ve CCUS tedarik zincirinde optimizasyon modellerini ele alan çalışmalar incelenmiş ve literatürdeki boşluklar tespit edilmiştir.

14.11.2022 tarihinde SCOPUS ve WOS veritabanında "carbon capture" OR "carbon capture and storage" OR "carbon capture utilization and storage" OR "carbon capture utilization" AND "optimization" AND "supply chain" anahtar kelimesi özet, başlık ve anahtar kelimelerde taratılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre hem araştırma konusu ile hem de Endüstri Mühendisliği ile ilgili olan 2009'dan günümüze kadar toplam 25 adet çalışma tespit edilmiştir. Bu eserlerin genel olarak toplam maliyetleri en aza indiren ve karbondioksit emisyonlarını önemli ölçüde azaltan optimal tedarik zincirlerini tasarlamak üzere ele alındığı görülmüştür. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Middleton ve Bielicki [16] çalışmalarında, CCS için nerede ve ne kadar CO_2 yakalanıp depolanacağını ve maliyetleri en aza indirmek için farklı boyutlarda boru hatlarının nereye kurulacağını belirleyen kapsamlı bir CCS altyapı modelini karma tamsayılı doğrusal program (MILP) ile geliştirmişlerdir.

Markewitz vd. [21] çalışmalarında, CCS için nerede ve ne kadar CO_2 yakalanıp depolanacağını ve maliyetleri en aza indirmek için farklı boyutlarda boru hatlarının nereye kurulacağını belirleyen kapsamlı bir CCS altyapı modelini karma tamsayılı doğrusal program (MILP) ile geliştirmişlerdir.

Han vd. [22] yayınladıkları makalelerinde, enerji altyapısı için ekonomik durum ve çevresel zorlukları ele

almak için bir iki aşamalı bir tasarım stratejisi önermişlerdir. Bunlardan biri, karbon yakalama ve depolama tesislerini kurmak (CCS), diğeri ise yenilenebilir enerji sistemlerinin girişini hızlandırmaktır. Entegre enerji altyapı sistemi Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) problemi olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmalarıyla Kore'de CCS kurulmasıyla yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak hidrojen enerji altyapısının sistematik tasarımının karşılaştırılmasını yapmışlardır.

Huang vd. [23] yaptıkları çalışmalarında, optimizasyon modelleri ve algoritmaları kullanarak karbon yakalama ve depolamanın teknik gelişmelerine ve ekonomik analizine odaklanmışlardır. Çalışmalarında karbon yakalama ve depolamanın üç ana bileşenini ele almışlardır. Bunlar: karbon yakalama, karbondioksit taşıma ve karbon tutma. Ek olarak, karbondioksit azaltma gerekliliklerini yerine getirmek için, enerji genişleme planlamasını, CO_2 ağ tasarımı ve CO_2 depolama problemlerini çözen matematiksel programlama modellerini tartışmışlardır. Sonuç olarak karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin teknik ve ekonomik analiz ile birleştirilmesiyle, olası düşük karbonlu enerji ekonomisinin sürdürülebilir açıdan gelişme sağlayacağını savunmuşlardır.

Lee vd. [24] çalışmalarında enerji santrallerini güçlendirmek için karbon yakalama ve depolama teknolojisini ele almışlardır. Bu amaçla karbon yakalama ve depolama planlaması için karmaşık tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model hem şebeke gücü etkilerini hem de CO_2 kaynak-depo eşleşmesini dikkate almaktadır.

Lee vd. [25] çalışmalarında karbon yakalama ve depolama (CCS) ağının tasarımı ve işletilmesi iki aşamalı stokastik bir karar verme algoritması sunmuşlardır. Bu algoritmayı çok amaçlı karma tamsayılı programlama modelini kullanarak ele almışlardır. Bu önerilen algoritma ile CCS altyapısının en uygun planı ve değerlendirme yöntemini sağlamak için, yıllık maliyeti, çevresel etkiyi ve risk belirsizliğini en aza indirmek hedeflenmiştir.

Zhang vd. [26] makalelerinde, Çin'deki stratejik karbon yakalama kullanma ve depolama (CCUS) ağını optimize etmek için, emisyon kaynaklarının, yakalama teknolojilerinin, boru hattının, araç nakliye sisteminin, kullanma ve depolama lokasyonlarının dahil olduğu karışık tam sayılı doğrusal programlama önermişlerdir. Modelin amaç fonksiyonunda maliyetlerle birlikte CO_2 'in yeniden kullanım alanı olarak kullanılan geliştirilmiş petrol kazanımı (EOR)'ndan elde edilen gelirden hesaplanmıştır.

Kim vd. [27] çalışmalarında kritik koşullar altında optimal bir CCS boru hattının geliştirilmesi için boru hattı tasarımına etki eden belirsiz depolama kapasitesi ve politika koşulları gibi faktörlerin modele dahil edilmesiyle karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model geliştirmişlerdir.

d'Amore vd. [28] karbon yakalama, taşıma ve jeolojik depolama (hem karada hem de denizde) için bir Avrupa Tedarik Zinciri'nin ekonomik optimizasyonu için bir karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önermişlerdir. Yaptıkları bu çalışma, toplumsal (sosyal) risk

analizini ilk kez modelleme çerçevesine dahil eden ilk çalışmadır.

Jarvis ve Samsatli [29] karbon yakalama ve depolamaya ek olarak, hem doğrudan çalışan bir akışkan olarak hem de kimyasal dönüşüm süreçlerinde yakalanan CO_2 'nin iklim değişikliğini hafifletmek ve kaynak verimliliğini sağlamak için kilit bir strateji olarak kullanılmasına yönelik çabalara odaklanılması gerektiğini ve CO_2 'den değerli ürünlerin üretimini desteklemek için güçlü bir değer zinciri gerekli olduğunu çalışmalarında vurgulamışlardır. Bu amaçla çalışmalarında çeşitli CO_2 dönüştürme teknolojilerini ve temel kaynakların taşınması ve depolanması için gerekli olan teknolojileri karşılaştırıp sonuçları tartışmışlardır.

Pieri vd. [30] çalışmalarında daha önce teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir CCU değer zincirlerini optimize etmek ve geliştirmek için bütünsel bir yaklaşımın ele alınmadığına vurgu yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarıyla, CCU değer zincirlerinin simülasyonu veya optimizasyonuna odaklanan başlıca mevcut yöntemlerin, algoritmaların ve araçların eleştirel bir incelemesini gerçekleştirmişlerdir.

Ağralı vd. [31] çalışmalarında Türkiye'nin farklı bölgelerinde bulunan iki kömürlü termik santral ile ilgili verileri kullanarak karbon yakalama birimlerinin kapasitelerine, bunları kurmanın optimal olup olmadığına, yakalanan karbonun taşınması için kurulması gereken ulaşım ağına ve eğer varsa depolama alanlarının konumlarına karar veren bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Önerdikleri model, karbon yakalama ünitesinin kurulumu ve işletilmesi ve karbonun taşınması ile ilgili maliyetlerin toplamının net bugünkü değerini, karbon yakalama ve depolama (CCS) durumunda depolama maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca karbonun kullanılacağı (CCU) süreç olarak gelişmiş petrol geri dönüşümünü (EOR) seçmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, EOR pazarında yeterli talep olduğu sürece CCU'nun CCS'ye tercih edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bundan yola çıkarak Türkiye için CCU, ülke çapındaki karbon emisyonlarını çevresel ve ekonomik açıdan faydalı bir şekilde azaltmanın bir yolu olarak gündeme gelmesi gerektiğini söylemişlerdir.

Zhang vd. [32] makalelerinde, karbon vergisi belirsizliğini göz önünde bulundurarak, CO_2 azaltımı için beklenen toplam maliyeti en aza indirmek için önerilen iki seçenek arasındaki ilişkiyi araştırmak için iki aşamalı bir stokastik karışık tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli formüle etmişlerdir.

Leonzio vd. [33] çalışmalarında karbon yakalama, kullanım ve depolama tedarik zincirinin optimal tasarımı için matematiksel bir model geliştirildi. Karbondioksit, metan kuru reformasyonu yoluyla metanol üretmek için depolanabilir ve/veya kullanılabilir. Almanya'daki on ana karbondioksit emisyon kaynağı için karma tam sayılı doğrusal program modeli geliştirilmişlerdir.

Leonzio ve Zondervan [34] İtalya'nın bölgeleri için karbon yakalama, kullanım ve depolama tedarik zincirleri için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Model, karbondioksit emisyonlarına sahip on bölge için geliştirilen karbon sistemlerinin tasarımına

uygulanırken, depolama alanları olarak farklı tuzlu su akiferleri önerilmiştir. Karbondioksitin kullanım alanı olarak metan üretim alanı incelenmiştir. Sonuçlar, Adriyatik denizinin tedarik zincirindeki en uygun açık deniz depolama alanı olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, diğer depolama alanlarına kıyasla daha düşük net metan üretim maliyetini vermiştir.

Leonzio vd. [35] çalışmalarında, İtalya, Almanya ve Birleşik Krallık'taki Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (CCUS) tedarik zincirlerini optimize etmek için iki aşamalı bir stokastik karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelin amacı, karbondioksit bazlı bileşiklerin belirsizlikler altında toplam üretim maliyetlerini en aza indirmektir.

Huang vd. [36] Çin kömür kimyası endüstrisinde CO_2 emisyonlarını azaltmak ve ekonomik büyümeyi, enerji güvenliğini sağlamak için bu sektörde karbon emisyonunu azaltan teknolojilerin devreye alınmasının kısa (2020), orta (2030) ve uzun (2050) vadede değerlendirmesi için için doğrusal olmayan programlama önermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, sektörün karbon emisyonlarını azaltmak için karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerini kullanmasını tavsiye etmişlerdir.

Quarton ve Samsatli [37] çalışmalarında CCUS ve hidrojen teknolojilerinin enerji sistemi içindeki rolünün tüm sistem değerlendirmesini sağlayan, karbon dioksit ve hidrojen için entegre değer zincirlerini modellemeye ve optimize etmeye yönelik ilk çalışmayı gerçekleştirmişlerdir.

Zhang vd. [38] CCUS tedarik zincirinin optimizasyona dayalı ekonomik ve çevresel faktörlerin de ele alındığı bir çerçeve geliştirilmiştir. Çalışmada karbon yakalama ve ayırma alanlarının yeri ve ölçeğinin yanı sıra emisyon azaltma hedefini karşılayabilecek en verimli CO_2 taşıma rotalarını sağlamak için 20 yıllık bir zaman ufku boyunca tedarik zinciri probleminin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu problemi, hedefleri toplam yıllık maliyeti ve çevresel etkiyi en aza indirmeyi içeren çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) ile ele almışlardır. Elde edilen sonuçlar, ele alınan soruna ilişkin değerli bilgiler sağlamış ve karar vericiye CCUS'un yerleştirilmesinde daha sürdürülebilir alternatifleri benimsemesi için rehberlik etmiştir.

d'Amore vd. [39] yaptıkları bu çalışmada Avrupa çapında; minimum karbon yakalama, taşıma ve ayırma maliyetleri açısından en iyi tedarik zinciri ağ tasarımını ve teknoloji seçimini belirlemek amacıyla birçok faktörün ele alındığı senaryolar oluşturularak karışık tamsayılı doğrusal programlama ile bunlardan optimum senaryoyu belirlemişlerdir.

d'Amore vd. [40] Avrupa bağlamında karbon yakalama, taşıma, kullanım ve depolama tedarik zincirlerinin tasarımı için bir optimizasyon çerçevesi önermişlerdir. Yapılan bu çalışma ile Avrupa CO_2 emisyonunda önemli bir düşüş sağlamak için yapılacak olan stratejik analizlere metodolojik bir çerçeve sağlamak ve kapsamlı CCUS sistemlerinin dikkate değer bir coğrafi ölçekte optimum tasarımı hakkında öngörüler sağlanması amaçlanmıştır.

Niazvand vd. [41] çalışmalarında karbon yakalama kullanımını ve depolama (CCUS) teknolojisini ve bazı belirsiz

parametreleri (elektrik fiyatı ve rüzgar türbini çıkış gücü) aynı anda göz önünde bulunduran senaryo tabanlı bir değerlendirme stratejisi sunan bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modele dayalı olarak CCUS teknolojisinin kullanılmasıyla, tüm planlama ufukları için maliyet ve kirliliğin uygun şekilde azaltıldığı sonucuna varmışlardır.

Balaji ve Rabiei [42] yaptıkları çalışmalarında ABD'nin Kuzey-Orta bölgesindeki çeşitli potansiyel karbondioksit kaynak ve depoları arasındaki boru hattı rotalarını haritalamak ve optimize etmek için bir karma tamsayılı model önermişlerdir.

Bjerketvedt vd. [43] çalışmalarında Norveç endüstrilerinden karbon yakalama ve depolamayı mümkün kılmak için bir nakliye altyapısının zaman içindeki dağıtımını araştırmışlardır. Makalede taşıma zincirinin tasarımı ve genişletilmesine ve CO₂'nin nerede tutulduğu kararlarına odaklanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda çok önemli bir karma tamsayılı modeli geliştirmişlerdir. Model ile gerçekleştirilen nakliye portföyü optimizasyonu sayesinde ölçek ekonomisinin potansiyel faydaları ve çok duraklı seferlerin potansiyel faydaları analiz edilmiştir.

Becattini vd. [44] çalışmalarında karbon yakalama, taşıma ve depolama tedarik zincirlerinin optimal tasarımı için yeni bir optimizasyon çerçevesi sunmuşlardır. Geliştirdikleri modeli 25 yıllık bir zaman ufku boyunca farklı emisyon azaltma yollarına uyum sağlayan ve aynı zamanda tedarik zincirlerinin toplam maliyetlerini de en aza indiren çok amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal bir program olarak formüle etmişlerdir. Bu çalışmaları, literatürde yer alan CCUS tedarik zinciri ağının optimizasyonunda ekonomik ve çevresel düzenlemelerin birlikte ele alındığı az sayıda çalışmadan biri olmuştur.

Yapılan literatür araştırması ile son zamanlarda ülkelerin ihtiyaçları doğrultusunda karbon yakalama teknolojileri ile ilgili çalışmaların hız kazandığı görülmüştür. Ancak bu çalışmalar arasında CCUS tedarik zinciri ağını baştan uca bütünleşik olarak ekonomik ve çevresel hedeflerin aynı anda optimize edildiği çok amaçlı programlama modellerinin sınırlı sayıda olduğu görülmüştür.

4 Sonuç ve tartışma

Son yıllarda “küresel ısınma” ve “iklim değişikliği” kavramları Dünya gündemine oturmuş ve bunu önlemek için neler yapılabileceği düzenlenen tüm toplantılarda en tartışılan konulardan birisi haline gelmiştir. İskoçyanın Glasgow şehrinde 2021 yılında 26.sı düzenlenen iklim değişikliği konferansına Türkiye ilk defa Paris Antlaşmasını onaylayarak katılmıştır. Bu konferansta, Paris Antlaşmasından sonra geçen 6 yılda yaşanan en yüksek sıcakların olduğu ve küresel ısınmanın 1.5 derece sınırlandırma hedefi için somut eylemlere geçilmesi gerektiği konuşulmuştur. Bu kapsamda karbon emisyonunu azaltma konusunda çeşitli faaliyetler yürütülmektedir. Bu faaliyetler arasında, enerji üretiminde daha az karbondioksit çıkaran alternatiflere yönelmek, örneğin kömürden doğal gaz, yenilenebilir enerjiye geçmek veya nükleer enerjinin payını artırmak ya da karbon yakalanması ve depolanması gibi yöntemler karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada karbon yakalanması, kullanılması ve depolanması teknolojileri üzerinde durulmuştur. Bu teknolojide optimizasyon tekniklerini uygulayan çalışmaların günümüzde yeşil uygulama alanında yeni trend konular içerisinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada literatürde yer alan optimizasyon modellerinin incelenmesiyle, ülkemiz açısından birçok bölgesinin içine alındığı bütünleşik bir modelin geliştirilmesi için aşağıda sıralanan öneriler sunulmuştur;

- Ağralı vd. [31]'nin önerdikleri modele ilave edilebilecek, ülkemizdeki uygun karbondioksit depolama alternatifleri de düşünülmelidir. Örneğin Akdeniz ve Tuz gölünden sonra ülkemizin jeolojik açıdan Batman Batı Raman petrol sahası ve Siirt Dodan Sahası karbondioksit depolama alanları olarak uygun görülmüştür [45].
- Yakalama tesisinde kullanılan farklı teknolojiler araştırılarak uygun olan teknolojiler modele dahil edilebilir.
- Karbon taşınmasında farklı türde araçlar (boru hattı, tanker ya da deniz taşımacılığı gibi) modele entegre edilebilir.
- Karbon emisyon oranları yüksek olan farklı bölgedeki fosil yakıtlı termik santraller kaynak olarak modele dahil edilebilir.
- Karbondioksitin yeniden kullanıldığı alanlardan sadece petrol geri kazanımı alanında sınırlı kalınmayıp diğer kullanım alanları da araştırılıp modele dahil edilebilir.
- Lee vd. [25] ve d'Amore vd. [28]'nin geliştirdikleri optimizasyon modeline dahil ettikleri çevresel ve toplumsal risk faktörleri ile birlikte sürdürülebilirlik ve sosyo-ekonomik faktörler gibi çeşitli risk faktörleri belirlenip modele dahil edilebilir.

Bu öneriler doğrultusunda, ülkemizde karbon yakalama, kullanma ve depolama teknolojilerini kullanarak birçok bölgenin içine alındığı bütünleşik bir model geliştirilmesiyle birlikte ülkemizin sürdürülebilir yeşil kalkınmasına önemli ölçüde katkı sağlanacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] A. S. Brouwer, M. van den Broek, W. Zappa, W. C. Turkenburg, and A. Faaij, Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems, *Applied Energy*, 161, 48–74, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.090>
- [2] M. F. Hasan, M. S. Zantye, & M. K. Kazi, Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective, *Computers & Chemical Engineering*, 166, 1–26, 2022, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107925>
- [3] M. Wara, Measuring the clean development mechanism's performance and potential, *UCLA Law Review*, 55(6), 1759–1803, 2008.

- [4] UNFCCC., Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Erişim adresi: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [5] T.C. Ticaret Bakanlığı, Yeşil Mutabakat Eylem Planı, 2021.
- [6] The World Bank (2020). Pricing carbon. Erişim adresi: <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>
- [7] TÜİK, Sera Gazı Emisyon İstatistikleri-1990-2019, 2021. Erişim adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862>
- [8] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019 Yılı Ulusal Enerji Denge Tablosu, 2021.
- [9] BP, Statistical Review of World Energy – Electricity Section, 2020.
- [10] EÜAŞ, 2020 Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu, 2021.
- [11] UNFCCC., Draft Decision 1/CP.26. Draft COP Decision Proposed by the President, 2021.
- [12] International Energy Agency (IEA), World Energy Outlook 2020, 2020.
- [13] International Energy Agency (IEA), Legal and Regulatory Frameworks for CCUS, 2022a. Erişim Adresi: <https://www.iea.org/reports/legal-and-regulatory-frameworks-for-ccus>
- [14] International Energy Agency (IEA), Carbon Capture, Utilization and Storage, 2022b. Erişim Adresi: <https://www.iea.org/reports/carbon-capture-utilisation-and-storage-2>
- [15] J. Ambrose, What Is Carbon Capture, Usage And Storage – And Can It Trap, Emissions?, Theguardian, 2020. Erişim adresi: <https://www.theguardian.com/environment/2020/sep/24/what-is-carbon-capture-usage-and-storage-and-can-it-trap-emissions>
- [16] R. S. Middleton and J. M. Bielicki, A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS, Energy Policy, 37(3),1052–1060, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.049>.
- [17] R. T. J. Porter, M. Fairweather, C. Kolster, N. Mac Dowell, N. Shah, and R. M. Woolley, Cost and performance of some carbon capture technology options for producing different quality CO₂ product streams, International Journal of Greenhouse Gas Control, 57, 185–195, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.020>.
- [18] H. Lu, X. Ma, K. Huang, L. Fu, and M. Azimi, Carbon dioxide transport via pipelines: A systematic review, Journal of Cleaner Production, 266, 121994, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121994>.
- [19] Global CCS Institute., Accelerating the Uptake of CCS: Industrial Use of Captured Carbon Dioxide, Parsons Brickerhoff, New York, NY, USA, 2011.
- [20] Z. Zhang et al., Recent advances in carbon dioxide utilization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 125, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>.
- [21] P. Markewitz et al., Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂, Energy and Environmental Science, 5(6), 7281–7305, 2012. <https://doi.org/10.1039/C2EE03403D>.
- [22] J. H. Han, J. H. Ryu, and I. B. Lee, A preliminary infrastructure design to use fossil fuels with carbon capture and storage and renewable energy systems, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37(22), 17321–17335, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.117>
- [23] Y. Huang, S. Rebennack, and Q. P. Zheng, Techno-economic analysis and optimization models for carbon capture and storage: A survey, Energy Systems, 4(4), 315–353, 2013, <https://doi.org/10.1007/s12667-013-0086-0>.
- [24] J.-Y. Lee, R. R. Tan, and C.-L. Chen, A unified model for the deployment of carbon capture and storage, Applied Energy, 121, 140–148, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.080>.
- [25] S. Y. Lee, J. U. Lee, I. B. Lee, and J. Han, Design under uncertainty of carbon capture and storage infrastructure considering cost, environmental impact, and preference on risk, Applied Energy, 189, 725–738, 2017, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.12.066>.
- [26] S. Zhang, L. Liu, L. Zhang, Y. Zhuang, and J. Du, An optimization model for carbon capture utilization and storage supply chain: A case study in Northeastern China, Applied Energy, 231,194–206, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.09.129>.
- [27] C. Kim, K. Kim, J. Kim, U. Ahmed, and C. Han, Practical deployment of pipelines for the CCS network in critical conditions using MINLP modelling and optimization: A case study of South Korea, International Journal of Greenhouse Gas Control, 73, 79–94, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2018.03.024>.
- [28] F. d'Amore, P. Mocellin, C. Vianello, G. Maschio, and F. Bezzo, Economic optimisation of European supply chains for CO₂ capture, transport and sequestration, including societal risk analysis and risk mitigation measures, Applied Energy, 223, 401–415, 2018, <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.04.043>.
- [29] S. M. Jarvis and S. Samsatli, Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 85, 46–68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.007>.
- [30] T. Pieri, A. Nikitas, A. Castillo-Castillo, and A. Angelis-Dimakis, Holistic assessment of carbon capture and utilization value chains, Environments - MDPI, 5(10), 1–17, 2018. <https://doi.org/10.3390/environments5100108>.
- [31] S. Ağralı, F. G. Üçtuğ, and B. A. Türkmen, An optimization model for carbon capture & storage/utilization vs. carbon trading: A case study of

- fossil-fired power plants in Turkey, *Journal of Environmental Management*, 215, 305–315, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.054>.
- [32] S. Zhang, Y. Zhuang, L. Liu, L. Zhang, and J. Du, Risk management optimization framework for the optimal deployment of carbon capture and storage system under uncertainty, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 1-13, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109280>.
- [33] G. Leonzio, P. U. Foscolo, and E. Zondervan, An outlook towards 2030: Optimization and design of a CCUS supply chain in Germany, *Computers and Chemical Engineering*, 125, 499–513, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.04.001>
- [34] G. Leonzio and E. Zondervan, Analysis and optimization of carbon supply chains integrated to a power to gas process in Italy, *Journal of Cleaner Production*, 269, 1-18, 122172, 2020a, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122172>
- [35] G. Leonzio, P. U. Foscolo, and E. Zondervan, Optimization of CCUS supply chains for some european countries under the uncertainty, *Processes*, 8(8), 1-29,2020b, <https://doi.org/10.3390/pr8080960>
- [36] Y. Huang et al., Investigation and optimization analysis on deployment of China coal chemical industry under carbon emission constraints, *Applied Energy*, 254, 1-15, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113684>
- [37] C. J. Quarton and S. Samsatli, The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation, *Applied Energy*, 257, 1-23, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113936>
- [38] S. Zhang, Y. Zhuang, R. Tao, L. Liu, L. Zhang, and J. Du, Multi-objective optimization for the deployment of carbon capture utilization and storage supply chain considering economic and environmental performance, *Journal of Cleaner Production*, 270, 1-15, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122481>
- [39] F. d'Amore, M. C. Romano, and F. Bezzo, Carbon capture and storage from energy and industrial emission sources: A Europe-wide supply chain optimisation, *Journal of Cleaner Production*, 290, 1-17, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125202>
- [40] F. d'Amore, M. C. Romano, and F. Bezzo, Optimal design of European supply chains for carbon capture and storage from industrial emission sources including pipe and ship transport, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 109,1-16, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103372>
- [41] F. Niazvand, S. Kharrati, F. Khosravi, and A. Rastgou, Scenario-based assessment for optimal planning of multi-carrier hub-energy system under dual uncertainties and various scheduling by considering CCUS technology, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 1-18, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101300>
- [42] K. Balaji and M. Rabiei, Carbon dioxide pipeline route optimization for carbon capture, utilization, and storage: A case study for North-Central USA, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101900>
- [43] V. S. Bjerketvedt, A. Tomasgard, and S. Roussanaly, Deploying a shipping infrastructure to enable carbon capture and storage from Norwegian industries, *Journal of Cleaner Production*, 333, 1-15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129586>
- [44] V. Becattini, P. Gabrielli, C. Antonini, J. Campos, A. Acquilino, G. Sansavini, & M. Mazzotti, Carbon dioxide capture, transport and storage supply chains: Optimal economic and environmental performance of infrastructure rollout”, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 117, 1-18, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103635>
- [45] E. Okandan et al., Assessment of CO2 storage potential in turkey, modeling and a prefeasibility study for injection into an oil field, *Energy Procedia*, 4, 4849–4856, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.452>





Gıda kaynaklı protein ve biyoaktif peptit eldesi, saflaştırılması ve karakterizasyonunda kullanılan güncel yöntemler ve biyoinformatik yaklaşımlar

Current methods used in the production, purification and characterization of food-derived proteins and bioactive peptides and bioinformatics approaches

Canan Kartal^{1,*} , Bahar Bakar² , Burcu Kaplan Türköz³ , Semih Ötleş⁴ 

^{1,2,3,4} Ege Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye

Öz

Günümüzde, beslenme alışkanlıkları ile insan sağlığı arasındaki ilişkinin ortaya konulması özellikle gıda kaynaklı biyoaktif bileşenleri hedef alan çalışmaların giderek artmasına sebep olmaktadır. Gıda kaynaklı peptitler ise sahip oldukları potansiyel biyoaktivite ile araştırmacılar için oldukça önemli bir alan olarak ortaya çıkmıştır. Biyoaktif peptitler, birçok sağlık etkisine sahip olan spesifik amino asit dizileridir ve sindirim enzimleri, proteolitik enzimler veya fermantasyon sonucu gerçekleşen protein hidrolizi ile ortaya çıkmaktadır. Protein hidrolizatları ve peptitlerin elde edilmesinde geleneksel hidroliz metotlarının yanı sıra birçok yeni teknoloji kullanılmakta, saflaştırılması aşamasında ise yeni membran ve kromatografi yöntemlerinden faydalanılmaktadır. Biyoaktivitesi tespit edilen peptitlerin amino asit dizileri ise çeşitli kütle spektrometresi yöntemleri ile belirlenmektedir. Bununla beraber, biyoaktif peptit tahminlemesi, tanımlanması, amino asit dizisi belirlenmesi ve karakterizasyonu amacıyla çok sayıda biyoinformatik araç geliştirilmiştir. Mevcut derleme, gıda kaynaklı protein ve hidrolizat eldesi, peptit ayrıştırılması, saflaştırılması ve yapısal karakterizasyonu için kullanılmakta olan deneysel ve biyoinformatik yöntemlerin geniş bir literatür özeti sunmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: Protein, Biyoaktif peptit, Ekstraksiyon, Karakterizasyon, Biyoinformatik

1 Giriş

Proteinler, vücut içerisinde enerji ve amino asit kaynağı olarak görev alan ve vücudun gelişimi ile onarılmasında çok önemli bir rol oynayan makro besin öğeleridir. Gıda proteinleri bitkisel ve hayvansal kaynaklı olabildiği gibi özellikle proteince zengin gıda işleme atıkları ve yan ürünleri de yeni ve sürdürülebilir protein kaynakları olarak değerlendirilmektedir [1]. Proteinler, sahip oldukları besin değerinin yanı sıra, gıda matrisleri içerisinde gösterdikleri fonksiyonel özellikler sebebiyle (emülsiyon oluşumu, köpük oluşumu, jelleşme, viskozite, tekstür, aroma bağlama vb.) gıda işleme teknolojisi açısından da önem taşımaktadır [2]. Günümüzde, beslenme ve sağlık arasındaki karmaşık ilişki

Abstract

Nowadays, the revealing of the relationship between nutritional habits and human health causes an increase in the studies targeting especially food-derived bioactive components. Food-derived peptides, on the other hand, have emerged as a very important area for researchers with their potential bioactivity. Bioactive peptides are specific amino acid sequences that have many health effects, and they may occur as a result of protein hydrolysis with digestive enzymes, proteolytic enzymes or fermentation. In addition to traditional hydrolysis methods, many new technologies are used in the production of protein hydrolysates and peptides, and also in the purification phase, new membrane and chromatography methods are used. The amino acid sequences of the peptides whose bioactivity is detected, are determined by various mass spectrometry methods. In addition, many bioinformatics tools have been developed for the prediction, identification, determination of amino acid sequence and characterization of bioactive peptides. This review aims to present a broad literature review of experimental and bioinformatics methods for the obtaining of food-derived protein and hydrolysate, peptide separation, purification and structural characterization.

Keywords: Protein, Bioactive peptide, Extraction, Characterization, Bioinformatics

bir gerçek olarak artık bilinmektedir ve gıda bileşenlerine sadece metabolik aktiviteler için gerekli biyomoleküller olarak bakılmasının dışında, bu bileşenler vücutta istenen bazı fizyolojik etkileri tetikleyebilecek biyomoleküller olarak da değerlendirilmeye başlanmıştır [3]. Bu kapsamda ise gıda proteinleri, hidrolizatları ve peptitler son dönemde üzerinde en çok durulan biyoaktif moleküllerin başında gelmektedir [4].

Biyoaktif peptit (BAP), bir ana protein içerisinde inaktif durumda bulunan ve birbirlerine peptit bağı ile bağlı genellikle 2-20 amino asitten oluşan alt birimler olarak tanımlanmaktadır [2]. Bu alt birimlerin biyoaktivite gösterebilmeleri için proteoliz ile serbest hale geçmeleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: canan_kartal@hotmail.com (C. Kartal)

Geliş / Received: 25.10.2022 Kabul / Accepted: 13.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1177148

gerekmektedir [5]. Peptitlerin biyoaktivitesi, peptit içerisinde bulunan amino asitlerin türü, dizilimi, peptit uzunluğu, molekül ağırlığı gibi birçok faktörlerden etkilenmektedir ve bu peptitlerin antihipertansif, antidiyabetik, antioksidan, antitrombotik, antimikrobiyal, antikanser, opioid, bağışıklık sistemi düzenleme, mineral bağlama gibi çeşitli biyoaktif özelliklerle insan sağlığı üzerine pozitif etkisi olduğu literatür genelinde ortaya konulmuştur [6]. Biyoaktif peptit eldesi için süt ve süt ürünleri, yumurta, balık, hububatlar (pirinç, buğday, karabuğday, arpa, mısır vb.) gibi bitkisel ve hayvansal gıda kaynaklar kullanılmakta, ayrıca, gıda sektöründe ortaya çıkan ve proteince zengin olan gıda atıkları da (soya küspesi, zeytin çekirdeği, et işleme atıkları vb.) günümüzde biyoaktif peptit eldesi için kullanılan başlıca kaynaklar arasında yerini almaktadır [7].

Bu derleme, özellikle bitkisel kaynaklı gıdalardan protein ekstraksiyonu, hidrolizat/peptit eldesi, protein/peptit saflaştırılması ve karakterizasyonunu kapsayan mevcut literatürün kapsamlı bir özetini sunmakta ve bu alanda kullanılan güncel metotları biyoinformatik yaklaşımını da kapsayan geniş bir bakış açısıyla değerlendirmeyi hedeflemektedir.

2 Gıda kaynaklı protein eldesi

Protein ekstraksiyonu amacıyla kullanılan yöntemlerin sınıflandırılmasında çeşitli bakış açıları kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, ekstraksiyon koşullarına göre; kuru koşullarda gerçekleştirilen (öğütme ve eleme, hava ile sınıflandırma, elektrostatik ayırma vb.) ve kuru olmayan koşullarda gerçekleştirilen (tek başlarına veya kombinasyonlar halinde çeşitli kimyasal, biyokimyasal, fiziksel yöntemler) ekstraksiyondur [8, 9]. Ayrıca, protein ekstraksiyonu, geleneksel yöntemler (organik çözügen, asit, alkali vb. kimyasal yöntemler) veya daha yeni ve yeşil ekstraksiyon yöntemleri (ultrases destekli, mikrodalga destekli, enzim destekli ekstraksiyon, subkritik/süperkritik sıvı ekstraksiyonu vb.) olmak üzere 2 temel sınıfa da ayrılabilir [1].

Proteinlerin kimyasal ekstraksiyonunda alkali, asit, su ve organik çözücü olmak üzere birçok ekstraksiyon çözücüsü tek başına veya bir arada kullanılmakta ve çözücü seçimi protein örneğinin yapısına göre belirlenmektedir. Bitkisel kaynaklardan protein ekstraksiyonunda, genel olarak en çok kullanılan yöntemlerin başında alkali ekstraksiyonu gelmektedir [10]. NaOH, ortam pH'nın ayarlanmasında en çok kullanılan alkalidir ve bir çözügen olarak da ortama eklenebilmektedir [9]. Alkali ortam hem hücre duvarının parçalanmasını sağlamakta hem de ortamın proteinlerin büyük çoğunluğunun izoelektrik noktası olan pH 4-5 aralığından daha yukarıdaki bir pH değerinde olması ile proteinlerin çözünürlüğünü arttırmaktadır [10]. Ayrıca hububatlar gibi kükürt içeren amino asitlerce zengin kaynaklarda oluşan disülfid çapraz bağlarını kırarak protein çözünürlüğünün artmasına da yardımcı olduğu bildirilmiştir [10]. Fakat alkali ortam, ortamda lignin ve selülozun da çözünmesi, olası protein denatürasyonu, hidroliz, çapraz bağlanma ile lizinoalanin oluşumu, amino asitlerin rasemizasyonu ve zorunlu amino asitlerin kaybı gibi

istenmeyen sonuçlara da yol açabilmektedir [9]. Wang vd. [11], pirinç kepeği protein ekstraksiyonu için alkali su ortamı kullanmış ve asitle çöktürme ile protein eldesini gerçekleştirmiştir. Pirinç kepeği protein fraksiyonlarının eldesi için ise, albümin ve globülin fraksiyonları için %2 NaCl, prolamin fraksiyonu için etanol, glutelin fraksiyonu için ise 0.1 N NaOH kullanmıştır. Ayrıca, yüksek yağ içerikli zeytin çekirdeğinden depo proteinlerinin ekstraksiyonunda kloroform [12], damıtık tahıldan protein ekstraksiyonu için ise sulu etanol ve alkali etanol [13] kullanılmıştır. Protein ekstraksiyonunda çöktürme aşamasında da trikloroasetik asit (TCA), aseton, metanol ve TCA/aseton karışımı [12] veya belli bir konsantrasyonda sulu etanol [14] gibi organik çözücülerden yararlanılmıştır. Alkali ekstraksiyon/izoelektrik çöktürme, tuz ekstraksiyonu/diyaliz ve misel çöktürme de bu alanda kullanılan diğer yöntemlerdir [15].

Kimyasal ekstraksiyon yöntemleri haricinde, enzim destekli ekstraksiyon, subkritik su ekstraksiyonu/süperkritik sıvı ekstraksiyonu ve ayrıca, hücre duvarının tahrip edilmesine dayanan; ultrasases destekli ekstraksiyon, yüksek basınç destekli ekstraksiyon, mikrodalga destekli ekstraksiyon, vurgulu elektrik alan destekli ekstraksiyon gibi yöntemler tek başlarına, beraber veya kimyasal yöntemlerle bir arada kullanılmaktadır [1]. Enzim destekli ekstraksiyonda, asidik veya bazik koşullarda proteazlar [16, 17] ve karbohidrolazlar [18, 19] ayrı ayrı veya bir arada kullanılabilir gibi [20], protein veriminin artırılması amacıyla alkali veya su ekstraksiyonunu destekleyici olarak da kullanılmaktadır [21, 22]. Subkritik su ekstraksiyonu (SBSE), belli basınç altında (10-60 bar) tutulan sıcak suyun (100-374°C) dielektrik sabitinin etanole yakın bir değere düşürülmesi prensibine dayanmaktadır [23]. Süperkritik sıvı ekstraksiyon (SKSE) ise, kullanılan akışkanın kritik noktası üzerinde uygulanan basınç ve sıcaklık sonucu, sıvılar gibi bir yoğunluğa sahip olan akışkanın aynı zamanda gaz gibi sıkıştırılabilir hale getirilmesi ve böylece düşük viskoziteye ve göreceli yüksek difüzyona sahip bir akışkan eldesine dayanmaktadır [23]. SBSE yöntemi pirinç kepeği ve soya küspesinden protein ekstraksiyonunda kullanılmış [24], ayrıca yağı uzaklaştırılmış pirinç kepeğinden protein ve amino asit eldesinde alkali hidroliz yöntemine göre daha yüksek bir verime sebep olduğu belirtilmiştir [25]. SKSE yöntemi ise literatür genelinde özellikle proteinlerin fraksiyonlarına ayrılması, saflaştırma ve çöktürülmesinde pH ve termal destabilizasyonlara karşı bir alternatif olarak kullanılmaktadır [26, 27]. Ultrasonikasyon destekli ekstraksiyon, protein verimini arttırabilmekte ve ayrıca elde edilen protein izolatının konformasyonunda değişikliğe sebep olabilmektedir [28, 29]. Bununla beraber, belirli bir ultrasonik güç ve ultrasonikasyon süresi aşıldığında protein veriminde hidroliz, agregasyon ve protein denatürasyonuna bağlı bir azalmanın olduğu da gözlemlenmiştir [30]. Preece vd. [31] soya işleme atığından protein ekstrakte ettiği çalışmada, hidrodinamik kaviteasyonun hücre parçalanmasına ve partikül boyutunda küçülmeye sebep olarak protein veriminde ultrasonikasyondan daha yüksek bir protein eldesi sağladığını fakat, yüksek basınç homojenizasyon sisteminden artan geçiş sayısı ile üründe

dinamik viskoziteyi artırarak partikül boyutunda ise büyümeye yol açarak ekstraksiyon veriminde düşüşe yol açtığını belirtilmiştir. Ayrıca yüksek basınç uygulamalarının proteinlerde tersinir ve tersinir olmayan yapısal değişikliklere yol açtığı, denatürasyon, agregasyon, jelleşme, yüzey hidrofobikliğinde değişime sebep olduğu ve allerjenite azalmasına sebep olabildiği belirtilmektedir [32]. Ekstraksiyon aşamasında mikrodalga kullanılması proteinlerin birincil yapısını etkilemezken ikincil yapısında değişikliklere yol açmakta, bu değişiklik ile proteinlerin yağ absorpsiyonu, su absorpsiyonu, köpük oluşturma kapasitesi, emülgatör özelliği ve protein sindirilebilirliğinde iyileşme elde edilebilmektedir [8]. Geleneksel yöntem olan alkali ekstraksiyonuna kıyasla mikrodalga destekli ekstraksiyon ile pirinç kepeğinden protein eldesinde daha yüksek verime ulaşılmış [33, 34], enzim destekli ekstraksiyon ile ise birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir [33]. Hücre duvarının parçalanmasını hedefleyen ve elektrik temelli (termal olmayan) bir yöntem olan vurgulu elektrik alan destekli ekstraksiyon, protein eldesinde kullanılan yeni bir yaklaşım olmakla beraber [1], bu yöntemle geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksek verim elde edilebileceği belirtilmektedir [35]. Bu yöntem enzim destekli ekstraksiyonla beraber kullanıldığında ise protein verimi, çözünürlüğü ve emülsifiye edici özelliği arttırdığı, köpük oluşturma ve viskozite de ise azalma yarattığı belirlenmiştir [36].

Bu yöntemler haricinde sıvı bifazik flotasyon [37], ters misel [38], sulu iki faz sistemler (iyonik sıvılar, derin ötektik çözücüler vb.) [39, 40] gibi yeni ve yeşil teknoloji odaklı yöntemler de literatür genelinde protein ekstraksiyonu için kullanılmaktadır.

3 Gıda kaynaklı biyoaktif peptit eldesi

Gıda kaynaklı BAP'ler, gıdaların depolanması veya çeşitli gıda işleme süreçleri (olgunlaşma, fermantasyon, pişirme vb.) sonucunda ana proteinden kendiliğinden serbest hale geçebildikleri gibi, insan vücudunda gastrointestinal sistemde gerçekleşen hidrolizle de oluşabilmektedir [41]. Buna karşılık, enzimatik veya mikrobiyal hidroliz ile istenilen spesifik biyoaktiviteye sahip peptit parçalarının eldesi günümüzde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmekte [41] ayrıca, kimyasal sentezleme, rekombinant DNA teknolojisi ve enzimatik sentezleme gibi yöntemler de BAP eldesinde kullanılmaktadır [42].

Protein hidrolizinde kullanılan yöntem çoğunlukla protein kaynağına göre farklılık göstermektedir. Keratin yapısına sahip proteinler için asidik veya alkali işlem ile kimyasal hidroliz tercih edilirken kazein, peynir altı suyu, et gibi hayvansal ürünler ve bitkisel proteinler daha çok enzim ve mikrobiyal hidroliz yöntemleri ile hidroliz edilmektedir [43]. Proteinlerin asit kullanılarak hidroliz edilmesi efektif ve düşük maliyetli bir yöntem olarak kabul edilmesine karşın triptofanın tamamen parçalanması, metiyoninde kısmi kayıp ve glutaminin glutamata, asparajinin aspartata dönüşmesi gibi önemli negatif etkileri bulunmaktadır [43]. Alkali hidrolizi ise, asit gibi düşük maliyete sahip ve triptofanın korunduğu bir yöntem olmakla birlikte, amino asitlerin parçalanması, rasemizasyon, ısı ve alkali etkisiyle lizinoalanin oluşumu ve amino asitler arası çapraz bağların

oluşması gibi negatif etkilere de yol açabilmektedir [43, 44]. Ayrıca, kimyasal hidroliz ile seçici olmayan bir hidrolizin gerçekleşmesi ve yüksek kül içeriğine sahip ürünlerin oluşması, kullanılan güçlü kimyasalların hidrolizatların görünüşünü, çözünürlüğünü, tadını ve biyokimyasal güvenliğini değiştirmesi sebebiyle protein hidrolizinde alternatif biyolojik yöntemlerin kullanılmasına yol açmaktadır [45].

Fermantasyon, enzimatik hidroliz ve gastrointestinal sindirimin taklit edilmesi, proteinlerin hidrolizinde kullanılan başlıca biyolojik yöntemlerdir. Proteinlerin sindirilebilirliğinin ve çözünürlüğünün iyileştirilmesi, ayrıca alerjik özelliklerinin azaltılması amacıyla kullanılan enzimatik hidroliz, biyoaktif peptit eldesi amacıyla da kullanılmaktadır [46]. Laboratuvar ortamından kolaylıkla daha büyük ölçüğe geçilebilmesi, daha kısa reaksiyon süresi, mikroorganizmalara göre daha rahat kontrol edilebilen bir ortamda gerçekleşmesi ve önceden belirlenmiş bir biyoaktivite sahip spesifik peptitlerin elde edilebilmesi, enzimatik hidroliz yöntemini günümüzde BAP eldesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri haline getirmiştir [4]. Proteinlerin enzimatik hidrolizinde kullanılan enzimler hayvansal kaynaklı (pankeratin, tripsin, pepsin, karboksipeptidaz, aminopeptidaz), bitkisel kaynaklı (papain, bromelain) veya farklı aktivite koşullarına sahip ve geniş bir ölçekte yer alan bakteri veya mantar kaynaklı enzimler olabilmektedir [43]. Kullanılan proteazlar tek başlarına veya bir arada, sırayla veya karışım halinde kullanılabilen ve sahip oldukları substrat seçiciliği ile kimyasal ve besinsel olarak istenilen özellikte peptitler elde edilebilmektedir. En çok kullanılan proteazlar arasında; peptit bağının C-ucunda arjinin veya lizin olduğunda kesen tripsin, fenilalanin ve lösinden sonra gelen peptit bağını kesen pepsin, alanin, valin, lösün, isolösün, fenilalanin, triptofan ve tirozin içeren hidrofobik bölgelerdeki peptit bağlarını kesen papain, ve tercihen N-ucunda fosforlanmış bölgeyi ve C-ucundaki hidrofobik bölgelerdeki peptit bağlarını hidroliz eden pankreatin sayılabilmektedir [47]. Keten tohumu proteinlerinden antioksidan peptit eldesi [48], soya proteininden antihipertansif peptit eldesi [49], kinoa çekirdek proteininden antidiyabetik ve antioksidan peptit eldesi [50], enzimatik hidroliz yönteminin kullanıldığı çalışmalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca, pepsin, pankreatin, kimotripsin gibi enzimlerin birlikte kullanılarak gastrointestinal sindirimin taklit edilmesiyle, kinoa proteininden antidiyabetik [51], soya unundan antioksidan [52] ve Adzuki fasulyesinden antiinflamatuvar [53] peptitler elde edilmiştir. Proteinlerin enzimatik hidrolizi için gıdalarda kullanılabilir enzimler genellikle tercih edilse de yüksek maliyet, göreceli düşük peptit verimi, ortam pH ve sıcaklığının sıkı kontrol gereksinimi ve gıda proteinlerinin kompleks yapısı dolayısıyla enzim-substrat etkileşiminin kısıtlı düzeyde olması bu yöntemin dezavantajlarıdır [54].

Maya, küf ve bakteriler tarafından gerçekleştirilen mikrobiyal fermantasyon, birçok hücre içi ve hücre dışı proteolitik enzimle gerçekleşen proteoliz sonucu biyoaktif peptit eldesinde kullanılan başka bir yöntemdir. Özellikle laktik asit bakterileri, güvenli olmaları ve yüksek proteolitik etkiye sahip olmalarının yanı sıra, kendi içinde sahip olduğu

çeşitlilik ile hayvansal veya bitkisel ortamlara kolayca uyum sağlamaktadır ve peptit eldesinde oldukça fazla tercih edilmektedir [55]. Laktik asit bakterileri ile fermentasyon yöntemi, soya proteininden antihipertansif peptit eldesinde [56], süt proteininden multifonksiyonel peptit eldesinde [57], ekşi mayadan antioksidan peptit eldesinde [58], soya sütünden antihipertansif peptit eldesinde [59] kullanılmıştır. Mikrobiyal fermentasyon ile gerçekleşen protein hidrolizi göreceli yüksek maliyeti ve kontaminasyon riski gibi dezavantajları olsa da aynı zamanda ortamdaki hiperallerjenik veya anti-besinsel öğelerin (tripsin inhibitörleri, glisin, fitat, saponin vb.) fermentasyonla uzaklaşması bu yöntemin başlıca avantajlarından biridir [43].

Geleneksel metotların yanı sıra, proteinlerin hidroliz düzeylerini artırmak amacıyla genellikle enzimatik hidroliz ile bir arada uygulanan hidrostatik basınç, ultrases, mikrodalga destekli ekstraksiyon, ohmik ısıtma, vurgulu elektrik alan ve süper kritik su hidrolizi gibi yeni teknikler de biyoaktif peptit eldesinde kullanılmaktadır [54].

3.1 Biyoaktif peptitlerin ayrılması ve saflaştırılması

3.1.1 Filtrasyon

Protein hidrolizi sonucu elde edilen ham hidrolizat, farklı zincir uzunluğuna, hidrofobik yapıya ve net yüke sahip polipeptitler, kısa zincirli peptitler, serbest amino asitler ve hidrolize olmayan proteinleri içeren bir karışımdır. Bu karışım içerisinde istenilen biyoaktiviteye sahip peptitlerin tespit edilmesi, yapısının ve diziliminin belirlenmesi amacıyla moleküler ağırlık, yük, hidrofobisite gibi özelliklere dayanan çeşitli ayırma ve saflaştırma teknikleri uygulanmaktadır. Hidroliz sonrası elde edilen protein hidrolizatına uygulanan ayırma ve saflaştırma tekniklerinde ilk basamak olarak genellikle membran filtrasyon (MF) tekniği kullanılmaktadır [60]. Membran kullanımı, itici gücü basınç farkı olan teknikler (mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon), itici gücü potansiyel fark olan teknikler (elektrodiyaliz, elektroforez vb.) ve elektrik potansiyel ile basıncın birleştirdiği teknikler (elektrofiltrasyon, elektrofiltrasyon vb.) olmak üzere sınıflara ayrılmaktadır [61]. Ultrafiltrasyon yönteminde (UF), değişen boyutlarda geçirgenliğe sahip membranlar kullanılarak yüksek molekül ağırlığına sahip polipeptitler hidrolize olmayan proteinden veya enzimlerden ayrılabilen, hidroliz sonucu elde edilen kısa peptitler fraksiyonlarına ayrılarak konsantre edilebilmektedir [62-64]. Bununla beraber geleneksel UF işleminde, yarı geçirgen membranlar ile hidrofobik peptitler arasında olası etkileşimler meydana gelmesi, filtrasyon verimliliğinin farklı gözenek boyutlarının normal dağılımından etkilenmesi, özellikle yüksek örnek konsantrasyonlarda büyük partiküllerin de filtre olabilmesi, göreceli yüksek örnek miktarına ihtiyaç duyulması, peptitlerin geri kazanımı için fazladan bir basamağa daha ihtiyaç duyulabilmesi gibi dikkate değer zorlukları da bulunmaktadır [65].

Geleneksel membran filtrasyonunda akışın ve membran seçiciliğinin iyileştirilmesi ve daha etkin bir ayırımı sağlanması amacıyla basınç itici gücüne ek olarak dışsal bir elektrik alan uygulaması da kullanılmaktadır [66, 67].

Elektrodiyaliz yöntemiyle ultrafiltrasyonun birleştirilmesi, keten tohumu hidrolizatının fraksiyonlara ayrılmasında [68], soya peptitlerinin saflaştırılmasında [69] ve kolza tohumu protein hidrolizatının ayırımı ve konsantrasyonunda [70] kullanılmıştır. Bununla beraber, Langevin vd. [71], nanofiltrasyon (NF) ile elektrodiyaliz-ultrafiltrasyon (EDUF) kombine yöntemini karşılaştırdıkları çalışmalarında, NF ile küçük ve spesifik molekül ağırlığına sahip peptit fraksiyonları elde ederken, EDUF ile daha geniş bir moleküler dağılımına ve ayrıca daha fazla polar amino asit miktarına sahip fraksiyonlar elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen fraksiyonların antioksidan kapasitelerine bakıldığında ise, her iki yöntemde elde edilen yüksek kapasitenin birbirinden farklı fraksiyonlarda elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak, optimize ve daha spesifik peptit fraksiyonlarının elde edildiği bir sistem için bu iki yöntemin aynı ayırma sürecinde birlikte kullanılması gerektiği önerilmiştir.

3.1.2 Kromatografik yöntemler

BAP ayrıştırılması ve saflaştırılması aşamalarında genellikle birden fazla kromatografik yöntem bir arada kullanılmaktadır (Tablo 1). Peptitleri zincir uzunluğuna veya moleküler ağırlıklarına göre ayrılmasını sağlayan boyut dışlama kromatografisi (SEC), membran filtrasyon teknikleri ile beraber peptit eldesinin ilk aşamasında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [65]. SEC yönteminde, moleküllerin gözenekli bir sabit faz ile interaksiyonu sonucu elüsyon sırası moleküler ağırlığını takip etmektedir. Böylece, yüksek molekül ağırlığına sahip olanlar gözeneklerden dışlanarak ilk önce kolondan ayrılırken, daha küçük moleküller ise gözeneklere erişerek kolon içerisinde daha geniş bir yüzeye nüfuz etmekte ve daha uzun zamanda kolondan ayrılmaktadır [72]. SEC yöntemi analitin özelliklerine bağlı olarak jel filtrasyon kromatografisi (GFC) ve jel geçirgenlik kromatografisi (GPC) olarak ikiye ayrılmaktadır. GFC yöntemi, suda çözünen bileşenlerin ayırımı için tercih edilmektedir ve polar fonksiyonel gruplara sahip gözenekli partiküllerle paketlenmiş kolonlarda, su içeren mobil fazlar ile gerçekleştirilmektedir. GPC yönteminde ise, suda çözünmeyen bileşenler için polar olmayan kolonlar ve çözümler kullanılmaktadır [73]. İyon değişim kromatografisi (IEC), hareketli fazdan (tampon çözelti ve örnek) gelen yüklü moleküller ile sabit fazdaki ters yüke sahip gruplar arasında gerçekleşen interaksiyona dayanmaktadır. Proteinlerin ters yüke sahip bir sabit faza bağlanması veya kolondan ayrılması, proteinin yüklü grupları ile karşıt yüklü iyonlara sahip tampon çözelti arasında gerçekleşen rekabetin sonucudur [74]. IEC yönteminde seçicilik, özel bir iyon değiştiriciye bağlanan çözünen maddelerin serbest enerjilerindeki farklılıktan ve bu maddelerin yükleri, yük yoğunlukları ve yüzeylerindeki yük dağılımlarıyla ortaya çıkan çeşitli düzeydeki interaksiyonlar tarafından belirlenmektedir. Bu interaksiyonlar ise, mobil fazın iyonik kuvveti ve pH değeri ile kontrol edilebilmektedir [75]. Anyon değişim kromatografisi (AEC) ve katyon değişim kromatografisi (CEC) olarak ikiye ayrılan IEC yönteminde, sentetik resin veya polisakkarit destek materyalleri kullanılmaktadır [76]. Asidik kalıntılara sahip

Tablo 1. BAP ayrıştırma, saflaştırma ve tanımlanmasında kullanılan kromatografik yöntemler

Kaynak	Ayırma/saflaştırma yöntemi	Biyoaktivite	Peptid tanımlama	Kaynak
Siyah soya fasulyesi küspesi	UF, GFC, RP-HPLC	Antioksidan ve antikanser	ESI-MS/MS	[62]
Amarant tohumu	RP-HPLC	Antihipertansif, antitrombotik, antioksidan	MALDI-TOF	[80]
Perilla tohumu	GFC, RP-HPLC	Antioksidan	UPLC-QTOF MS/MS	[81]
Çiya tohumu	UF	Antioksidan	-	[82]
Fındık	GFC, RP-HPLC	Antioksidan ve sitoprotektif etki	HPLC-QTOF MS	[83]
Buğday embriyosu	RP-HPLC	Antioksidan, antikanser, antihipertansif	Nano-LC/ESI-MS/MS	[84]
Bira mayşe atığı	MF, yarı-preparatif HPLC	Antidiyabetik	UPLC-MS/MS	[85]
Kinoa	GP-HPLC	Antidiyabetik ve antioksidan	-	[50]
Pirinç kepeği	UF, IEC, preparatif HPLC	Antikanser	MALDI-TOF/TOF MS	[86]
Nohut tohumu	IEC, GFC, RP-HPLC AC, GFC	Antioksidan Şelatlama aktivitesi	MALDI-TOF-MS/MS -	[87] [88]
Erik çekirdeği	UF	Antioksidan, antihipertansif	HILIC ve RP-HPLC-Q-TOF MS/MS	[89]
Zeytin çekirdeği	UF, yarı-preparatif RP-HPLC	Antihipertansif, antiproliferatif	HILIC ve RP-HPLC-ESI-Q-TOF MS/MS	[90]
Ayçiçeği	AC, RP-HPLC	Antihipertansif	-	[91]
Palm çekirdeği küspesi	Yarı-preparatif RP-HPLC, izoelektrik fokuslama	Antioksidan	UHPLC-Q-TOF MS/MS	[92]

peptitler olsa da çoğu peptidin pH 8.5 altında nötr veya bazik net yüke sahip olması dolayısıyla genel olarak anyon değişim kromatografisi çok kullanılmamakta, bunun yerine güçlü katyon değişim kromatografisi, özellikle hidrofobikliğe dayanan ters-faz yüksek basınç sıvı kromatografisi (RP-HPLC) yöntemiyle birlikte yaygın olarak tercih edilmektedir [77]. RP-HPLC, hidrofobik sabit fazın, polar bir hareketli fazdaki hidrofobik analit ile interaksyonuna dayanan bir yöntemdir ve peptitler sahip oldukları hidrofobik yapıya ve moleküler ağırlıklarına göre ayrılmaktadır. Böylece düşük moleküler ağırlığa sahip düşük düzeyde hidrofobik peptitler kısa alıkonma zamanına sahiptir ve kolondan önce ayrılmaktadır [65]. RP-HPLC özellikle laboratuvar düzeyinde yapılan çalışmalarda sahip olduğu etkinlik, çeşitlilik ve otomasyon kabiliyeti ile sıklıkla başvurulan metotların başında gelmektedir [78].

Ayrıca bu tekniklere ek olarak, ultra yüksek basınç sıvı kromatografisi (UHPLC), hidrofilik interaksyonlar sıvı kromatografisi (HILIC), affinite kromatografisi ve izoelektrik odaklama yöntemleri de peptid ayrıştırılması ve saflaştırılması aşamasında kullanılan diğer yöntemlerdir [2].

3.2 Biyoaktif peptitlerin tanımlanması

Günümüzde, Edman degradasyonu gibi farklı teknikler bulunuyor olsa da kütle spektrometresi (MS) peptid tanımlanmasında ve amino asit dizilimlerinin belirlenmesinde kullanılan başlıca yöntem olarak öne çıkmaktadır (Tablo 1). Edman degradasyonuna dayanan dizilim belirleme yönteminde, yoğun bir saflaştırma aşamasına ihtiyaç duyulması ve göreceli düşük hassasiyeti, peptid dizilerinin belirlenmesinde MS yönteminin yaygınlaşmasının en önemli sebepleridir [55]. Genellikle elektrosprey iyonizasyon (ESI) kaynağı ile eşleştirilmiş sıvı kromatografisinin kullanıldığı peptid tanımlama çalışmalarında, kütle analizatörleri olarak;

kuadropol (Q), uçuş zamanlı (TOF), iyon tuzaklı, Q-TOF, TOF-TOF, Q-iyon tuzaklı sistemleri kullanılmaktadır (Tablo 1). Ayrıca, TOF kütle analizatörü ile eşleşmiş matriks-destekli lazer desorpsiyon/iyonlaştırma (MALDI) veya ardışık kütle spektrometresinin (MS/MS) kullanıldığı çok sayıda çalışma da literatür genelinde bulunmaktadır [79].

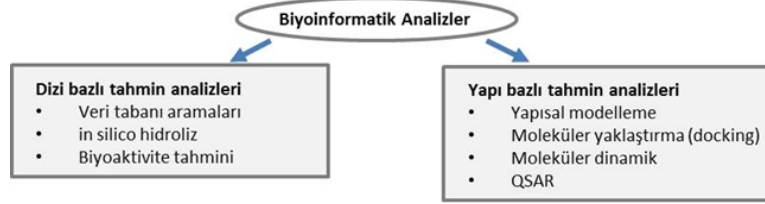
4 Biyoinformatik yöntemler

Biyoinformatik; biyolojik verilerin toplanması, işlenmesi, paylaşılması ve yenilerinin oluşturulmasını sağlayan ve bu sırada da bilgisayar yazılımlarını kullanan disiplinler arası bir bilim dalıdır [93]. Protein/peptid araştırmalarında biyoinformatiğin en temel prensibi, aminoasit dizisinin polipeptidin nasıl katlanacağını (yapısını) belirlemesi ve yapının da doğrudan fonksiyonla ilişkili olmasıdır [94]. Bu prensip sayesinde, yapısal veya fonksiyonel benzerlikler tahmin edilebilmektedir. Veri tabanları, protein/nükleotid/peptitler ile ilgili bilgilerin sınıflandırılıp depolandığı platformlardır ve DNA – RNA dizileri, amino asit dizisi, protein-peptid yapısı, literatür çalışmaları, mutasyon çalışmaları, taksonomik bilgiler gibi birçok biyolojik veriyi içermektedir. En geniş kapsamlı ve genel veri tabanları olarak NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), EMBL-EBI (<https://www.ebi.ac.uk/>) ve DDBJ (<https://www.ddbj.nig.ac.jp/index-e.html>) kabul edilmektedir. Birbiriyle güncel veri paylaşımında da bulunan bu veri tabanlarına çevrim içi olarak ücretsiz olarak erişilebilmektedir [95].

Gıda bilimlerinde biyoaktif peptid araştırmaları, sağlık ve beslenme arasındaki ilişkiye verilen önemin artmasıyla beraber ilgi çeken ve üzerine oldukça fazla çalışılan alanlar haline gelmiştir. Bu çalışmaların çoğunda biyoinformatik



Şekil 1. Gıda bilimlerinde biyoaktif peptit araştırmalarında biyoinformatiğin genel kullanım alanları



Şekil 2. Dizi bazlı ve yapı bazlı analizlerin sınıflandırılması

analizlerden yararlanıldığı görülmektedir [96]. Biyoinformatiğin bu çalışmalarda karşılaşılan genel kullanım alanları Şekil 1’de verilmiştir.

Biyoinformatik analizlerde ilk adım amino asit dizisinin bulunmasıdır. Bunun için incelenen gıda örneğindeki protein veya peptitlere ait anahtar kelimelerle veri tabanlarında arama yapılarak, genellikle analizlerde kullanılan FASTA formatındaki diziyeye erişilebilmektedir. BAP çalışmalarında en çok kullanılan analizler Şekil 2’deki gibi sıralanabilir.

Biyoinformatik analizleri dizi bazlı ve yapı bazlı analizler olarak sınıflandırmak mümkündür. BAP’lara ait genel veri tabanları olmakla birlikte çok sayıda da biyoaktif özelliğine göre sınıflandırıldığı veri tabanları bulunmaktadır. Genel arama yapılabilecek veri tabanlarına örnek olarak UniProt-Peptide Search (<https://www.uniprot.org/peptidesearch/>), PepBank (<http://pepbank.mgh.harvard.edu/search/basic>), EROP-Moscow (<http://erop.inbi.ras.ru/>) PeptideAtlas (https://db.systemsbio.org/sbeams/cgi/PeptideAtlas/Search?_tab=1) verilebilirken, antimikrobiyal peptitler için CAMP-R3 (<http://www.camp.bicnirrh.res.in/index.php>), DPPIV inhibitör peptitler için IDPPIV-SCM (<http://camt.pythonanywhere.com/iDPPIV-SCM>), ACE inhibitör peptitler için AHTPDB (<http://crdd.osdd.net/raghava/ahtpdb/>) örnek olarak sayılabilir. Bunlarla birlikte, BAP’larla ilgili veri tabanları [97, 98] çalışmalarında kapsamlı olarak listelenmiştir. BIOPEP-UWM™ (<http://www.uwm.edu.pl/biochemia/index.php/en/biopep>) ve FeptideDB (http://www4g.biotec.or.th/FeptideDB/enzyme_digestion.php) gıda kökenli biyoaktif peptitler için özelleştirilmiş veri tabanları ve ayrıca proteinin biyoaktivite profilinin tahmin edilebildiği platformlardır [99, 100]. BIOPEP-UWM™ peptitlerin duyuşsal ve alerjenik özellikleri için de bir veri tabanı ve tahmin aracıdır.

in silico hidroliz analizi bir diğer dizi bazlı analizdir; protein zincirinde, spesifik enzimler tarafından kesilebilecek yerler bellidir ve bu bölgelerdeki bağların kırılması simüle edilerek açığa çıkabilecek olası peptitler tahminlenebilmektedir [101]. *in silico* araçlarda enzim

taraması yapmak çok hızlı olduğundan deneylere başlamak için iyi bir referans noktasıdır ve farklı kaynakların BAP potansiyelini inceleyen çok sayıda çalışma vardır [102, 103]. Yukarıda bahsedilen BIOPEP-UWM™ ve FeptideDB dışında ExPasy-PeptideCutter (https://web.expasy.org/peptide_cutter/) yaygın olarak kullanılan bir diğer *in silico* hidroliz aracıdır. *in silico* hidrolizin sınırlandırıldığı nokta, proteinin birincil yapısını dikkate alarak bir tahmin üretmesidir. Ancak proteinler üç boyutlu bir katlanmaya sahip oldukları için dizi düzeyinde yapılan bu tahminlerin deneysel olarak mutlaka kanıtlanmalıdır. Bununla birlikte, proteinlerin üç boyutlu yapısı çeşitli ön işlemlerle (yüksek sıcaklık, ultrases, ohmik ısıtma, mikrodalga vb.) bozulabilmektedir [54]. Böylece enzimin erişebileceği alanlar açılır ve *in silico* hidroliz tahminlerine yaklaşılabilir.

Dizi düzeyindeki analizler, fonksiyonu tahmin etmede çok değerli bilgiler sağlamaktadır. Ancak, fonksiyonun daha iyi anlaşılması için yapı bazlı analizlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı peptitler proteinler gibi daha kararlı bir yapıya sahipken, çoğu peptit esnek yapıdadır. Çevre koşullarına göre ve etkileşeceği moleküle göre farklı konformasyonlarda bulunabilmektedirler [104]. Peptit yapılarının deneysel olarak çözüldüğü tekniklerden bazıları X ışını kristalografisi [105], nükleer manyetik rezonans [106] ve küçük açı X ışını saçılımı [107] olarak sıralanabilir ve çözülen yapılara PDB (<https://www.rcsb.org/>), StraPep (<http://isyslab.info/StraPep/>), SATPdb (<https://webs.iitd.edu.in/raghava/satpdb/about.php>) gibi veri tabanlarından erişilebilmektedir. Peptit yapısının çözümündeki zorluklar nedeniyle özellikle protein-peptit etkileşimlerini aydınlatılmak için hesaplamalı tahminler önem taşımaktadır. Peptit yapılarının modellenilebildiği programlara örnek olarak PEP-FOLD3 (<https://bioserv.rpbs.univ-paris-diderot.fr/services/PEP-FOLD/>), PEPstrMOD (<https://webs.iitd.edu.in/raghava/pepstrmod/>) verilebilir. Bununla birlikte yapay zeka ile protein/peptit yapıları hesaplayan yazılımlar da son yıllarda başarıyla kullanılmaya başlanmıştır ve en güncel araca örnek olarak

AlphaFold (<https://alphafold.ebi.ac.uk/entry/A0A0A1I6N9>) gösterilebilir.

Kantitatif yapı aktivite ilişkisi (Quantitative structure-activity relationship; QSAR), moleküllerin yapısı ve biyofiziksel özellikleri ile biyoaktiviteleri arasında bir korelasyon bulmak için matematiksel modellerin oluşturulduğu bir metottur [108]. QSAR, peptit yapıları ile spesifik aktiviteleri arasındaki ilişkiyi anlamak, yeni bir kaynaktan elde edilmiş veya dizayn edilmiş peptitlerin aktivitelerini tahminlemek için kullanılmaktadır. QSAR genel hatlarıyla dört basamakta gerçekleştirilmektedir [109]. İlk adımda, peptitlere ait dizi, yapısal ve fizikokimyasal (boyut, büyüklük, hidrofobiklik, polar yük), biyolojik aktivite verileri (IC₅₀, LD₅₀) literatürden veya veri tabanlarından bulunur. İkinci adım, tanımlayıcıların seçilmesidir. Toplanan bu özellikler nümerik verilerle tanımlanır. Geçmiş çalışmalarda araştırmacıların oluşturduğu tanımlayıcı sistemler yayınlanmıştır [110-113] ve bu tanımlayıcılar güncel çalışmalarda da kullanılmaktadır. Ardından bilgisayar destekli bir matematiksel model oluşturulur ve karakterize edilmiş peptitler ile model validasyonu yapılmaktadır. Son adımda da model doğrulandıktan sonra yeni peptidin biyoaktivite potansiyeli tahmin edilmektedir [109].

Moleküler yaklaşırma, kenetleme olarak bilinen teknik literatürde yaygın olarak docking olarak adlandırılmaktadır. Docking, moleküller arasındaki etkileşiminin nasıl olacağını tahmin eden bir simülasyon tekniğidir. Olası tüm atom etkileşimleri değerlendirilerek enerji minimizasyonu yapılmaktadır [114]. Etkileşim mekanizmasının çözülmesi ile docking, farklı ligand veya inhibitörler keşfedilmesi, mutasyon çalışmaları, homolog sistemlerin aydınlatılmasında oldukça önemlidir.

Moleküler dinamik, bir molekülün veya kompleksin sınırlanmış bir zaman içinde (yüzlerce ps ve ns), çeşitli koşullar altındaki değişiminin atomik düzeyde incelenmesidir [115, 116]. Bu teknik, ligand-protein etkileşimi gibi iki molekülün bağlanma özelliklerini tahmin etmede çok yardımcıdır. İlaç tasarımında aktif moleküllerin taranmasında ve peptitlerin hedef proteinlere bağlanma ayrıntılarının incelenmesinde kullanılan bir metottur.

5 Sonuç

Bitkisel veya hayvansal gıda kaynaklarından ve gıda işleme atıklarından elde edilebilen BAPler, sağlık üzerinde sahip oldukları potansiyel olumlu etkileriyle özellikle fonksiyonel gıda pazarında oldukça dikkat çekmektedir. Günümüzde, protein ekstraksiyonu ve hidrolizat eldesinde geleneksel yöntemler (kimyasal yöntemler, enzimatik yöntemler vb.) kullanılmakla beraber özellikle son yıllarda protein verimini ve hidroliz düzeyini arttırmak amacıyla ultrases, mikrodalga, hidrostatik basınç, ohmik ısıtma, vurgulu elektrik alan, subkritik su/süperkritik sıvı gibi yeni tekniklerden de oldukça yaygın şekilde yararlanılmaktadır. Protein hidrolizatlarından biyoaktif peptit fraksiyonlarının ayrıştırılması ve saflaştırılmasında ise çeşitli membran ve kromatografik yöntemler ayrı ayrı ve/veya kombinasyonlar halinde kullanılmakta, elde edilen biyolojik aktiviteye sahip peptitlerin amino asit dizilimlerinin belirlenmesinde ise MS

teknolojisinden faydalanılmaktadır. Ayrıca bu alanda bilgisayar tabanlı ve analitik teknikleri içeren biyoinformatik araçlar proteinlerin amino asit dizilerine ulaşılması, enzim seçimi, in silico sindirim gerçekleştirilmesi, peptit karakterizasyonu ve olası biyoaktivite tahmininde araştırmacıların sıklıkla kullandığı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Biyoinformatik yaklaşım kapsamında, saflaştırılan peptit dizilerinin belirlenmesi ile kapsamlı biyoaktif peptit veri tabanları oluşturulmuştur. Bu veri tabanları sayesinde olası yeni peptitlerin tespiti mümkün olmaktadır. Peptitlerin sadece birincil yapılarının değil, üç boyutlu atomik yapılarının da aktivitelerinde önemli rolü bulunmaktadır ve peptit yapı-fonksiyon ilişkisini araştıran biyoinformatik çalışmalar bu anlamda çok önem taşımaktadır. Peptit atomik yapıları deneysel ve hesaplamalı yöntemlerle çözülebilmekte, elde edilen yapıların moleküler dinamik ya da docking gibi yöntemlerle analizi sonucu biyoaktiviteleri karakterize edilebilerek yeni nesil peptitler tasarlanabilmektedir. Ayrıca biyoinformatik analizlerle laboratuvar deneylerinin entegre edilmesi ve tümleşik bir yaklaşımla yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Biyoinformatik araçlar ile algoritmaların iyileştirilmesi ve geliştirilmesine büyük katkı sağlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] H. Kamal, C. F. Le, A. M. Salter and A. Ali, Extraction of protein from food waste: An overview of current status and opportunities. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20, 2455-2475, 2021. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12739>
- [2] R. J. S. de Castro and H. H. Sato, Biologically active peptides: Processes for their generation, purification and identification and applications as natural additives in the food and pharmaceutical industries. *Food Research International*, 74, 85-198, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.013>
- [3] D. Agyei, C. M. Ongkudon, C. Y. Wei, A. S. Chan and M. K. Danquah, Bioprocess challenges to the isolation and purification of bioactive peptides. *Food and Bioprocess Processing*, 98, 244-256, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2016.02.003>
- [4] S. Chakrabarti, S. Guha and K. Majumder, Food-derived bioactive peptides in human health: challenges and opportunities. *Nutrients*, 10, 1738, 2018. <https://doi.org/10.3390/nu10111738>
- [5] C. C. Udenigwe and R. E. Aluko, Food protein-derived bioactive peptides: production, processing, and potential health benefits. *Journal of Food Science*, 77(1), R11-R24, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02455.x>
- [6] G. Shahidi and J. Zhong, Bioactive peptides. *Journal of AOAC International*, 91, 914-931, 2008. <https://doi.org/10.1093/jaoac/91.4.914>

- [7] B. A. Kehinde and P. Sharma, Recently isolated antidiabetic hydrolysates and peptides from multiple food sources: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 322-340, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1528206>
- [8] M. Pojić, A. Mišan and B. Tiwari, Eco-innovative technologies for extraction of proteins for human consumption from renewable protein sources of plant origin. *Trends in Food Science and Technology*, 75, 93–104, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.010>
- [9] M. Del Mar Contreras, A. Lama-Muñoz, J. M. Gutiérrez-Pérez, F. Espínola, M. Moya, E. Castro, Protein extraction from agri-food residues for integration in biorefinery: Potential techniques and current status. *Bioresource Technology*, 280, 459–77, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.040>
- [10] Y. W. Sari, W. J. Mulder, J. P. M. Sanders and M. E. Bruins, Towards plant protein refinery: review on protein extraction using alkali and potential enzymatic assistance. *Biotechnology Journal*, 10, 1138–1157, 2015. <https://doi.org/10.1002/biot.201400569>
- [11] C. Wang, F. Xu, D. Li and M. Zhang, Physico-chemical and structural properties of four rice bran protein fractions based on the multiple solvent extraction method. *Czech Journal of Food Sciences*, 33 (3), 283-291, 2015. <https://doi.org/10.17221/462/2014-CJFS>
- [12] W. Wang, J. de Dios-Alché and M. I. Rodriguez-Garcia, Characterization of olive seed storage proteins. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 439-444. 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-007-0053-2>
- [13] D. J. Cookman and C. E. Glatz, Extraction of protein from distiller's grain. *Bioresource Technology*, 100, 2012-2017, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.059>
- [14] H. Yoshikawa, A. Hirano, T. Arakawa and K. Shiraki, Mechanistic insights into protein precipitation by alcohol. *International Journal of Biological Macromolecules*, 50, 865-871, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2011.11.005>
- [15] C. Tanger, J. Engel and U. Kulozik, Influence of extraction conditions on the conformational alteration of pea protein extracted from pea flour. *Food Hydrocolloids*, 107, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105949>
- [16] L. Shen, X. Wang, Z. Wang, Y. Wu and J. Chen, Studies on tea protein extraction using alkaline and enzyme methods. *Food Chemistry*, 107(2), 929-938, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.047>
- [17] Y. W. Sari, M. E. Bruins and J. P. M. Sanders, Enzyme assisted protein extraction from rapeseed, soybean, and microalgae meals. *Industrial Crops and Products*, 43, 78-83, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.07.014>
- [18] F. F. Shih, E. T. Champagne, K. Daigle and Z. Zarins, Use of enzymes in the processing of protein products from rice bran and rice flour, *Nahrung*, 43(1), 14-18, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3803\(19990101\)43:1<14::AID-FOOD14>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3803(19990101)43:1<14::AID-FOOD14>3.0.CO;2-K)
- [19] S. Jung, B. P. Lamsal, V. Stepien, L. A. Johnson and P. A. Murphy, Functionality of soy protein produced by enzyme-assisted extraction. *Journal of American Oil Chemists Society*, 83(1), 71-78, 2006. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1178-y>
- [20] J. Treimo, S. I. Aspino, V. G. H. Eijssink and S. J. Horn, Enzymatic solubilization of proteins in brewer's spent grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56, 5359-5365. 2008. <https://doi.org/10.1021/jf073317s>
- [21] K. Rommi, D. Ercili-Cura, T. K. Hakala, E. Nordlund, K. Poutanen and R. Lantto, Impact of total solid content and extraction pH on enzyme-aided recovery of protein from defatted rapeseed (*Brassica rapa* L.) press cake and physicochemical properties of the protein fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(11), 2997-3003, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01077>
- [22] M. N. Perović, D. K. J. Zorica and G. A. Mirjana, Improved recovery of protein from soy grit by enzyme-assisted alkaline extraction. *Journal of Food Engineering*, 276, 109894, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109894>
- [23] M. Herrero, A. Cifuentes and E. Ibañez, Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae. *Food Chemistry*, 98, 136-148, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>
- [24] K. Watchararujij, M. Goto, M. Sasaki and A. Shotipruk, Value-added subcritical water hydrolysate from rice bran and soybean meal. *Bioresource Technology*, 99(14), 6207-6213, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.021>
- [25] I. Sereewatthanawut, S. Prapintip, K. Watchararujij, M. Goto, M. Sasaki and A. Shotipruk, Extraction of protein and amino acids from deoiled rice bran by subcritical water hydrolysis. *Bioresource Technology*, 99(3), 555–561, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.030>
- [26] M. A. Winters, B. L. Knutson, P. G. Debenedetti, H. G. Sparks, T. M. Przybycien, C. L. Stevenson and S. J. Prestrelski, Precipitation of proteins in supercritical carbon dioxide. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 85, 586–594, 1996. <https://doi.org/10.1021/js950482q>

- [27] S. Moshashaée, M. Bisrat, R. T. Forbes, H. Nyqvist and P. York, Supercritical fluid processing of proteins: I: Lysozyme precipitation from organic solution. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 11(3), 239-245, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0928-0987\(00\)00108-1](https://doi.org/10.1016/S0928-0987(00)00108-1)
- [28] K. Li, H. Ma, S. Li, C. Zhang and C. Dai, Effect of ultrasound on alkali extraction protein from rice dreg flour. *Journal of Food Process Engineering*, 40, e12377, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12377>
- [29] A. A. Yagoub, H. Ma and C. Zhou, Ultrasonic-assisted extraction of protein from rapeseed (*Brassica napus* L.) meal: Optimization of extraction conditions and structural characteristics of the protein. *International Food Research Journal*, 24 (2), 621-629, 2017.
- [30] Y. Xu, Y. Li, T. Bao, X. Zheng, W. Chen and J. Wang, A recyclable protein resource derived from cauliflower by-products: Potential biological activities of protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 221, 114-122, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.053>
- [31] K. E. Preece, N. Hooshyar, A. J. Krijgsman, P. J. Fryer and N. J. Zuidam, Intensification of protein extraction from soybean processing materials using hydrodynamic cavitation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 41, 47-55, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.01.002>
- [32] H. W. Huang, C. P. Hsu, B. B. Yang and C. Y. Wang, Potential utility of high-pressure processing to address the risk of food allergen concerns. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(1), 78-90, 2014. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12045>
- [33] K. Bandyopadhyay, C. Chakraborty and A. K. Barman, Effect of microwave and enzymatic treatment on the recovery of protein from Indian defatted rice bran meal. *Journal of Oleo Science*, 61(10), 525-529, 2012. <https://doi.org/10.5650/jos.61.525>
- [34] S. Phongthai, S. T. Lim and S. Rawdkuen, Optimization of microwave-assisted extraction of rice bran protein and its hydrolysates properties. *Journal of Cereal Science*, 70, 146-154, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.001>
- [35] Y. Zhou, Q. He and D. Zhou, Optimization extraction of protein from mussel by high-intensity pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12962, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12962>
- [36] M. Li, J. Lin, J. Chen and T. Fang, Pulsed electric field-assisted enzymatic extraction of protein from abalone (*Haliotis discus hannai* Ino) viscera. *Journal of Food Process Engineering*, 39(6), 702-710, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12262>
- [37] P. E. Tham, Y. J. Ng, R. Sankaran, K. S. Khoo, K. W. Chew, Y. J. Yap, M. Malahubban, Z. Aziz, A. Fitri, P. L. Show and L. Pau, Recovery of protein from dairy milk waste product using alcohol-salt liquid biphasic flotation. *Processes*, 7(12), 1-18, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7120875>
- [38] K. X. Zhu, X. H. Sun and H. M. Zhou, Optimization of ultrasound-assisted extraction of defatted wheat germ proteins by reverse micelles. *Journal of Cereal Science*, 50(2), 266-271, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.06.006>
- [39] Q. Zeng, Y. Wang, N. Li, X. Huang, X. Ding, X. Lin, S. Huang and X. Liu, Extraction of proteins with ionic liquid aqueous two-phase system based on guanidine ionic liquid. *Talanta*, 116, 409-416, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.06.011>
- [40] K. Xu, Y. Wang, Y. Huang, N. Li and Q. Wen, A green deep eutectic solvent-based aqueous two-phase system for protein extracting. *Analytica Chimica Acta*, 864, 9-20, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.01.026>
- [41] S. Piovesana, A. L. Capriotti, C. Cavaliere, G. La Barbera, C. M. Montone, R. Zenezini R. Z. Chiozzi and A. Laganà, Recent trends and analytical challenges in plant bioactive peptide separation, identification and validation. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410, 3425-3444, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00216-018-0852-x>
- [42] D. Montesano, M. Gallo, F. Blasi and L. Cossignani, Biopeptides from vegetable proteins: New scientific evidences. *Current Opinion in Food Science*, 31, 31-37, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.10.008>
- [43] Y. Hou, Z. Wu, Z. Dai, G. Wang and G. Wu, Protein hydrolysates in animal nutrition: Industrial production, bioactive peptides, and functional significance. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 8, 24, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0153-9>
- [44] L. Liu, S. Li, J. Zheng, T. Bu, G. He and J. Wu, Safety considerations on food protein-derived bioactive peptides. *Trends in Food Science and Technology*, 96, 199-207, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.022>
- [45] T. J. Ashaolu, Health applications of soy protein hydrolysates. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 26 (4), 2333-2343, 2020. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14380>
- [46] M. A. Mazorra-Manzano, J. C. Ramírez-Suarez and R. Y. Yada, Plant proteases for bioactive peptides release: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2147-2163(2018). <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1308312>
- [47] J. M. Lorenzo, P. E. S. Munekata, B. Gómez, F. J. Barba, L. Mora, C. Pérez-Santaescolástica, and F.

- Toldrá, Bioactive peptides as natural antioxidants in food products – A review. *Trends in Food Science and Technology*, 79, 136-147, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.003>
- [48] M. Karamać, A. Kosińska-Cagnazzo, A. Kulczyk, Use of different proteases to obtain flaxseed protein hydrolysates with antioxidant activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 1027, 2016. <https://doi.org/10.3390/ijms17071027>
- [49] W. Margatan, K. Ruud, Q. Wang, T. Markowski and B. Ismail, Angiotensin converting enzyme inhibitory activity of soy protein subjected to selective hydrolysis and thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(14), 3460–3467, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf4001555>
- [50] A. B. Nongonierma, S. Le Maux, C. Dubrulle, C. Barre and R. J. Fitzgerald, Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein hydrolysates with in vitro dipeptidyl peptidase IV (DPP-IV) inhibitory and antioxidant properties. *Journal of Cereal Science*, 65, 112–8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.07.004>
- [51] R. Vilcacundo, C. Martínez-Villaluenga and B. Hernández-Ledesma Release of dipeptidyl peptidase IV, α -amylase and α -glucosidase inhibitory peptides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) during in vitro simulated gastrointestinal digestion. *Journal of Functional Foods*, 35, 531–539, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.06.024>
- [52] C. Cavaliere, A. M. I. Montone, S. E. Aita, R. Capparelli, A. Cerrato, P. Cuomo, A. Laganà, C. M. Montone, S. Piovesana and A. L. Capriotti, Production and characterization of medium-sized and short antioxidant peptides from soy flour-simulated gastrointestinal hydrolysate. *Antioxidants*, 10, 734, 2021. <https://doi.org/10.3390/antiox10050734>
- [53] Z. Shi, B. Dun, Z. Wei, C. Liu, J. Tian, G. Ren, Y. Yao, Peptides released from extruded adzuki bean protein through simulated gastrointestinal digestion exhibit anti-inflammatory activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(25), 7028-7036, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01712>
- [54] S. Keskin Ulug, F. Jahandideh and J. Wu, Novel technologies for the production of bioactive peptides. *Trends in Food Science and Technology*, 108, 27-39, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.12.002>
- [55] C. G. Rizzello, D. Tagliacruzchi, E. Babini, G. S. Rutella, D. L. Taneyo Saa and A. Gianotti, Bioactive peptides from vegetable food matrices: Research trends and novel biotechnologies for synthesis and recovery. *Journal of Functional Foods*, 2016, 549-569. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.09.023>
- [56] V. S. Vallabha and P. K. Tiku, Antihypertensive peptides derived from soy protein by fermentation. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 20, 161-168. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10989-013-9377-5>
- [57] J. E. Aguilar-Toalá, L. Santiago-López, C. M. Peres, C. Peres, H. S. Garcia, B. Vallejo-Cordoba, A. F. González-Córdova and A. Hernández-Mendoza, Assessment of multifunctional activity of bioactive peptides derived from fermented milk by specific *Lactobacillus plantarum* strains. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 65-75, 2017. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11846>
- [58] R. Coda, C. G. Rizzello and M. Gobbetti, Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread of γ -aminobutyric acid (GABA), *International Journal of Food Microbiology*, 137, 236-245, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.12.010>
- [59] J. S. Tsai, Y. S. Lin, B. S. Pan and T. J. Chen, Antihypertensive peptides and γ -aminobutyric acid from prozyme 6 facilitated lactic acid bacteria fermentation of soymilk. *Process Biochemistry*, 41(6), 1282-1288, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.12.026>
- [60] X. Wang, H. Yu, R. Xing and P. Li, Characterization, preparation, and purification of marine bioactive peptides. *BioMed Research International*, 2017 (9746720), 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9746720>
- [61] L. Bazinet and L. Firdaous, Membrane processes and devices for separation of bioactive peptides. *Recent Patents on Biotechnology*, 3, 61-72, 2009. <https://doi.org/10.2174/187220809787172623>
- [62] Z. Chen, W. Li, R. K. Santhanam, C. Wang, X. Gao, Y. Chen, C. Wang, L. Xu, and H. Chen, Bioactive peptide with antioxidant and anticancer activities from black soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] byproduct: Isolation, identification and molecular docking study. *European Food Research and Technology*, 245(3), 677-689, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3190-5>
- [63] B. Y. Park and K. Y. Yoon, Biological activity of enzymatic hydrolysates and the membrane ultrafiltration fractions from perilla seed meal protein. *Czech Journal of Food Sciences*, 37, 180–185, 2019. <https://doi.org/10.17221/145/2018-CJFS>
- [64] M. M. Aondona, J. K. Ikya, M. T. Ukeyima, T. J. A. Gborigo, R. E. Aluko and A. T. Girgih, In vitro antioxidant and antihypertensive properties of sesame seed enzymatic protein hydrolysate and ultrafiltration peptide fractions. *Journal of Food Biochemistry*, 45, e13587, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13587>

- [65] C. Acquah, Y. W. Chan, S. Pan, D. Agyei and C. C. Udenigwe, Structure-informed separation of bioactive peptides, *Journal of Food Biochemistry*, 43 (1), e12765, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12765>
- [66] E. Iritani, Y. Mukai and Y. Kiyotomo, Effects of electric field on dynamic behaviors of dead-end inclined and downward ultrafiltration of protein solution. *Journal of Membrane Science*, 164, 51-57, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00202-1](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00202-1)
- [67] G. Brisson, M. Britten and Y. Pouliot, Electrically-enhanced crossflow microfiltration for separation of lactoferrin from whey protein mixtures. *Journal of Membrane Science*, 297, 206-216, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.03.046>
- [68] A. Doyen C. C. Udenigwe P. L. Mitchell, A. Marette R. E. Aluko and L. Bazinet, Anti-diabetic and antihypertensive activities of two flaxseed protein hydrolysate fractions revealed following their simultaneous separation by electrodialysis with ultrafiltration membranes. *Food Chemistry*, 145, 66–76, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.108>
- [69] C. Roblet, A. Doyen, J. Amiot, G. Pilon, A. Marette and L. Bazinet, Enhancement of glucose uptake in muscular cell by soybean charged peptides isolated by electrodialysis with ultrafiltration membranes (EDUF): activation of the AMPK pathway. *Food Chemistry*, 147, 124–130, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.108>
- [70] R. He, A. T. Girgih, E. Rozoy, L. Bazinet, X. R. Ju and R.E. Aluko, Selective separation and concentration of antihypertensive peptides from rapeseed protein hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes. *Food Chemistry*, 197, 1008–1014, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.081>
- [71] M. E. Langevin, C. Roblet, C. Moresoli, C. Ramassamy and L. Bazinet, Comparative application of pressure- and electrically-driven membrane processes for isolation of bioactive peptides from soy protein hydrolysate. *Journal of Membrane Science*, 403–404, 15–24, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.005>
- [72] G. Brusotti, E. Calleri, R. Colombo, G. Massolini, F. Rinaldi and C. Temporini, Advances on size exclusion chromatography and applications on the analysis of protein biopharmaceuticals and protein aggregates: a mini review. *Chromatographia*, 81, 3–23. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10337-017-3380-5>
- [73] T. Y. Huang, L. M. Chi and K. Y. Chien, Size-exclusion chromatography using reverse-phase columns for protein separation. *Journal of Chromatography A*, 1571, 201–212, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2018.08.020>
- [74] C. Selkirk, Ion-exchange chromatography. In P. Cutler (Ed.), *Protein Purification Protocols. Methods in Molecular Biology*. 2nd ed., Humana Press, pp. 125–131, Totowa, NJ, 2004.
- [75] C. Harscoat-Schiavo, F. Raminoso, E. Ronat-Heit, R. Vanderesse and I. Marc, Modeling the separation of small peptides by cation-exchange chromatography, *Journal of Separation Science*, 33(16), 2447-2457, 2010. <https://doi.org/10.1002/jssc.201000112>
- [76] C. Singh, C. Sharma and P. Kamble Amino acid analysis using ion-exchange chromatography: a review. *International Journal of Pharmacognosy*, 1(12), 756-62, 2014.
- [77] S. Di Palma, M. L. Hennrich, A. J. R. Heck and S. Mohammed, Recent advances in peptide separation by multidimensional liquid chromatography for proteome analysis, *Journal of Proteomics*, 75(13), 3791-3813, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2012.04.033>
- [78] M. Barati, F. Javanmardi, S. M. H. M. Jazayeri, M. Masoumeh Jabbari, J. Jamal Rahmani, F. Farzaneh Barati, H. Hamid Nickho, S. H. Davoodi, N. Roshanravan and A. M. Khaneghah, Techniques, perspectives, and challenges of bioactive peptide generation: A comprehensive systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1488-1520, 2020. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12578>
- [79] M. Cermeño, T. Kleekayai, M. Amigo-Benavent, P. Harnedy-Rothwell and R. J. FitzGerald, Current knowledge on the extraction, purification, identification, and validation of bioactive peptides from seaweed. *Electrophoresis*, 41,1694–1717, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2012.04.033>
- [80] A. Ayala-Niño, G. M. Rodríguez-Serrano, L. G. González-Olivares, E. Contreras-López, P. Regal-López and A. Cepeda-Saez, Sequence identification of bioactive peptides from amaranth seed proteins (*Amaranthus hypochondriacus* spp.). *Molecules*, 24, 3033, 2019. <https://doi.org/10.3390/molecules24173033>
- [81] J. Yang, L. Hu, T. Tiantian Cai, Q. Qiuluan Chen, Q. Qian Ma, J. Jie Yang, C. Meng, J. Hong, Purification and identification of two novel antioxidant peptides from perilla (*Perilla frutescens* L. Britton) seed protein hydrolysates. *PloS One*, 13, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200021>
- [82] M. S. Coelho, S. de Araujo Aquino, J. M. Latorres and M. de las Mercedes Salas-Mellado, In vitro and in vivo antioxidant capacity of chia protein hydrolysates and

- peptides. *Food Hydrocolloids*, 91, 19-25, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.018>
- [83] C. Liu, D. Ren, J. Li, L. Fang, J. Wang, J. Liu and W. Min, Cytoprotective effect and purification of novel antioxidant peptides from hazelnut (*C. heterophylla* Fisch) protein hydrolysates. *Journal of Functional Foods*, 42, 203-215, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.003>
- [84] Z. Karami, S. H. Peighambaroust, J. Hesari, B. Akbari-Adergani and D. Andreu, Antioxidant, anticancer and ACE-inhibitory activities of bioactive peptides from wheat germ protein hydrolysates. *Food Bioscience*, 32, 100450, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100450>
- [85] A. Connolly, M. O'Keefe, A. Nongonierma, C. Piggott and R. FitzGerald, Isolation of peptides from a novel brewers spent grain protein isolate with potential to modulate glycaemic response. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(1):146–53, 2017. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13260>
- [86] A. Kannan, N. S. Hettiarachchy, J. O. L. Lay and R. Iyanage, Human cancer cell proliferation inhibition by a pentapeptide isolated and characterized from rice bran. *Peptides*, 31(9), 1629-1634, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2010.05.018>
- [87] A. Wali, Y. Mijiti, G. Yanhua, A. Yili, H. A. Aisa and A. Kawuli, Isolation and Identification of a Novel Antioxidant Peptide from Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Sprout Protein Hydrolysates. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 27, 219–227, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10989-020-10070-2>
- [88] C. Torres-Fuentes, M. Alaiz and J. Vioque, Affinity purification and characterisation of chelating peptides from chickpea protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 129(2), 485-490, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.103>
- [89] E. González-García, P. Puchalska, M. L. Marina and M. C. García, Fractionation and identification of antioxidant and angiotensin-converting enzyme-inhibitory peptides obtained from plum (*Prunus domestica* L.) Stones. *Journal of Functional Foods*, 19, 376-384, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.08.033>
- [90] R. Vásquez-Villanueva, L. Muñoz-Moreno, M. J. Carmena, M. L. Marina and M. C. García, In vitro antitumor and hypotensive activity of peptides from olive seeds. *Journal of Functional Foods*, 42, 177-184, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.12.062>
- [91] C. Megías, J. Pedroche, M. del Mar Yust, M. Alaiz, J. Girón-Calle, F. Millán and J. Vioque, Purification of angiotensin converting enzyme inhibitory peptides from sunflower protein hydrolysates by reverse-phase chromatography following affinity purification. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 228–232, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf061488b>
- [92] M. Zarei, A. Ebrahimpour, A. Abdul-Hamid, F. Anwar, F. A. Bakar, R. Philip and N. Saari, Identification and characterization of papain-generated antioxidant peptides from palm kernel cake proteins. *Food Research International*, 62, 726-734, 2014. <https://doi.org/10.3390/biom9100569>
- [93] T. Can, Introduction to Bioinformatics. In M. Yousef and J. Allmer (Eds.), *miRNomics: MicroRNA Biology and Computational Analysis*, Springer Science+Business Media, pp. 51–71, 2014.
- [94] T. Madden, The BLAST Sequence Analysis Tool. In J. McEntyre and J. Ostell (Eds.), *The NCBI Handbook* Bethesda (MD): National Center for Biotechnology Information (US), pp. 281, 2002.
- [95] G. Cochrane, I. Karsch-Mizrachi and T. Takagi, The international nucleotide sequence database collaboration. *Nucleic Acids Research*, 44(D1), D48–D50, 2016. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv1323>
- [96] S. Ötleş, B. Bakar and B. Kaplan Türköz, Bioinformatic Analysis. In L.M.L. Nollet and S. Ötleş (Eds.), *Bioactive Peptides from Food: Sources, Analysis, and Functions*, CRC Press, pp. 321-346, 2022.
- [97] A. Iwaniak, M. Darewicz, D. Mogut and P. Minkiewicz, Elucidation of the role of in silico methodologies in approaches to studying bioactive peptides derived from foods. *Journal of Functional Foods*, 61, 103486, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103486>
- [98] A. Iwaniak, M. Darewicz and P. Minkiewicz, Databases of bioactive peptides. In F. Toldrá and J. Wu (Ed.), *Biologically Active Peptides From Basic Science to Applications for Human Health*, Academic Press, pp. 309–330, 2021.
- [99] P. Minkiewicz, A. Iwaniak and M. Darewicz, BIOPEP-UWM database of bioactive peptides: current opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 5978, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20235978>
- [100] T. Panyayai, C. Ngamphiw, S. Tongsimma, W. Mhuanong, W. Limsripraphan, K. Choowongkamon and O. Sawatdichaikul, PeptideDB: A web application for new bioactive peptides from food protein. *Heliyon*, 5(7), e02076, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02076>
- [101] E. Gasteiger, C. Hoogland, A. Gattiker, S. Duvaud, M. R. Wilkins, R. D. Appel and A. Bairoch, Protein Identification and Analysis Tools on the ExPASy Server. In J. M. Walker (Ed.), *The Proteomics*

- Protocols Handbook, Humana Press, pp. 571–607, 2005.
- [102] C. Kartal, B. Kaplan Türköz and S. Otles, Prediction, identification and evaluation of bioactive peptides from tomato seed proteins using in silico approach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14, 1865–1883, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00434-z>
- [103] A. Peredo-Lovillo, A. Hernández-Mendoza, B. Vallejo-Cordoba and H. E. Romero-Luna, Conventional and in silico approaches to select promising food-derived bioactive peptides: A review. *Food Chemistry: X*, 13, 100183, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100183>
- [104] A. Thomas, S. Deshayes, M. Decaffmeyer, M. H. Van Eyck, B. Charlotiaux and R. Bresseur, Prediction of peptide structure: How far are we?. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*, 65(4), 889–897, 2006. <https://doi.org/10.1002/prot.21151>
- [105] R. K. Spencer and J. S. Nowick, A newcomer's guide to peptide crystallography. *Israel Journal of Chemistry*, 55(6-7), 698–710, 2015. <https://doi.org/10.1002/ijch.201400179>
- [106] F. Zhang, N. Adnani, E. Vazquez-Rivera, D. R. Braun, M. Tonelli, D. R. Andes and T. S. Bugni, Application of 3D NMR for Structure Determination of Peptide Natural Products. *The Journal of Organic Chemistry*, 80(17), 8713–8719, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.5b01486>
- [107] T. W. Gräwert and D. I. Svergun, Structural modeling using solution small-angle X-ray scattering (SAXS). *Journal of Molecular Biology*, 432(9), 3078–3092, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2020.01.030>
- [108] J. Verma, V. K. Coutinho and C. Evans, 3D-QSAR in Drug Design - A Review. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 10(1), 95–115, 2010. <https://doi.org/10.2174/156802610790232260>
- [109] A. B. Nongonierma and R. J. Fitzgerald, Learnings from quantitative structure-activity relationship (QSAR) studies with respect to food protein-derived bioactive peptides: A review. *RSC Advances*, 6(79), 75400–75413, 2016. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>
- [110] S. Hellberg, M. Sjöström, B. Skagerberg and S. Wold, Peptide quantitative structure-activity relationships, a multivariate approach. *Journal of Medicinal Chemistry*, 30(7), 1126–1135, 1987. <https://doi.org/10.1021/jm00390a003>
- [111] E. R. Collantes and W. J. Dunn, Amino acid side chain descriptors for quantitative structure-activity relationship studies of peptide analogs. *Journal of Medicinal Chemistry*, 38(14), 2705–2713, 1995. <https://doi.org/10.1021/jm00014a022>
- [112] M. Sandberg, L. Eriksson, J. Jonsson, M. Sjöström and S. Wold, New chemical descriptors relevant for the design of biologically active peptides. a multivariate characterization of 87 amino acids. *Journal of Medicinal Chemistry*, 41(14), 2481–2491, 1998. <https://doi.org/10.1021/jm9700575>
- [113] F. Tian, Y. Lv and L. Yang, Structure-based prediction of protein–protein binding affinity with consideration of allosteric effect. *Amino Acids*, 43(2), 531–543, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00726-011-1101-1>
- [114] E. Atilgan and J. Hu, Efficient protein-ligand docking using sustainable evolutionary algorithms. 2010 10th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, HIS 2010, (pp.113–118), 2010. <https://doi.org/10.1109/HIS.2010.5600082>
- [115] H. Geng, F. Chen, J. Ye and F. Jiang, Applications of Molecular Dynamics Simulation in Structure Prediction of Peptides and Proteins. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 17, 1162–1170, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2019.07.010>
- [116] Y. Zhang, A. N. Aryee and B. K. Simpson, Current role of in silico approaches for food enzymes. *Current Opinion in Food Science*, 31, 63–70, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.11.003>





Kullanıma hazır suda çözünebilir keçiyoynuzu kabuğu tozu üretiminin yanıt yüzey yöntemi ile çift aşamalı optimizasyonu

Dual optimization for instant soluble carob pod powder production by response surface method

Mehmet Şükrü Karakuş¹ , Merve Akalan² , Melike Yücepepe³ , Kamile Bayrak Akay⁴ ,
Asliye Karaaslan⁵ , Bülent Başyigit⁶ , Mehmet Karaaslan^{7,*} 

^{1,2,3,4,6,7} Harran Ömer Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 63300, Şanlıurfa Türkiye

⁵ Harran Üniversitesi, Gıda Teknolojisi Programı, 63300, Şanlıurfa Türkiye

Öz

Bu çalışmada, mikrodalga destekli ekstraksiyon yöntemi kullanılarak keçiyoynuzu kabuğundan elde edilen biyoaktif maddeler (fenolikler) püskürtmeli kurutma tekniği ile çözünür toz forma dönüştürülmüştür. Mikrodalga destekli ekstraksiyon ve püskürtmeli kurutma adımları yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak optimize edilmiştir. Ekstraksiyon aşamasında, solvent sıcaklığının ve ekstraksiyon süresinin toplam fenolik madde miktarı üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Optimum ekstraksiyon koşulları (toplam fenolik madde miktarı: 84.48 mg GAE/g), 55 °C ve 26 dk olarak belirlenmiştir. Nihai toz üretimi için ise maksimum işlem verimi (%48.00) püskürtmeli kurutucu giriş sıcaklığının 184 °C ve akış hızının 8 mL/dk olduğu noktada sağlanmıştır. Son ürünlerdeki fenolik maddelerin varlığı FTIR spektroskopisi ile doğrulanmıştır. Elde edilen tozların toplam fenolik madde miktarı (15.37 mg GAE/g) ve antioksidatif davranışı (DPPH: 0.63 mmol TE/g, ABTS: 0.30 mmol TE/g, FRAP: 0.06 mmol TE/g, CUPRAC: 0.05 mmol TE/g) araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Keçiyoynuzu kabuğu, Mikrodalga destekli ekstraksiyon, Püskürtmeli kurutma, Toplam fenolik madde, Antioksidan kapasite

1 Giriş

Keçiyoynuzu ağacı (*Ceratonia siliqua*) yıl boyunca yapraklarını dökmeyen kseroitik bir bitkidir [1]. Ağaçlar başta Tunus, Cezayir, Fas, İspanya, Portekiz, İtalya olmak üzere Akdeniz ülkelerinde yetiştirilmekte veya doğal olarak gelişim göstermektedirler. Keçiyoynuzu ağacından elde edilen meyveler başta gıda endüstrisi olmak üzere farklı sektörlerde girdi olarak değerlendirilmekte veya bu yönde atılımlar yapılmaktadır. Meyvelerin toplam ağırlığının yaklaşık %80-90'lık kısmını kabuklar (pulp) geriye kalan %10-20'lik bölümünü ise çekirdekler oluşturmaktadır [2]. Keçiyoynuzu meyvesini oluşturan kabuklar ve çekirdekler %50-65 şeker, yaklaşık %11 diyet lifi, %1-5 protein, %1-6 mineral ve %0.2-0.8 yağ fraksiyonlarını içerirler [3]. Meyveler, öğütülüp keçiyoynuzu tozu olarak pazarda kendisine yer bulmuştur. Ayrıca, keçiyoynuzu meyveleri kullanılarak keçiyoynuzu pekmezi ve gamı gibi türev ürünlerde üretilmektedir [4].

Abstract

In this study, bioactive compounds (phenolics) from carob pod were extracted by using microwave assisted extraction method. Spray drying technique was performed for the conversion of the resulting extract into powder form. Microwave assisted extraction and spray drying steps were optimized using response surface methodology. In the extraction stage, the effect of solvent temperature and extraction time on the total phenolic content was evaluated. Optimum extraction conditions (total phenolic content: 84.48 mg GAE/g) were determined as 55 °C and 26 min. For the final powder production, the maximum process yield (48.00%) was obtained at the point where the spray dryer inlet temperature was 184 °C and the flow rate was 8 mL/min. The presence of phenolic structures in final product was verified by FTIR spectroscopy. Total phenolic content (15.37 mg GAE/g) and antioxidative behavior (DPPH: 0.63 mmol TE/g, ABTS: 0.30 mmol TE/g, FRAP: 0.06 mmol TE/g, CUPRAC: 0.05 mmol TE/g) of carob powders were evaluated.

Keywords: Carob pod, Microwave extraction, Spray drying, Total phenolic content, Antioxidant capacity

Diğer bitkisel materyallerden elde edilen özütlerde olduğu gibi keçiyoynuzu meyveleri de biyolojik aktivite sergileme potansiyeli olan özel oluşumları (polifenoller, potasyum, kalsiyum, magnezyum, fosfor, demir, organik asit vb.) yapılarında buldukları bilimsel çalışmalarda rapor edilmiştir [5,6,7]. Bu özel oluşumlar meyvelere antioksidatif, antimikrobiyal ve antidiyabetik gibi özellikler sağlamaktadır. Keçiyoynuzu meyveleri her ne kadar biyolojik özellikler açısından ön plana çıksa da tüketim sıklığı yeterli seviyelerde değildir. Piyasada standart ve/veya doğrudan tüketime yönelik bir ürünün olmaması tüketim noktasındaki problemlerin nedenleri olarak gösterilebilir. Daha önce de bahsedildiği gibi meyveler öğütüldükten sonra süzen poşetlerde veya doğrudan satışa sunulmaktadır. Bu durumda da standardizasyonu sağlamak mümkün değildir. Çünkü nihai ürünlerin eldesinde proses koşulları tüketiciden tüketicieye farklılık göstermektedir. Ayrıca süzen poşetlerde, insan sağlığı üzerine toksik etki gösteren nano ve mikro

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetkaraaslan@harran.edu.tr (Mehmet Karaaslan)

Geliş / Received: 15.11.2022 Kabul / Accepted: 15.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1205063

parçacıkların proses esnasında nihai üründe mevcudiyeti yapılan çalışmalarda not edilmiştir [8]. Belirtilen bu nedenlerden dolayı son yıllarda instant (tüetime hazır) ürünlere olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Literatür çalışmaları da bu yaklaşımı desteklemektedir. Özellikle son 10 yılda bitkisel özütlerin instant forma dönüştürülmesine yönelik çalışmalar artmıştır. Nane [9], *Codonopsis javanica* kökü [10] ve meyan kökü [11] özütleri bunlara örnek olarak verilebilir.

Instant formda ürün eldesi 2 farklı aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşama ilgili materyallerden fonksiyonel yapıların uygun koşullarda özütlenmesini kapsamaktadır. Bu aşamada klasik özütleme yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda çevre dostu tekniklerin kullanımına yadsınamaz derecede bir yönelim vardır. Çevre dostu teknikler arasında da mikrodalga ve ultrason destekli yöntemleri konu alan çok sayıda çalışma olduğu söylenebilir. Bu teknikler çevre dostu olmalarının yanı sıra biyoaktif materyalin izolasyonunda da klasik yöntemlere göre daha efektif olduğu rapor edilmiştir [12,13]. Dolayısıyla instant ürün eldesinin ilk aşamasını inovatif yöntemlerle yürütmek daha makul görülmektedir. İkinci aşama ise elde edilen özütlerin toz forma dönüştürülmesi ile ilgilidir. Bu aşama için de alternatif prosesler olsa da istenilen kaliteye sahip toz ürünlerin eldesinde püskürtmeli kurutma sisteminin başarısını konu alan birçok farklı çalışma literatürde mevcuttur [14,15]. Çalışmalar incelendiğinde, materyallerden elde edilen özütlerin kendine özgü doğası nedeniyle nihai toz ürünlerin üretimin proses şartlarının optimize edildiği görülmektedir. Keçiboynuzu meyvesinin kütlece %50'sini şeker fraksiyonlarının oluşturduğu bilinmektedir. Şeker fraksiyonlarının ise büyük bir kısmı düşük moleküler ağırlığa sahiptir. Düşük moleküler ağırlığa sahip olan bu yapılar püskürtmeli kurutma esnasında tozların yapışmasına neden olarak verimin düşmesine ve arzu edilmeyen özelliklere sahip tozların elde edilmesine neden olur [16]. Efektif bir püskürtmeli kurutma için belirtilen problemlerin üstesinden gelinmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda moleküler ağırlığı yüksek olan kurutma yardımcı materyallerinin sisteme dahil edilmesinin makul olduğu önceki çalışmalarda ortaya konmuştur [17]. Bitkisel özütlerin (lipit fraksiyonları hariç) instant forma dönüştürülmesinde farklı kurutma yardımcı materyalleri kullanılmakla beraber yüksek moleküler ağırlığı, ucuz olması ve çözünürlüğünün yüksek olmasından dolayı maltodekstrin bu alanda ön plana çıkmaktadır [18,19]. Belirtilen durumlardan dolayı bu çalışmada:

- Keçiboynuzu meyve kabuklarından maksimum düzeyde fenolik madde eldesi için mikrodalga destekli özütleme koşullarının yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonuna,
- Optimum koşullarda üretilen özütlerin instant forma dönüştürülmesinde kurutma yardımcı materyali olarak maltodekstrinin kullanılmasına ve püskürtmeli kurutma cihaz şartlarının optimize edilmesine,
- Elde edilen nihai toz ürünlerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesine odaklanılmıştır.

2 Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılmak üzere keçiboynuzları Şanlıurfa'da bulunan yerel bir marketten temin edilmiştir. Keçiboynuzları çekirdeklerinden ayrıldıktan sonra geriye kalan kabuklar bir öğütücü yardımıyla toz haline getirilmiş ve analizlerde kullanılmak üzere +4 °C'de muhafaza edilmiştir. Analizlerde kullanılan tüm kimyasallar analitik safliktadır.

2.2 Keçiboynuzu özütlerinin hazırlanması

Keçiboynuzu kabuğu tozu (10 g) bir cam balona tartıldıktan sonra üzerine 100 mL saf su (1:10, w/v) ilave edilmiştir. Cam balon mikrodalga (Sineo, Mass II Plus, Şangay, Çin) haznesine yerleştirildikten sonra sabit watt (500 W), farklı sıcaklık (25-60 °C) ve sürelerde (1-30 dk) ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda elde edilen özütler 4000 rpm'de 10 dakika santrifüj (Nüve, NF 1200R, Ankara) edildikten sonra filtre kağıdından süzümüştür. Elde edilen filtratlar analiz ve toz üretim adımlarında kullanılmıştır.

2.2.1 Mikrodalga destekli ekstraksiyonun optimizasyonu

Ekstraksiyon aşaması ile ilgili bağımlı ve bağımsız değişkenlere ait alt ve üst sınırlar Tablo 1'de sunulmuştur. Mikrodalga destekli ekstraksiyon işleminde sıcaklık ve süre bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Değişkenlerin toplam fenolik madde miktarı üzerindeki etkileri yanıt yüzey yöntemi kullanılarak merkezi kompozit tasarımı ile değerlendirilmiştir. Deney tasarımı, merkez noktasında 5 tekrar içeren 13 denemeden oluşmaktadır. Tüm işlemler 500 W gücünde gerçekleştirilmiştir.

Saf su ile karıştırılan keçiboynuzu kabuğu tozları, belirlenen sıcaklıkta (25-60 °C) ve sürede (1-30 dk.) mikrodalga cihazının ilgili bölümüne yerleştirilmiştir. İşlem sonunda süpernatant, 4000 rpm'de 10 dk santrifüj edildikten sonra toplanmış ve analizlere kadar -20 °C'de muhafaza edilmiştir.

Tablo 1. Mikrodalga destekli ekstraksiyon optimizasyonuna parametreleri

Faktörler	Parametreler	Seviyeler	
		Düşük (-1)	Yüksek (+1)
Bağımsız değişkenler	A	25	60
	B	1	30
Bağımlı değişkenler	Y ₁	Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)	

2.3 Instant toz üretimi

Optimum koşullarda elde edilen ekstraktların suda çözünebilir kuru madde miktarı (Briks°) 7 g/100 g olacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra ekstraktların içerisine 7 g maltodekstrin eklenmiş ve 12,000 rpm Ultra-Turrax (IKA-T18 Basic, Japonya) ile homojenize edilmiştir. Elde edilen solüsyonlar püskürtmeli kurutma cihazına beslenmiştir.

Püskürtmeli kurutma optimizasyon koşullarına ait bağımlı ve bağımsız değişkenler ile ilgili alt ve üst sınırlar **Tablo 2**'de verilmiştir. Püskürtmeli kurutma giriş sıcaklığı (120-200 °C) ve akış hızı (5-20 mL/dk) bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Deneme tasarımı, 5 merkezi nokta olmak üzere 13 denemeden oluşmaktadır. Belirtilen parametrelerin işlem verimi ve nihai tozların toplam fenolik madde miktarı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Tablo 2. Püskürtmeli kurutma optimizasyon tasarımı için deneysel parametreler

Faktörler	Parametreler	Seviyeler	
		Düşük (-1)	Yüksek (+1)
Bağımsız değişkenler	A	120	200
	B	5	20
Bağımlı değişkenler	Y ₁	Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)	
	Y ₂	Verim (%)	

2.4 Analizler

2.4.1 FTIR spektroskopisi

Analizi, FTIR spektroskopisi (IRTracer-100, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Özüt ve toz numunelere ait geçirgenlik spektrumları, oda sıcaklığında 1 cm⁻¹ çözünürlükte 4000 ile 500 cm⁻¹ dalga boyunda tespit edilmiştir [20].

2.4.2 İşlem verimi

Püskürtmeli kurutma işlem verimi (%), besleme çözeltisinin içerdiği toplam katı madde miktarı ve nihai toz miktarı baz alınarak hesaplanmıştır [21].

2.4.3 Su aktivitesi ve nem miktarı

Örneklerin su aktivite değerleri 25 °C'de bir su aktivite ölçüm cihazı (Aqualab pre, ABD) ile belirlenmiştir. Ölçüm kaplarına 3-5 g örnek konulduktan sonra cihazın okuma bölgesine yerleştirilmiş ve okunan değerler kaydedilmiştir [22].

Keçiyoynuzu tozunun nem içeriği için, 3-5 g numune bir petri kabına tartılmış ve 105 °C'ye ayarlanmış bir etüvde sabit bir ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiş ve sonrasında tartılarak sonuçlar % olarak hesaplanmıştır [23].

2.4.4 Kül tayini

Toz örnek 1-3 gram arasında tartıldıktan sonra sabit tartıma getirilmiş krezelere alınmıştır. Örnek içeren krezeler, sıcaklığı 550 °C'ye ayarlanmış kül fırınının ilgili kısmına konulmuştur. Keçiyoynuzu kabuğu toz numunelerinin içerdiği toplam kül miktarı başlangıç ve son ağırlığından yararlanılarak belirlenmiştir [24].

2.4.5 Islanabilirlik

Islanabilirlik değerini belirlemek için 1 g örnek 100 mL distile su (20 °C) içeren bir behere aktarılıp ve örneklerin yüzeyden kaybolana kadar geçen süre (sn) kaydedilerek hesaplanmıştır [25].

2.4.6 Hausner oranı ve Carr indeksi

Tozun yığın yoğunluğu için, 3 g numunenin tartılmış ve 25 mL'lik cam bir mezüre belirli bir yükseklikten ve hızda aktarılmıştır. Numunenin mezür içerisinde kapladığı ilk

hacim kaydedilmiştir. Daha sonra düz bir zemin üzerinde örnek hacmi sabitlenene kadar mezür manuel olarak vurulmuştur. İşlem sonunda son hacim not edilmiştir. Yığın yoğunluğu (örnek miktarı (g)/ilk hacim (mL)) ve sıkıştırılmış yığın yoğunluğu (örnek miktarı (g)/son hacim (mL)) değerlerinden yararlanılarak Hausner oranı (**Denklem 1**) ve Carr indeksi (**Denklem 2**) hesaplanmıştır [25].

$$\text{Hausner oranı} = \frac{\text{sıkıştırılmış yığın yoğunluğu}}{\text{yığın yoğunluğu}} \quad (1)$$

$$\text{Carr indeksi} = \frac{\text{Sıkıştırılmış yığın yoğunluğu} - \text{yığın yoğunluğu}}{\text{sıkıştırılmış yığın yoğunluğu}} \times 100 \quad (2)$$

2.4.7 Çözünürlük

Numuneler saf su (1:10 w/v) ile karıştırıldıktan sonra 1 s oda sıcaklığında bekletilmiş ve 4500 rpm'de 10 dk santrifüjlenmiştir. Süre sonunda süpernatant toplanmış, 24 s 70 °C'de etüvde kurutulmuş ve tartılmıştır [26].

2.4.8 Renk

Numunelerin rengi, HunterLab, (Color Quest® XE, ABD) kolorimetresi kullanılarak CIE L*, a* ve b* cinsinden ölçülmüştür [27]. C* (renk yoğunluğu) (**Denklem 3**) ve h° (ton açısı) (**Denklem 4**) değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir.

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (3)$$

$$h^{\circ} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (4)$$

2.4.9 Toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasite

Toz numuneler (0.5 g) distile su içerisinde (10 mL) tamamen çözündürüldükten sonra toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasite analizlerinde kullanılmıştır.

Toplam fenolik madde miktarı, Folin-Ciocalteu reaktifi kullanılarak ölçülmüştür [28]. Kısaca, 0.4 mL seyreltilmiş örnek, 2 mL seyreltilmiş Folin-Ciocalteu reaktifi (1:9 v/v) ve 1.6 mL Na₂CO₃ (%7.5, w/v) karıştırılmıştır. Karanlık bir yerde oda sıcaklığında 60 dk'lık inkübasyon süresinden sonra karışımların absorbansları spektrofotometre (Model UV-1280, Shimadzu, Kyoto, Japonya) kullanılarak 765 nm'de ölçülmüştür. Sonuçlar, g numune başına mg gallik asit eşdeğeri (mg GAE/g) olarak ifade edilmiştir.

Numunelerin antioksidan kapasite değerleri, 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), 2,2'-azino-bis-3-etilbenzotiazolin-6-sülfonik asit (ABTS), Bakır indirgeyici antioksidan kapasitesi (CUPRAC) ve Ferrik indirgeyici antioksidan kapasitesi (FRAP) yöntemleri ile belirlenmiştir.

DPPH yönteminde, 3.9 mL 25 mg/L metanolik DPPH solüsyonu ve 0.1 mL seyreltilmiş örnekler ile karıştırılmıştır. Karanlık bir ortamda 30 dk'lık inkübasyondan sonra örneklerin absorbans değerleri spektrofotometre kullanılarak 515 nm'de okunmuştur [29].

ABTS yöntemi için, 2.46 mM potasyum peroksidisülfat içeren ABTS radikal çözeltisi, 734 nm'deki absorbans değeri 0.700±0.02'e ulaşana kadar fosfat tamponu (pH 7.6) ile seyreltilmiştir. Daha sonra bu solüsyon (2000 µL) 50 µL

seyreltilmiş örnekler ile karıştırılmış ve 6 dakikalık inkübasyondan sonra absorbans değerleri 734 nm okunmuştur [29].

CUPRAC analizinde, 1 mL amonyum tampon çözeltisi (1.0 M), 1 mL L etanolik neocuproin çözeltisi (7.5×10^{-3} M) ve 1 mL CuCl_2 çözeltisi (0.01 M) içeren test tüpüne 0.1 mL seyreltilmiş örneklerden ilave edilmiştir. Daha sonra son hacimler saf su ile 4.1 mL'ye tamamlanmıştır. Absorbanslar, 30 dakikalık inkübasyondan sonra 450 nm'de UV-VIS spektrofotometresi ile ölçülmüştür [30].

FRAP antioksidan yönteminde ise Benzie ve Strain (1996) tarafından belirlenen yöntem kullanılmıştır [31]. FRAP reaktifi (30 mM $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$, 10 mM TPTZ, 20 mM FeCl_3) (2850 μL) ile örnekler (150 μL) karıştırılmıştır. Oda sıcaklığında 30 dk'lık inkübasyondan sonra, absorbans değerleri 593 nm'de ölçülmüştür.

DPPH, ABTS, CUPRAC ve FRAP antioksidan kapasite değerleri g başına mmol troloks eşdeğeri (TE) olarak verilmiştir.

2.5 İstatistiksel analizler

Analizler üç tekrar halinde yapılmış ve sonuçlar ortalama±standart sapma olarak ifade edilmiştir. Ortalamalar arasındaki farklar, tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve Tukey çoklu karşılaştırma testi kullanılarak %95 güven düzeyinde belirlenmiştir. Datalar Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) yazılımı (Windows için sürüm 22.0, SPSS Inc., Chicago, IL, ABD) kullanılarak yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Mikroalga destekli ekstraksiyon şartlarının optimizasyonu

Literatürde yer alan çalışmalarda farklı metotlar kullanılarak keçiyoynuzu kabuklarından fenolik yapıların eldesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Maserasyon, infüzyon, kaynatma ve soxhlet ekstraksiyonu dahil olmak üzere çeşitli geleneksel özütlenme yöntemleri günümüze kadar kullanılan yöntemlerdendir. Bu klasik teknikler genellikle zaman alıcıdır, nispeten büyük miktarlarda çözücü gerektirirler. Nihai özüt içerisinde yer alan aktif bileşenler, uzun işlem süreleri ve kullanılan yüksek sıcaklıklar nedeniyle bozulabilmekte veya oksitlenebilmektedir [32]. Farklı çalışmalarda fenolik bileşen veriminin en yüksek olduğu nokta baz alınarak denemeler yürütülmüş ve yürütülmeye de devam edilmektedir. Bu bağlamda ekstraksiyonda işlem sıcaklığı, süresi ve çözgen tipi/oranı gibi farklı parametreler ile işlem gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin fenolik bileşenlerin eldesinde etkili olduğu tespit edilmiştir [32,33]. Aseton ve metanol gibi toksik çözümlere ve uzun işlem sürelerine alternatif olarak günümüzde mikroalga destekli ekstraksiyon, ultrason destekli ekstraksiyon, süper kritik sıvı ekstraksiyonu ve basınçlı sıvı ekstraksiyonu gibi metotlar kullanılmaya başlanmıştır. Mikroalga destekli ekstraksiyonun ana avantajlarından biri, geleneksel ekstraksiyon yöntemlerine kıyasla işlem süresinin önemli ölçüde azalması ve yüksek aktif madde verimidir [34]. Mikroalga destekli ekstraksiyonda biyoaktif madde verimi, sıcaklık, güç verimi ve işlem süresi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu

nedenle uygun çalışma koşullarının belirlenebilmesi için optimizasyon işleminin yapılması gerekmektedir [35]. Yanıt yüzey metodolojisi, çok değişkenli denklemi belirlemek veya aynı anda çözmek için uygun bir deneysel tasarımdan nicel verileri kullanan istatistiksel bir yöntemdir. Yanıt yüzey metodolojisi daha sonra matematiksel bir model oluşturabilmekte ve deneylerin sayısını en aza indirirken değişkenler arasındaki olası ilişkileri de hesaba katabilmektedir [36]. Bu çalışmada mikroalga destekli ekstraksiyon için literatür verileri göz önüne alınarak işlem sıcaklığı (25-60 °C) ve süresinin (1-30 dk), toplam fenolik madde miktarı üzerine etkileri merkezi kompozit tasarımı ile yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak araştırılmıştır. Oluşturulan deney tasarımına göre 5 merkez noktadan oluşan 13 deneme gerçekleştirilmiştir. Deneysel plan ve sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Toplam fenolik madde miktarının 46.89 ile 84.48 mg GAE/g değerleri arasında değiştiği belirlenmiştir. Toplam fenolik madde miktarındaki bu değişimin sıcaklık ve süreden etkilendiği tespit edilmiştir. Sıcaklık ve süre arttıkça toplam fenolik madde miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Mikroalga destekli fenolik bileşen ekstraksiyonuna ait merkezi kompozit tasarım ve yanıtlar

Denemeler	Bağımsız değişkenler		Bağımlı Değişken Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)
	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	
1	42.50	30.00	69.98
2	25.00	15.50	46.89
3	30.13	5.25	50.30
4	42.50	15.50	68.56
5	42.50	15.50	64.93
6	60.00	15.50	77.26
7	42.50	15.50	60.87
8	42.50	15.50	64.38
9	54.87	5.25	70.41
10	30.13	25.75	54.01
11	42.50	1.00	49.56
12	54.87	25.75	84.48
13	42.50	15.50	62.13

Optimizasyon çalışmasına ait model istatistik sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Modeli belirlerken istatistiksel veriler (R^2_{Adj} : düzeltilmiş belirleme katsayısı, $P-R^2$: tahmini belirleme katsayısı, p değeri ve uyum eksikliği) göz önünde bulundurulmuştur. Verilen parametrelerden R^2_{Adj} ve $P-R^2$ değerlerinin birbiri ile uyumunun en yüksek, p değerinin önem derecesinin yüksek ve uyum eksikliğinin 0.05'ten büyük değere sahip olması modelin seçiminde belirleyici rol oynamıştır. Tablo 4 incelendiğinde R^2_{Adj} ve $P-R^2$ değerlerinin 2FI, kuadratik ve kübik modellerde arzu edilene uymayan, birbirileri ile uyumsuz olduğu; ayrıca p değerinin önem derecesinin kuadratik ve kübik modellerde daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Lineer dışındaki modeller deneysel plana uygulandığında program üzerinde yapılan değerlendirmeler sonucunda ilgili model ile devam edilmesi durumunda veri kayıplarının meydana gelebileceği ve bu kayıplardan dolayı elde edilen sonuçlar ile çizilecek grafiklerin uyumsuz olabileceği belirlenmiştir.

Tablo 4. Keçi-boynuzu kabuğundan mikrodalga destekli fenolik bileşen ekstraksiyonu ile ilgili model istatistik sonuçları

Bağımlı değişken	Modeller	Standart sapma	R ²	R ² _{Adj}	P-R ²	p-değeri	Uyum eksikliği
Toplam fenolik madde miktarı	Lineer	3.54	0.9161	0.8993	0.8412	<0.0001*	0.3119
	2FI	3.30	0.9341	0.9121	0.8366	<0.0001*	0.3701
	Kuadratik	3.54	0.9412	0.8992	0.7118	0.0004**	0.2547
	Kübik	3.61	0.9564	0.8953	-0.3276	0.0040***	0.1372

2FI: Etkileşimli (Interactive); * $p<0.0001$; ** $p<0.01$; *** $p<0.05$.

Model istatistik sonuçlarına göre bu çalışmada bağımlı değişken olan toplam fenolik madde miktarını açıklamak için en uygun modelin lineer model olduğu saptanmıştır. Bağımsız değişken olan işlem sıcaklığı ve süresinin toplam fenolik madde miktarına olası etkilerini istatistiksel boyutta gösterebilmek için varyans analizi (ANOVA) sonuçları ele alınmıştır. İlgili varyans analizi sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. Hem işlem sıcaklığının ($p<0.001$) hem de işlem süresinin ($p<0.01$) toplam fenolik madde miktarı üzerinde istatistiksel olarak önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Keçi-boynuzu kabuğundan mikrodalga destekli fenolik bileşen ekstraksiyonu ile ilgili model katsayıları ve varyans analizi (ANOVA) sonuçları

Model katsayıları/değer	Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)
β_0	63.37*
Lineer	
β_1 (Sıcaklık)	11.69*
β_2 (Süre)	5.83**

Model denklemi: Toplam fenolik madde miktarı = $\beta_0 + \beta_1(\text{Sıcaklık}) + \beta_2(\text{Süre})$, * $p<0.0001$; ** $p<0.01$.

İstatistiksel sonuçlardan yola çıkarak keçi-boynuzu kabuğu tozundan fenolik madde ekstraksiyonu için işlem sıcaklığının 55 °C ve işlem süresinin 26 dk olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar (84.48 mg GAE/g) ve teorik (80.89 mg GAE/g) veriler arasında istatistiksel bir fark tespit edilmemiştir. Bu aşamadan sonra çalışmada optimum koşullarda elde edilen keçi-boynuzu özütü, kurutma yardımcı maddesi maltodekstrin kullanılarak, püskürtmeli kurutma cihazına beslenmiş ve kurutma koşulları sistematik yaklaşımlar optimize edilmiştir.

3.2 Püskürtmeli kurutma işlem şartlarının optimizasyonu

İstant toz üretimi, bitkisel özlerin biyoaktif bileşiklerinin stabilizasyonunu sağlamak için hava akımı, bağıl nem ve yüksek sıcaklık gibi fonksiyonelliklerini ve biyoyararlılıklarını azaltan olumsuz gıda işleme parametrelerine karşı kullanılan etkili yöntemlerdendir [37]. Bu işlemde biyoaktif bileşiklerini korumak için kurutma yardımcı malzemesi olarak proteinler, karbonhidratlar ve lipidler gibi çeşitli maddeler kullanılmaktadır [38]. Maltodekstrin, asit hidroliz yöntemi ile mısır nişastasından elde edilmektedir. Piyasada bol miktarda bulunması, uygun maliyetli olması ve suda iyi çözünerek kurutma işlemi sırasında aglomerasyon gibi dezavantajların önüne geçmesi

nedeniyle kurutma yardımcı materyali olarak çok sık kullanılmaktadır [39]. Püskürtmekle kurutma teknolojisi, oksijen, ısı ve ışık gibi parametrelere duyarlı biyoaktif bileşenleri muhafaza etmek için kullanılan yaygın bir yaklaşımdır [40]. Ancak püskürtmekle kurutma yöntemi kullanılarak kurutulan toz ürünlerin fonksiyonel ve fiziko-kimyasal özellikleri giriş hava sıcaklığı ve besleme akış hızı gibi değişkenlere bağlıdır [41]. Bu nedenle yüksek verim ve kaliteli nihai toz ürün elde edebilmek için kurutma şartlarının optimize edilmesi gerekmektedir [42]. Çalışmanın ikinci aşamasında keçi-boynuzu özütü kurutma şartları literatür verileri göz önünde bulundurularak kurutma sıcaklığı (120-200 °C) ve besleme akış hızının (5-20 mL/dk), toplam fenolik madde miktarı ve verim üzerine etkileri yanıt yüzey metodolojisi kullanılarak merkezi kompozit tasarımı ile belirlenmiştir. Deneysel planı ve sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Toplam fenolik madde miktarının 96.24 ile 135.44 mg GAE/g ve verimin %1.66 ile %47.58 değerleri arasında değiştiği belirlenmiştir.

Tablo 6. Püskürtmeli kurutma sistemine ait merkezi kompozit tasarım ve yanıtlar

Denemeler	Bağımsız değişkenler		Bağımlı Değişken	
	Sıcaklık (°C)	Akış hızı (mL/dk)	Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)	Verim (%)
1	160.00	12.50	102.94	24.99
2	160.00	12.50	135.44	28.10
3	160.00	12.50	116.93	25.84
4	160.00	5.00	98.82	47.27
5	188.28	7.20	108.23	47.58
6	200.00	12.50	121.89	46.97
7	131.72	7.20	104.49	36.75
8	160.00	12.50	122.31	25.10
9	120.00	12.50	93.11	17.32
10	160.00	20.00	96.24	4.28
11	131.72	17.80	97.58	1.66
12	188.28	17.80	119.44	18.89
13	160.00	12.50	112.52	23.99

Püskürtmekle kurutma işleminin model istatistik sonuçları Tablo 7'de gösterilmiştir. Deneysel veriler sonucunda sıcaklık ve akış hızının, toplam fenolik madde miktarı üzerine etkisinin önemsiz olduğu tespit edilmiş ($p>0.05$) ve

bu nedenle optimum noktanın belirlenmesinde hedef bağımlı değişken olarak sadece verim (%) kullanılmıştır.

Tablo 7. Keçi-boynuzu kabuğu özütünden püskürterek kurutma optimizasyonu ile ilgili model istatistik sonuçları

Bağımlı değişken	Modeller	Standart sapma	R ²	R ² _{Adj}	P-R ²	p-değeri	Uyum eksikliği
Verim (%)	Lineer	3.36	0.9577	0.9493	0.9133	<0.0001*	0.0382
	2FI	3.37	0.9616	0.9488	0.9040	<0.0001*	0.0344
	Kuadratik	2.66	0.9814	0.9680	0.8873	<0.0001*	0.0643
	Kübik	2.22	0.9908	0.9779	0.6335	<0.0001*	0.0658

2FI: Etkileşimli (Interactive); *p<0.0001.

Nihai toz üründe verim (%) sonuçları göz önüne alınarak optimum noktanın belirlenmesi için uygun model tespit edilmiştir. Modeli belirlerken istatistiksel veriler (R²: belirleme katsayısı, R²_{Adj}: düzeltilmiş belirleme katsayısı, P-R²: tahmini belirleme katsayısı ve uyum eksikliği) dikkate alınmıştır.

Modellemelerde uyum eksikliği değerinin 0.05'ten büyük olması istenmektedir. Tablo 7'deki sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda lineer ve 2FI modellerinde uyum eksikliği değerlerinin 0.05'ten küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle lineer ve 2FI modelleri çalışma için uygun bulunmamıştır. Kuadratik ve kübik modeller uyum eksikliği verilerine göre değerlendirildiğinde, ikisi de çalışma için uyumlu modellerdir. Bu gibi durumlarda model seçilirken denklem derecesinin daha düşük olması tercih edilmektedir. Çünkü denklem derecesinin düşük olması temsil ettiği ilgili yanıt değerlerinin hata payını azaltmaktadır. Kayıpları daha minimize etmek amacıyla denklem derecesi düşük olan kuadratik model seçilmiştir.

Optimizasyon parametrelerinden bağımsız değişkenlerin (işlem sıcaklığı ve besleme hızı) verim (%) üzerine muhtemel etkileri istatistiksel boyutta varyans analizi (ANOVA) ile incelenmiştir. Tablo 8'de varyans analizi sonuçları yer almaktadır. Kurutma sıcaklığı ve akış hızı parametrelerinin (p<0.001); ayrıca sıcaklık x sıcaklık etkileşiminin (p<0.05) verim (%) üzerinde istatistiksel olarak önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8. Keçi-boynuzu kabuğu özütünden püskürterek kurutma optimizasyonu ile ilgili model katsayıları ve varyans analizi (ANOVA) sonuçları

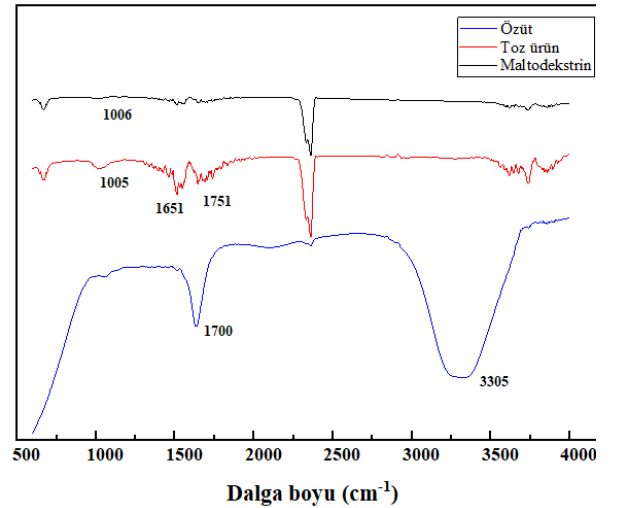
Model katsayıları/değer	Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)
β_0	25.60*
Lineer	
β_1 (Sıcaklık)	8.75*
β_2 (Akış hızı)	-15.57*
Etkileşimli	
β_{12} (Sıcaklık × Akış hızı)	1.60
İkinci derece	
β_{11} (Sıcaklık × Sıcaklık)	2.59***
β_{22} (Akış hızı × Akış hızı)	-0.60

Model denklemi: Toplam fenolik madde miktarı = $\beta_0 + \beta_1(\text{Sıcaklık}) + \beta_2(\text{Akış hızı}) + \beta_{12}(\text{Sıcaklık} \times \text{Akış hızı}) + \beta_{11}(\text{Sıcaklık} \times \text{Sıcaklık}) + \beta_{22}(\text{Akış hızı} \times \text{Akış hızı})$ *p<0.001; ***p<0.05.

İstatistiksel sonuçlar doğrultusunda, hava giriş sıcaklığının 184 °C ve akış hızının 8 mL/dk olduğu nokta püskürtmeli kurutma aşaması için optimum koşullar olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar (%50.35) ile teorik (%48.00) değerler arasında istatistiksel olarak fark tespit edilmemiştir. Optimum noktada elde edilen toz örnekler karakterize edilmiştir.

3.3 FTIR spektrumları

Maltodekstrinin, keçi-boynuzu kabuğu özütünün ve nihai tozun spesifik grupları FTIR spektrumları ile incelenmiştir. Örnekler için FTIR spektrumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Maltodekstrinin, keçi-boynuzu kabuğu özütünün ve toz ürünlerin FTIR spektrumları

Şekil 1 incelendiğinde yaklaşık 3305 cm⁻¹ dalga boyunda görülen nispeten geniş ve yayvan pik özütteki sulu fazdan gelen -OH (hidroksil) gruplarının germe titreşiminden kaynaklanmaktadır. Literatürde farklı özütlerde ve maltodekstrinde de bu dalga sayısında yer alan benzer pikler mevcuttur ve direkt olarak hidroksil grupları nedeniyle meydana geldiği rapor edilmiştir [43]. Püskürterek kurutma sonucunda toz örneklerin spektrumunda bandın genişliğinde ve yayvanlığında büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu fenomen su buharının kurutma sırasında üründen ayrılması ile ilişkilendirilmiş ve arzu edilen kurutma işleminin gerçekleştiğini göstermiştir [44]. Literatürde fenolik bileşiklerle ilişkili birçok fonksiyonel grup olduğu ve bunların çeşitli dalga boylarında pik gösterdiği yer almaktadır [45]. Daha önce, fenolik asitlerin sırasıyla

aromatik altı halkalı, metoksil grubu ve karboksilik asitleri içeren üyeleri sırasıyla 700-1640 cm⁻¹, 950-1470 cm⁻¹ ve 1630-1755 cm⁻¹ aralıklarıyla tanımlandığı bildirilmiştir [46]. Özütte 1700 cm⁻¹, nihai toz üründe 1651 ve 1751 cm⁻¹ tepe noktalarında elde edilen pikler doğrudan fenolik bileşikler ile ilişkilendirilebilir. Bu pikler keçiyoynuzu ile yapılan mevcut çalışmalarla benzerlik göstermiş [47]. Ayrıca nihai toz ürünlerde 1005 cm⁻¹ dalga boyunda bulunan pik maltodekstrinden (1006 cm⁻¹) kaynaklanmakta olup instant toz ürün üretim işleminin başarıyla gerçekleştiğini göstermiştir. Mevcut yaklaşım daha önceki çalışmalarda da not edilmiştir [43].

3.4 Fizikokimyasal özellikler

Keçiyoynuzu kabuğu tozuna ait fizikokimyasal analiz sonuçları Tablo 9'da verilmiştir. İşlem verimi, kurutma işleminden sonra elde edilen toz kütlelerinin toplam katı madde ağırlığına oranı olarak ifade edilmektedir. Yüksek verim, maliyeti düşürdüğünden dolayı gıda sektörü için önemli bir parametredir. Genel olarak işlem veriminin düşük olmasındaki en büyük etken yapışkanlık sorunudur [48]. Çalışmada yapılan ön denemelerde maltodekstrin kullanmadan optimum noktada üretilen özütler toz haline getirilmeye çalışılmış fakat yüksek şeker içeriğine bağlı düşük molekül ağırlığından dolayı verim elde edilememiştir. Bu nedenle yüksek molekül ağırlığına sahip maltodekstrin ile kurutulmuş bu sorun çözüme kavuşturulmuş ve instant toz ürün elde edilmiştir. Püskürtmeli kurutma işleminin başarılı sayılabilmesi için kurutma işleminin %50'den fazla ürün verimine sahip olması gerektiği vurgulanmıştır [49]. Örneğin verim oranı %50.35 olarak tespit edilmiştir. Ali ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada keçiyoynuzu meyve suyu tozunun verimini en düşük %35.71, en yüksek ise %83.33 aralığında belirlemişlerdir [50].

Düşük nem içeriğine sahip ürünler, mikrobiyolojik açıdan güvenli sayılmakta ve uzun süre muhafaza edilebilmektedir. Püskürterek kurutulmuş tozların düşük nem içerikleri, suyun hareket etme kabiliyetini sınırlamakta ve bu nedenle, depolama sırasında tozun topaklaşmasını engellemektedir [51]. Yapılan çalışmada optimum noktada üretilen tozun nem içeriği %3.88 olarak tespit edilmiştir (Tablo 9). Keçiyoynuzu ile ilgili yapılan farklı çalışmalarda elde edilen nem içerikleri %2.20-%6.83 arasında değiştiği rapor edilmiştir [4,16,50].

Su aktivitesi, gıdada biyokimyasal reaksiyonlardan sorumlu ve gıdanın mikrobiyal stabilitesini belirlemek için önemli bir indeks olan mevcut serbest suyu ölçmektedir. Su aktivitesi 0.6'dan az ise gıda mikrobiyolojik açıdan stabil kabul edilmektedir [52]. Bu çalışmada elde edilen instant keçiyoynuzu tozuna ait su aktivitesi değeri 0.20 olarak tespit edilmiştir (Tablo 9). Elde edilen örneğin su aktivite değeri, kritik su aktivite değerlerinin altında olduğundan mikrobiyolojik, enzimatik ve enzimatik olmayan bozulmalara karşı stabil bir ürün olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar Akkaya ve ark., (2012) tarafından da rapor edilmiştir [16]. Buna karşın, yapılan bir başka çalışmaya ait su aktivitesi değerleri mevcut çalışmada elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu bildirilmiştir [4].

Bu çalışmada nihai tozların toplam kül miktarı %0.17 olarak belirlenmiştir (Tablo 9). Düşük kül miktarı nihai ürünlerdeki maltodekstrinin varlığı ile ilişkilendirilebilir.

Islanabilirlik değeri, çözünmenin öncüsü olarak birçok uygulamada önemli bir rol oynamaktadır. Genel olarak, katı yüzeylerin ıslanabilirliği, ilgili sıvının belirli bir katı yüzey üzerinde oluşturduğu açığa dayanarak ölçülmektedir [53]. Numunenin ıslanabilirlik değeri 80.50 sn olarak tespit edilmiştir (Tablo 9). Püskürtmeli kurutma sıcaklığına bağlı farklı gözenekli partiküllerin oluşumu ve solventin yüzey alanından tozların içine nüfuz etmesi ıslanabilirlik süresinin değişmesine neden olmaktadır [54,55]. Dut yapraklarından elde edilen kullanıma hazır çayın ıslanabilirlik değerleri en düşük 75.76 sn ve en yüksek ise 93.39 sn olarak tespit edilmiştir [15].

Carr indeksi değeri bir tozun akışkanlığını, Hausner oranı ise yapışkanlığı ifade etmektedir. Carr indeksi değerleri 10'dan ve Hausner oranı değerlerinin ise 1.11'den küçük olması çok iyi akışı ifade etmektedir. Buna karşın 38'den büyük Carr indeksi değeri ve 1.60'dan büyük Hausner oranı çok zayıf akışı ifade etmektedir [56]. Bu çalışmada instant keçiyoynuzu tozunun Carr indeksi ve Hausner oranı değerleri sırasıyla 39.00 ve 1.47 olarak saptanmıştır (Tablo 9). Elde edilen toz ürünün çok zayıf akış özelliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. *Melisa officinalis L.*'den elde edilen çözünür çay üretimi üzerine yapılan çalışmada Carr indeksi değerinin 39.10-41.00 aralığında olduğu rapor edilmiştir [57].

Düşük çözünürlük değeri ürün kullanımını sınırlandırmaktadır [58]. Çözünürlük değeri incelendiğinde numunenin yüksek çözünürlüğe (%95.24) sahip olduğu bulunmuştur (Tablo 9). Bu durum, kurutma yardımcı malzemesinin (maltodekstrin) özelliklerine, nihai ürünün düşük nem içeriğine ve yapışkanlığına atfedilebilir [14,15]. Çalışma ile ilgili yeterli literatür bilgisi bulunmadığından dolayı sonuçlar farklı hammaddelerden elde edilen kullanıma hazır (instant) ürünlerle kıyaslanmıştır. Benzer çalışmalarda, instant ürünler için yüksek çözünürlük değerleri bildirilmiştir. Dağ çayı suyu özütünün farklı taşıyıcılar kullanılarak kurutulduğu çalışmada çözünürlük değerleri %98.5-%99.5 aralığında olduğu rapor edilmiştir [59]. Kullanıma hazır çözünür çay üretimi üzerine yapılan başka bir çalışmada ise çözünürlük değerleri %92.40-95.60 arasında değiştiği bildirilmiştir [57].

Tablo 9. Keçiyoynuzu kabuğu tozunun fizikokimyasal özellikleri

Analizler	Keçiyoynuzu tozu
Verim (%)	50.35±1.72
Su aktivitesi (aw)	0.20±0.00
Nem içeriği (%)	3.88±0.05
Toplam kül miktarı (%)	0.17±0.00
Islanabilirlik	80.50±2.12
Carr indeksi	39.00±1.41
Hausner oranı	1.47±0.04
Çözünürlük (%)	95.24±0.82

3.5 Renk

Renk, ürünün tüketici tarafından kabul edilebilirliği için önemli bir faktördür. Keçiboynuzu tozu, tatlandırıcı, renklendirici etkileri ve geliştirilmiş nihai ürün özellikleri ile gıda endüstrisinde kullanılabilir. Keçiboynuzu kabuklarından mikrodalgada destekli ekstraksiyon sonrasında püskürtmeli kurutma tekniği ile toz forma getirilen örneklerin renk özellikleri Tablo 10'da verilmiştir. Toz örneğin L* (açıklık-koyuluk), a* (kırmızı-yeşil), b* (sarı-mavi), C* (renk doygunluğu) ve h° (ton açısı) değerleri sırasıyla 84.11, 1.91, 16.48, 16.58 ve 92.67 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen instant ürünün rengi, kabuktaki pigmentlerin kendine has renginden kaynaklanmaktadır. Keçiboynuzu kabuklarından elde edilen tozların mikrodalgada kurutulmasıyla L*, a*, b* değerlerinin sırasıyla 42.84, 10.02, 17.76 olduğu bildirilmiştir [4]. Renk değerlerindeki farklılığın sebebi olarak kurutma tekniği ve nihai ürünlerde maltodekstrinin varlığı gösterilebilir. Püskürtmeli kurutma tekniği ile kurutulmuş toz ürünlerin renk özelliklerinin kurutma sıcaklığı ve maltodekstrin oranına bağlı olduğu bildirilmiştir [60]. Literatürde instant keçiboynuzu ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. *Melissa officinalis L.* bitkisinden özütlenen instant çözümler için L*, a*, b* değerlerinin sırasıyla 75.0, 4.69, 24.4 olduğu, püskürtmeli kurutmanın hava giriş sıcaklığının melisa mikrokapsüllerinin rengini etkilemediği bildirilmiştir [57].

Tablo 10. Keçiboynuzu kabuğu tozunun renk özellikleri

Renk parametreleri	Keçiboynuzu kabuğu tozu
L*	84.11±0.52
a*	1.91±0.05
b*	16.48±0.26
C*	16.58±0.27
h°	92.67±0.07

3.6 Toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasite

Son yıllarda yapılan birçok çalışma, fonksiyonel gıdaların üretiminde kullanılan keçiboynuzu tozu katkılı ürünlerin fonksiyonelliğini ortaya koymaktadır. Keçiboynuzu kabuğunda bulunan toplam fenolik madde miktarının ve antioksidan kapasitenin bilinmesi, gıda kalitesinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Fenolik bileşikler, bitkilerde bulunan, gıdalarda oluşabilecek lipid peroksidasyonunu önlemek amacıyla sentetik antioksidanlara alternatif olarak ilgi gören ikincil metabolitler olarak bilinmektedir. Gıda özütlerinde toplam fenolik madde miktarının belirlenmesi, antioksidan kapasitenin değerlendirilmesinde yol gösterir [61]. Instant tozların toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasiteleri Tablo 11'de sunulmuştur. Instant keçiboynuzu kabuğu özütünün toplam fenolik madde miktarı, gallik asit eşdeğeri cinsinden hesaplanarak 15.37 mg GAE/g olduğu belirlenmiştir. Literatürde keçiboynuzu kabuğundan elde edilen toz ürünlerde bulunan fenolik madde miktarı üzerine çalışmalar bulunmaktadır [61,62]. Fakat keçiboynuzu kabuğu özütlerinden elde edilen instant toz ürünle ilgili

çalışma bulunmamaktadır. Çalışma sonuçları farklı hammaddelerden elde edilen kullanıma hazır ürünler ile kıyaslanmıştır.

Tablo 11. Toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan kapasite sonuçları

Analizler	Keçiboynuzu kabuğu tozu
Toplam fenolik madde miktarı (mg GAE/g)	15.37±0.32
DPPH (mmol TE/g)	0.63±0.00
ABTS (mmol TE/g)	0.30±0.02
FRAP (mmol TE/g)	0.06±0.00
CUPRAC (mmol TE/g)	0.05±0.00

Toplam fenolik madde miktarı, instant meyan kökü çayı için 8.09-9.09 mg GAE/g [11] ve *Melissa officinalis L.* özütünden elde edilen instant çözümler için 6.36 mg GAE/100 g olduğu rapor edilmiştir [57]. Sonuçlar, keçiboynuzu kabuğunun fenolik madde kaynağı olarak ön plana çıktığını göstermiştir.

Serbest radikallerin neden olduğu hasarlar kanser, alzheimer ve kardiyovasküler gibi hastalıklara neden olduğu bilinmektedir. Antioksidanlar, serbest radikallerin neden olduğu hasarları önleyerek serbest radikal süpürücü görevi görürler. Antioksidanların oksidatif etkileri farklı mekanizmalar ile gerçekleşmektedir [63]. Bu çalışma kapsamında toz numunenin antioksidan kapasite özelliklerini değerlendirmek amacıyla 4 farklı tayin yönteminden yararlanılmıştır. Toz ürünün serbest radikal süpürücü aktivitesi DPPH ve ABTS ile, indirgeme gücü aktivitesi ise FRAP ve CUPRAC analizleri ile değerlendirilmiştir. Tüm yöntemler için sonuçlar mmol TE/g olarak Tablo 11'de verilmiştir. DPPH, ABTS, FRAP ve CUPRAC analizleri için sonuçlar sırasıyla 0.63 mmol TE/g, 0.30 mmol TE/g, 0.06 mmol TE/g, 0.05 mmol TE/g olarak bulunmuştur. Literatürde keçiboynuzu kabuğundan elde edilen toz ürünlerde bulunan antioksidan kapasite özellikleri üzerine çalışmalar bulunmaktadır [64,65]. Fakat keçiboynuzu kabuğu özütlerinden elde edilen instant toz ürünlerin antioksidan kapasiteleri ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Çalışma sonuçları farklı hammaddelerden elde edilen instant toz ürünler ile kıyaslanmıştır. Meyan bitkisinin köklerinden klasik ekstraksiyon sonrası elde edilen özütlerin kurutmaya yardımcı materyal olarak maltodekstrin kullanılan çalışmada, püskürtmeli kurutucu ile elde edilen instant toz ürünün depolama süresince antioksidan kapasitesinin (DPPH radikal süpürme aktivitesi) 44.78-51.27 TE/g olduğu bildirilmiştir [11]. *Melissa officinalis L.* fenolik ekstraksiyonu sonrası elde edilen özütün püskürtmeli kurutucu ile mikroenkapsüle edilmesi sonucunda instant çözümler için elde edilmiştir ve 9.19 mg TE/100 g ABTS radikal süpürme aktivitesi gösterdiği bildirilmiştir [57]. Nane özütlerinin biyoaktif bileşenlerinin özütlenerek püskürtmeli kurutucu ile kurutulup toz haline getirilen instant ürünün 190 mg TE/g ABTS radikal süpürme aktivitesi gösterdiği bildirilmiştir [9].

Maltodekstrin molekül ağırlığı yüksek, maliyeti düşük, çözümlüğü yüksek olduğundan bitkisel özütlerin instant

forma dönüştürülmesinde kaplama materyali olarak kullanımı yaygındır. Püskürtmeli kurutucuda 1:1 oranda maltodekstrin kullanıldığımız çalışmamızda, maltodekstrinin antioksidatif etki göstermediği bilinmektedir. İstant toz ürünün antioksidan kapasitesi ham materyal keçiyoynuzu kabuğu özütünden kaynaklanmaktadır. Bu çalışma kapsamındaki sonuçlar, keçiyoynuzu tozu özütünün instant ürün olarak gıda ve ilaç sanayisinde yaygın olarak kullanılan sentetik antioksidanların yerine alternatif olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

4 Sonuçlar

Modern yaşam tarzı ile birlikte insanların beslenme alışkanlıklarında önemli değişiklikler meydana gelmiş ve gündün güne instant gıdalara olan yönelim artmıştır. Bundan dolayı gıda endüstrisinde ve bilimsel literatürde bu taleplere cevap verebilmek için bitkisel özütlerin instant forma dönüştürülmesi ile ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada ise şeker oranı yüksek keçiyoynuzu kabuğunun toz haline getirilmesine odaklanılmıştır. Keçiyoynuzu kabuğu özütünün instant toz formunun üretimi ve bu proseste (ekstraksiyondan toz haline getirilmesine kadar) çeşitli faktörlerin nihai ürünün fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Keçiyoynuzu kabuğundan fenolik yapıların özütlenmesinde mikrodalga destekli ekstraksiyon sisteminin kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Nihai toz ürünlerdeki sisteme girdi oluşturan yapıların varlığı FTIR spektroskopisi ile doğrulanmıştır. Bulgular ileride benzer materyaller kullanılarak yürütülecek çalışmalara yol gösterecek niteliktedir. Çalışma kapsamında üretilen instant tozlar fonksiyonel bir ingredient olarak ileriki çalışmalarda farklı gıda formülasyonlarda kullanılabilir.

Teşekkür

Yazar Melike YÜCE-TEPE, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından 100/2000 doktora burs programı ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK; 2211-A) doktora burs programı ile desteklenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] A. Makrem, B.F. Najeh, K.M. Laarbi, B. Mohamed, Genetic Diversity in Tunisian *Ceratonia siliqua* L. (Caesalpinioideae) Natural Populations. Genetic Resources Crop Evolution, 53, 1501–1511, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-7761-5>
- [2] S. Naghmouchi, M.L. Khouja, A. Romero, J. Tous, M. Boussaid, Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. Scientia Horticulturae, 121 (2), 125–130, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.026>
- [3] H.R. Oziyci, N. Tetik, I. Turhan, E. Yatmaz, K. Ucgun, H. Akgul, H. Gubbuk, M. Karhan, Mineral composition of pods and seeds of wild and grafted carob (*Ceratonia*

- siliqua* L.) fruits. Scientia Horticulturae, 167 (6), 149–152, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.005>
- [4] L. Tounsi, S. Karra, H. Kechaou, N. Kechaou, Processing, physico-chemical and functional properties of carob molasses and powders. Journal of Food Measurement and Characterization, 11, 1440–1448, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9523-4>
- [5] M. Musa Özcan, D. Arslan, H. Gökçalık, Some compositional properties and mineral contents of carob (*Ceratonia siliqua*) fruit, flour and syrup. International Journal of Food Science and Nutrition, 58 (8), 652–658, 2007. <https://doi.org/10.1080/09637480701395549>
- [6] L. Tounsi, H. Kchaou, F. Chaker, S. Bredai, N. Kechaou, Effect of adding carob molasses on physical and nutritional quality parameters of sesame paste. Journal of Food Science and Technology, 56, 1502–1509, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03640-w>
- [7] M. Sengül, M. Fatih Ertugay, M. Sengül, Y. Yüksel, Rheological Characteristics of Carob Pekmez. International Journal of Food Properties, 10 (1), 39–46, 2007. <https://doi.org/10.1080/10942910600627996>
- [8] L.M. Hernandez, E.G. Xu, H.C.E. Larsson, R. Tahara, V.B. Maisuria, N. Tufenkji, Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea. Environmental Science Technology, 53 (21), 12300–12310, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02540>
- [9] M. Cam, B. Basyigit, H. Alasalvar, M. Yilmaztekin, A. Ahhmed, O. Sagdic, Y. Konca, I. Telci, Bioactive properties of powdered peppermint and spearmint extracts: Inhibition of key enzymes linked to hypertension and type 2 diabetes. Food Bioscience, 35, 100577, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100577>
- [10] P.T.N. Nguyen, C.K. Van, N.A.T. Do, T.C.T. Tran, T.K.T. Dang, T.M.T. Pham, B.L. Tran, N.T.A. Ton, Applicability of convection drying process for production of instant tea powder from Condonopsis javanica root extract. Materials Today Proceedings, 56 (3), 1461–1467, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.316>
- [11] B. Basyigit, I. Hayoglu, Liquorice (*Glycyrrhiza glabra* L.) root sherbet (extract): Microencapsulation and storage stability. Acta Alimentaria, 48 (1), 76–85, 2019. <https://doi.org/10.1556/066.2019.48.1.9>
- [12] X. Pan, G. Niu, H. Liu, Comparison of microwave-assisted extraction and conventional extraction techniques for the extraction of tanshinones from *Salvia miltiorrhiza* bunge. Biochemical Engineering Journal, 12 (1), 71–77, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00039-6)
- [13] D.-P. Xu, J. Zheng, Y. Zhou, Y. Li, S. Li, H.-B. Li, Ultrasound-assisted extraction of natural antioxidants from the flower of *Limonium sinuatum*: Optimization and comparison with conventional methods. Food Chemistry, 217, 552–559, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.013>

- [14] H. Şahin-Nadeem, C. Dinçer, M. Torun, A. Topuz, F. Özdemir, Influence of inlet air temperature and carrier material on the production of instant soluble sage (*Salvia fruticosa* Miller) by spray drying. *LWT - Food Science and Technology*, 52 (1), 31–38, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.007>
- [15] S. Sarkhel, D. Manvi, C.T. Ramachandra, M. Manjunath, U.K. Nidoni, Studies on supercritical fluid extraction and spray drying effect on the quality of instant tea of Mulberry leaves (*Morus alba* L.). *Measurement: Food*, 7, 100052, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100052>
- [16] Z. Akkaya, J. Schröder, S. Tavman, S. Kumcuoglu, H.P. Schuchmann, V. Gaukel, Effects Of Spray Drying On Physical Properties, Total Phenolic Content And Antioxidant Activity Of Carob Molasses. *International Journal of Food Engineering*, 8 (4), 10-30, 2012. <https://doi.org/10.1515/1556-3758.2593>
- [17] M. Çam, N.C. İçyer, F. Erdoğan, Pomegranate peel phenolics: Microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. *LWT - Food Science and Technology*, 55 (1), 117–123, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.09.011>
- [18] A.M. Goula, K.G. Adamopoulos, Effect of Maltodextrin Addition during Spray Drying of Tomato Pulp in Dehumidified Air: I. Drying Kinetics and Product Recovery. *Drying Technology*, 26 (6), 714–725, 2008. <https://doi.org/10.1080/07373930802046369>
- [19] G. Caliskan, S.N. Dirim, The effect of different drying processes and the amounts of maltodextrin addition on the powder properties of sumac extract powders. *Powder Technology*, 287, 308–314, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.019>
- [20] M. Lei, F.-C. Jiang, J. Cai, S. Hu, R. Zhou, G. Liu, Y.-H. Wang, H.-B. Wang, J.-R. He, X.-G. Xiong, Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 111, 755–761, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.051>
- [21] S. Saikia, N.K. Mahnot, C.L. Mahanta, Effect of Spray Drying of Four Fruit Juices on Physicochemical, Phytochemical and Antioxidant Properties. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39 (6), 1656–1664, 2015. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12395>
- [22] AOAC, M., Association of official analytical chemists. Official methods of analysis. AOAC: Off Methods Anal, 1, 69-90, 2005.
- [23] F. Tatar, M.T. Tunç, M. Dervisoglu, D. Cekmecelioglu, T. Kahyaoglu, Evaluation of hemicellulose as a coating material with gum arabic for food microencapsulation. *Food Research International*, 57, 168–175, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.022>
- [24] S.A. el Sohaimy, S.H.D. Masry, M.G. Shehata, Physicochemical characteristics of honey from different origins. *Annals of Agricultural Sciences*, 60 (2), 279–287, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2015.10.015>
- [25] C. Turchiuli, Z. Eloualia, N. el Mansouri, E. Dumoulin, Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technology*, 157 (1-3), 168–175, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.024>
- [26] C.-F. Chau, Y.-T. Wang, Y.-L. Wen, Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre. *Food Chemistry*, 100 (4), 1402–1408, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.11.034>
- [27] K. Duangmal, B. Saicheua, S. Sueeprasan, Colour evaluation of freeze-dried roselle extract as a natural food colorant in a model system of a drink. *LWT - Food Science and Technology*, 41 (8), 1437–1445, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.08.014>
- [28] V.L. Singleton, J.A. Rossi, Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16, 144–158, 1965.
- [29] M. Çam, Y. Hışıl, G. Durmaz, Classification of eight pomegranate juices based on antioxidant capacity measured by four methods. *Food Chemistry*, 112 (3), 721–726, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.009>
- [30] R. Apak, K. Güçlü, M. Özyürek, S.E. Çelik, Mechanism of antioxidant capacity assays and the CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity) assay. *Microchimica Acta.*, 160, 413–419, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00604-007-0777-0>
- [31] I.F.F. Benzie, J.J. Strain, The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239 (1), 70–76, 1996. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- [32] A. Christou, I.J. Stavrou, C.P. Kapnissi-Christodoulou, Continuous and pulsed ultrasound-assisted extraction of carob’s antioxidants: Processing parameters optimization and identification of polyphenolic composition. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, 105630, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105630>
- [33] M. Almanasrah, L.B. Roseiro, R. Bogel-Lukasik, F. Carvalheiro, C. Brazinha, J. Crespo, M. Kallioinen, M. Mänttari, L.C. Duarte, Selective recovery of phenolic compounds and carbohydrates from carob kibbles using water-based extraction. *Industrial Crops and Products*, 70, 443–450, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.051>
- [34] C.-H. Chan, R. Yusoff, G.-C. Ngoh, F.W.-L. Kung, Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants. *Journal of Chromatography A.*, 1218 (37), 6213–6225, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.040>
- [35] F. Dahmoune, G. Spigno, K. Moussi, H. Remini, A. Cherbal, K. Madani, Pistacia lentiscus leaves as a source of phenolic compounds: Microwave-assisted extraction optimized and compared with ultrasound-assisted and conventional solvent extraction. *Industrial Crops and Products*, 61, 31–40, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.035>

- [36] J. Song, D. Li, C. Liu, Y. Zhang, Optimized microwave-assisted extraction of total phenolics (TP) from *Ipomoea batatas* leaves and its antioxidant activity. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12 (3), 282–287, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.03.001>
- [37] E. Assadpour, S. Mahdi Jafari, A systematic review on nanoencapsulation of food bioactive ingredients and nutraceuticals by various nanocarriers. *Critical Reviews Food Science and Nutrition*, 59 (19), 3129–3151, 2019. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1484687>
- [38] M.R.I. Shishir, L. Xie, C. Sun, X. Zheng, W. Chen, Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends in Food Science and Technology*, 78, 34–60, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.018>
- [39] C.S. Singh, V.K. Paswan, D.C. Rai, Process optimization of spray dried Jamun (*Syzygium cumini* L.) pulp powder. *LWT*, 109, 1–6, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.04.011>
- [40] L. Mahmoudi, H. Tavakoli-pour, L. Roozbeh-Nasiraie, A. Kalbasi-Ashtari, Ultrasonication and encapsulation of Butcher broom (*Ruscus Hyrcanus* L.) extract and its bioactive effects on qualitative properties, oxidative stability and shelf life of cake. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 17, 100295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100295>
- [41] V. Sablania, S.J.D. Bosco, Optimization of spray drying parameters for *Murraya koenigii* (Linn) leaves extract using response surface methodology. *Powder Technology*, 335, 35–41, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.05.009>
- [42] A. Rezvankhah, Z. Emam-Djomeh, G. Askari, Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Drying Technology*, 38 (1-2), 235–258, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1653906>
- [43] A.M. Naji, B. Başığit, H. Alaşalvar, P. Salum, S. Berktaş, Z. Erbay, M. Çam, Instant soluble roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) powder rich in bioactive compounds: Effect of the production process on volatile compounds. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01593-x>
- [44] L. Medina-Torres, R. Santiago-Adame, F. Calderas, J.A. Gallegos-Infante, R.F. González-Laredo, N.E. Rocha-Guzmán, D.M. Núñez-Ramírez, M.J. Bernad-Bernad, O. Manero, Microencapsulation by spray drying of laurel infusions (*Litsea glaucescens*) with maltodextrin. *Industrial Crops and Products*, 90, 1–8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.009>
- [45] S. Thummajitsakul, P. Piyaphan, S. Khamthong, M. Unkam, K. Silprasit, Comparison of FTIR fingerprint, phenolic content, antioxidant and anti-glucosidase activities among *Phaseolus vulgaris* L., *Arachis hypogaea* L. and *Plukenetia volubilis* L. *Electronic Journal of Biotechnology*, 61, 14–23, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2022.10.003>
- [46] O. Abbas, G. Compère, Y. Larondelle, D. Pompeu, H. Rogez, V. Baeten, Phenolic compound explorer: A mid-infrared spectroscopy database. *Vibrational Spectroscopy*, 92, 111–118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2017.05.008>
- [47] C. Christou, A. Agapiou, R. Kokkinofita, Use of FTIR spectroscopy and chemometrics for the classification of carobs origin. *Journal of Advanced Research*, 10, 1–8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.12.001>
- [48] A. Can Karaca, O. Guzel, M.M. Ak, Effects of processing conditions and formulation on spray drying of sour cherry juice concentrate. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (2), 449–455, 2016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7110>
- [49] B.R. Bhandari, N. Datta, T. Howes, Problems Associated With Spray Drying Of Sugar-Rich Foods. *Drying Technology*, 15 (2), 671–684, 1997. <https://doi.org/10.1080/07373939708917253>
- [50] H. Ali, A.R. Al-khalifa, W. Aboelsood, G. Bareh, A. Farouk, Influence of spray-drying on improving the quality of dried carob juice. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 11 (4), 391–399, 2019. <https://doi.org/10.3920/QAS2018.1524>
- [51] A.A. Santana, L.G.P. Martin, R.A. de Oliveira, L.E. Kurozawa, K.J. Park, Spray drying of babassu coconut milk using different carrier agents. *Drying Technology*, 35 (1), 76–87, 2017. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1160111>
- [52] S.Y. Quek, N.K. Chok, P. Swedlund, The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46 (5), 386–392, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020>
- [53] B. Neirinck, J. van Deursen, O. van der Biest, J. Vleugels, Wettability Assessment of Submicrometer Alumina Powder Using a Modified Washburn Method. *Journal of the American Ceramic Society*, 93 (9), 2515–2518, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03854.x>
- [54] S. Santhalakshmy, S.J. Don Bosco, S. Francis, M. Sabeena, Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. *Powder Technology*, 274, 37–43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.016>
- [55] P.H.C. Felix, V.S. Birchal, D.A. Botrel, G.R. Marques, S.V. Borges, Physicochemical and Thermal Stability of Microcapsules of Cinnamon Essential Oil by Spray Drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41 (3), e12919, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12919>
- [56] E. Karrar, A.A. Mahdi, S. Sheth, I.A. Mohamed Ahmed, M.F. Manzoor, W. Wei, X. Wang, Effect of maltodextrin combination with gum arabic and whey protein isolate on the microencapsulation of gorum seed oil using a spray-drying method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 171, 208–216, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.045>

- [57] Z. Tülek, H. Alaşalvar, B. Başığit, S. Berktas, P. Salum, Z. Erbay, I. Telci, M. Çam, Extraction optimization and microencapsulation of phenolic antioxidant compounds from lemon balm (*Melissa officinalis* L.): Instant soluble tea production. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45 (1), e14995, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14995>
- [58] C.V. Bezerra, E.R. Amante, D.C. de Oliveira, A.M.C. Rodrigues, L.H.M. da Silva, Green banana (*Musa cavendishii*) flour obtained in spouted bed – Effect of drying on physico-chemical, functional and morphological characteristics of the starch. *Industrial Crops and Products*, 41, 241–249, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.035>
- [59] H. Şahin Nadeem, M. Torun, F. Özdemir, Spray drying of the mountain tea (*Sideritis stricta*) water extract by using different hydrocolloid carriers. *LWT - Food Science and Technology*, 44 (7), 1626–1635, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.02.009>
- [60] B. Carbas, M. v. Salinas, C. Serrano, J.A. Passarinho, M.C. Puppo, C.P. Ricardo, C. Brites, Chemical composition and antioxidant activity of commercial flours from *Ceratonia siliqua* and *Prosopis* spp. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13 (1), 305–311, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9945-7>
- [61] Y. Benchikh, H. Louaileche, B. George, A. Merlin, Changes in bioactive phytochemical content and in vitro antioxidant activity of carob (*Ceratonia siliqua* L.) as influenced by fruit ripening. *Industrial Crops and Products*, 60, 298–303, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.048>
- [62] A. Richane, B.M. Rim, M. wided, K. Riadh, A. Khaoula, M. Nizar, B.I. Hanen, Variability of phenolic compounds and antioxidant activities of ten *Ceratonia siliqua* L. provenances. *Biochemical Systematics and Ecology*, 104, 104486, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2022.104486>
- [63] V.I. Lushchak, Free radicals, reactive oxygen species, oxidative stress and its classification. *Chemico-Biological Interactions*, 224, 164–175, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2014.10.016>
- [64] V. Goulas, E. Georgiou, Utilization of Carob Fruit as Sources of Phenolic Compounds with Antioxidant Potential: Extraction Optimization and Application in Food Models. *Foods*, 9 (1), 20, 2019. <https://doi.org/10.3390/foods9010020>
- [65] F. Saci, M. Bachir bey, H. Louaileche, L. Gali, C. Bensouici, Changes in anticholinesterase, antioxidant activities and related bioactive compounds of carob pulp (*Ceratonia siliqua* L.) during ripening stages. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14 (2), 937–945, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00344-9>





Antarktika'da mevcut araştırma istasyonları kapsamında yenilenebilir enerji potansiyeli ve Türk Araştırma Üssü özelinde bir ön inceleme

Renewable energy potential within the scope of existing research stations in Antarctica and a preliminary study on the Turkish Research Base

Şehriban Yiğit^{1,*}, Mehmet İşiler², Tolga Bakırman³, Mahmut Oğuz Selbesoğlu⁴

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Geomatik Mühendisliği Programı, İstanbul, Türkiye

^{2,4} İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Antarktika, iklim özelliklerinden ve topoğrafik şartlarından dolayı üzerinde yerli nüfus barındırmayan bir kıtadır. Günümüzde kıta üzerindeki mevcut nüfusu bilimsel faaliyetlerin yürütülmesi için tesis edilen araştırma istasyonlarında yaşayan görevli ve araştırmacılar oluşturmaktadır. Antarktika'da 30'dan fazla ülke 100'ün üzerinde araştırma istasyonu ile bilimsel çalışmalar yürütmektedir. İlgili istasyonların faaliyetlerini sürdürebilmesi için enerji ihtiyaçlarının kesintisiz bir şekilde karşılanması gerekir. Son yıllarda birçok istasyonda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında artış olsa da buradaki istasyonların çoğu enerjilerini fosil yakıtlardan sağlamaya devam etmektedir. Ülkeler kıta üzerindeki faaliyetlerini gerçekleştirirken Antarktika'nın ekosistemini, doğal ve canlı kaynaklarını korumak zorundadır. Fosil yakıtlar çevreye kirletici gazlar salmakta ve karbon emisyonunu arttırmaktadır. Bu bağlamda kıtadaki mevcut yenilenebilir enerji potansiyellerinin incelenmesi ve bu alanda projelerin artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada öncelikle Antarktika'daki seçilmiş 20 araştırma istasyonu kapsamında bir inceleme yapılmış, mevcut enerji kullanımları ve potansiyelleri analiz edilmiştir. Çalışmanın devamında Türk Araştırma Üssü'nün kurulması planlanan Horseshoe Adası özelinde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin potansiyel durum incelenmiştir. NASA'ya bağlı Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi (GMAO) tarafından geliştirilen MERRA-2 yeniden analiz verileri ile Horseshoe adasının yakınında bulunan mevcut iki araştırma üssüne ilişkin veriler kıyaslanarak mekânsal analizler gerçekleştirilmiş, Antarktika Türk Araştırma Üssü'nün kullanabileceği yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin bir ön incelemede bulunulmuştur

Anahtar kelimeler: Antarktika, Yenilenebilir enerji, Türk Araştırma Üssü, Horseshoe Adası

1 Giriş

Güney kutbunda yer alan ve buzullarla kaplı olan Antarktika Kıtası, Dünya'nın doğal laboratuvarı olarak görülmektedir. Özellikle küresel iklim değişikliğinin

Abstract

Antarctica is a continent that does not have a native population due to its climate characteristics and topographic conditions. Today, the current population on the continent consists of officials and researchers living in research stations established for scientific activities. More than 30 countries have conducted scientific studies with over 100 research stations in Antarctica. For the relevant stations to continue their activities, their energy needs must be met uninterruptedly. Even though the usage of renewable energy sources has recently increased in the relevant stations, most stations continue to produce their energy with fossil fuels. Countries carrying out their activities on this continent must protect Antarctica's ecosystem and natural and living resources. Fossil fuels release polluting gases into the environment and increase carbon emissions. In this context, it is necessary to examine the existing renewable energy potentials in the continent, and renewable energy facilities should be increased. First, this study is aimed to analyze the current renewable energy potential of 20 selected research stations in Antarctica. In the second stage of the study, a potential situation analysis was made regarding the use of renewable energy on Horseshoe Island, where the Turkish Research Station is planned to be established. Spatial analyses were conducted by comparing the MERRA-2 reanalysis data developed by NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) with the data from the two existing research stations near Horseshoe Island. Thus, a preliminary study has been made on the renewable energy resources that the Antarctic Turkish Research Base can use.

Keywords: Antarctica, Renewable energy, Turkish Polar Research Base, Horseshoe Island

izlenmesi ve etkilerinin araştırılması konularında yapılan bilimsel çalışmaların yoğunlaştığı bir yerdir

Dünya'nın diğer alanlarından oldukça yalıtılmış bir halde bulunan bu üçüncü kıtanın kendine özgü iklimsel, jeolojik ve topoğrafik özellikleri bulunmaktadır. İnsan etkilerinin en az

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sehibanygt65@gmail.com (Ş. Yiğit)

Geliş / Received: 21.11.2022 Kabul / Accepted: 11.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1208140

görüldüğü bu kıta, Dünya'nın en yüksek, en soğuk ve en rüzgârlı yeridir. Zorlu koşulların hâkim olduğu Antarktika, aynı zamanda Dünya'daki tatlı suyun %70'ine sahip olmasıyla birlikte birçok maden yatağının, petrol ve doğalgaz rezervlerinin bulunduğu bir bölgedir [1].

Antarktika Antlaşmalar Sistemine göre, Antarktika insanlığın ortak malı olarak kabul edilmekte olup üzerinde hiçbir devletin egemenliği bulunmamaktadır [2]. Ülkeler kıtadan yalnızca barışçıl amaçlarla yararlanabilmektedir. Ülkeler kıta üzerindeki faaliyetlerini gerçekleştirirken Antarktika'nın ekosistemini, doğal ve canlı kaynaklarını korumak zorundadır [2]. Devletlerin büyük çoğunluğu, bu kıtanın sadece bilimsel araştırmaların yürütüldüğü bir bölge olarak kabul edilmesi gerektiği fikrini paylaşmaktadır [2]. Kıtada 30'dan fazla ülke 100'ün üzerinde araştırma istasyonu ile bilimsel çalışmalar yürütmektedirler [3]. Bilim insanları kıtada yer bilimlari, yaşam bilimlari, fizik bilimlari ve uzay bilimlari ana başlıkları altında birçok bilim dalında çalışmalar ve araştırmalar yapmaktadırlar. Antarktika kıtasına ulaşımın zorluğu ve iklim koşullarının çok sert oluşundan dolayı lojistiğin sağlanmasında zorluklar yaşandığı düşünüldüğünde [4], bölgede çeşitli amaçlarla tesis edilen istasyonların faaliyetlerini sürdürebilmesi ve bilimsel çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için gerekli enerji ihtiyacının çevreye zarar vermeden, kesintisiz bir şekilde karşılanması oldukça önemli bir husustur.

Antarktika kıtasında enerji talebi büyük çoğunlukla fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları kullanan istasyon sayısının da yıllar içerisinde arttığı görülmektedir [4]. Yenilenebilir enerji, doğal döngüsü içinde aynen kalabilen ve kullanılmasına rağmen tükenmeyen enerji kaynakları kullanılarak üretilir [5]. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, gelgit ve dalga enerjisi yenilenebilir enerji türleri içinde sıralanabilir. 1991'de Madrid'de imzalanan ve 1998'de yürürlüğe giren Antarktika Antlaşması Çevre Koruma Protokolü, Antarktika'nın çevresel, bilimsel ve tarihsel değerleri ile birlikte doğal kaynakların ve canlı ekosistemini korumasını amaçlamaktadır [4]. Bilimsel çalışmalar ve turizm amaçlı insan nüfusunun kıtada artış göstermesiyle, bölgedeki karbon salınımının da oldukça arttığı gözlemlenmektedir [6]. Bu bağlamda, kıtadaki enerji ihtiyacının karşılanmasında bölgedeki çevresel koşulların izin verdiği yenilenebilir kaynakların analiz edilmesi ve kullanım olanaklarının değerlendirilmesi önemli bir ihtiyaç ve sorumluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Özellikle 2017 yılında gerçekleştirilen Birinci Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-I) ile birlikte ülkemizin Antarktika bölgesindeki çalışmaları giderek yoğunlaşmıştır. T.C. Cumhurbaşkanlığı himayesinde, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı uhdesinde ve TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü (KARE) koordinasyonunda bilim seferleri devam etmekte olup, geçen süre içerisinde ilgili kıtada ülkemiz bilim insanları tarafından birçok bilimsel proje yürütülmeye başlanmıştır. Bu sürecin bir devamı olarak TAE seferlerinin yapıldığı Horseshoe Adası'nda ülkemiz adına bir bilim üssü kurulması planlanmaktadır. Bu bağlamda kurulması planlanan Türk bilim üssünde gerekli enerjinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kullanım

olanaklarının araştırılması oldukça önemlidir. Bu yönde gerçekleştirilecek çalışmalar ülkemizin bölgedeki faaliyetlerine ekonomik ve bilimsel alanda destek olduğu kadar bölgede çevrenin ve ekosistemin korunmasına yönelik gösterilen gayretin vurgulanmasına da katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada öncelikle kıtadaki mevcut yenilenebilir enerji kullanımı ve potansiyeli bölgede faaliyetlerini sürdüren bilimsel araştırma istasyonları kapsamında değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında Türk Araştırma Üssü'nün kurulması planlanan Horseshoe Adası özelinde yenilenebilir enerji kullanımına ilişkin potansiyel durum incelemesi yapılmıştır. NASA'ya bağlı Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi (GMAO) tarafından geliştirilen MERRA-2 yeniden analiz verileri ile birlikte Horseshoe adasının yakınında bulunan mevcut iki araştırma üssüne ilişkin veriler karşılaştırılarak mevcut durum analiz edilmiş, Antarktika Türk Araştırma Üssü'nün kullanabileceği yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin bir ön incelemede bulunulmuştur.

2 Antarktika'nın başlıca topoğrafik ve iklimsel özellikleri

Antarktika'da kurulan araştırma istasyonlarının yerlerinin belirlenmesinde, ulaşılabilirlik, iklim koşulları ve yürütülen çalışmaların nitelikleri etkili olmaktadır. Kıtada kalıcı istasyonların yanında mevsimlik istasyonlar da bulunmaktadır. İlgili istasyonlardaki yenilenebilir enerji kullanım potansiyeli, istasyonların konumlandığı bölgelerdeki iklimsel, çevresel ve topoğrafik özelliklere göre çeşitlilik ve farklılıklar göstermektedir. Bölgenin coğrafi özelliklerinin izin verdiği ölçüde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak mümkün olmaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulumu, bakımı ve işletilmesi aşamalarında karşılanacak ekonomik yüklerin analizinde bölgenin zorlu şartlarının getireceği kısıtların irdelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, bu bölümde, Antarktika kıtasının geneli için yapılacak yenilenebilir enerji potansiyeli analizinde, öncelikle kıtanın iklim ve coğrafi koşulları ortaya konulmuş, ardından kıtadaki araştırma istasyonlarının konumlarına ilişkin genel bilgilere yer verilmiştir.

Dünya'nın beşinci büyük kıtası olan Antarktika'nın yüzölçümü yaklaşık 14 milyon km² [7] olup %97'si ortalama kalınlığı 1600 metre olan buz tabakası ile kaplıdır [1]. Kıtayı kaplayan bu buz tabakası Dünya'daki buzulların yaklaşık %90'ını temsil etmektedir [7]. Şekil 1'de paylaşılan haritada görüleceği üzere, Antarktika, Wendell Denizi ile Ross Denizi arasında uzanmakta olup, Transantarktika Dağları tarafından Batı ve Doğu olarak iki bölüme ayrılmaktadır [6]. Antarktika kıtasının orta bölümü üzerinde dağ zirvelerinin de yer aldığı yaklaşık 3048 metrelere ulaşan bir platodur [8]. Doğu Antarktika'nın sahip olduğu buz tabakası hacmi ise Batı Antarktika buz tabakası hacminin yaklaşık 9 katıdır [3].

Antarktika yarımadası olarak adlandırılan yer ise, Antarktika kıtasının en kuzey uzantısıdır [7]. Bu yarımada, Antarktika'nın Güney Amerika Kıtası'na en fazla yaklaştığı kısımdır [7]. Antarktika yarımadasının kuzeyinde ve doğusunda Güney Shetlands, Güney Orkney, Güney Sandwich ve Güney Georgia adaları bulunmaktadır [8].

Kıyılardan kopan ve kıtanın etrafında hareketli halde bulunan buz dağları, gemilerin kıyılara yaklaşmasını kimi zaman imkânsız hale getirmektedir [8]. Bunun yanında, Antarktika'nın çevresi okyanus suyunun donmasıyla oluşan buz kütleleri kaplıdır. Yaz döneminde bu tabakalar kırılğan hale gelmekte ve gemiler bu tabakalardan geçerek yol alabilmektedirler [8].



Şekil 1. Antarktika kıtasını gösterir harita [3]

Antarktika kıtasında kıyı ve iç bölgeler farklı iklim özelliklerine sahiptir. Yükseklik farkından dolayı, Antarktika'nın doğu bölgesi ve iç kesimler daha soğuktur ve yağışlar oldukça düşüktür [3]. Kıyı kesimlerde ise kar şeklinde yağışlarla karşılaşılır. Antarktika kıyılarında, sıcaklıklar Aralık-Şubat döneminde donma noktasına yakın olurken, Haziran-Ağustos dönemlerinde ise -10°C ile -30°C arasında değişmektedir [1]. İç kesimlerde ise sıcaklık Haziran- Ağustos döneminde -40°C ile -70°C arasında seyrederken, Aralık-Şubat döneminde -15°C ile -35°C arasında değiştiği görülmektedir [7]. Antarktika üzerinde "Katabatik" adı verilen özel bir rüzgâr türü etkilidir ve bazı bölgelerde yıllık ortalama hızı saatte 50 km'ye kadar ulaşır [3].

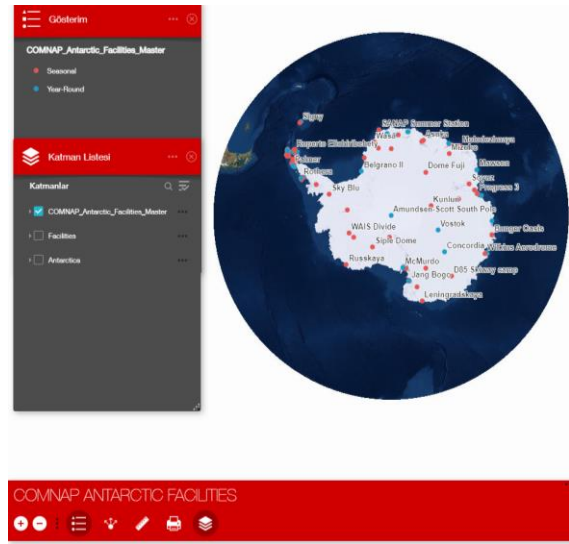
Araştırma istasyonlarının çoğu iklim şartları ve lojistiğin izin vermesi nedeniyle kıtanın batı bölgesinde bulunmaktadır [6]. Kıtanın kıyı bölgeleri ve iç bölgelerinde farklı dallarda çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Kıyı bölgelerinde çoğunlukla çevre bilimleri, deniz biyolojisi, hidroloji ve mikrobiyoloji gibi bilim dalları üzerine çalışmalar ağırlıktayken, iç bölgelerde astrofizik ve buzul bilimi üzerine çalışmalar ön plandadır [6].

3 Antarktika araştırma istasyonları

Bu bölümde Türkiye'nin de dahil olduğu Ulusal Antarktika Programları Yöneticileri Konseyi (COMNAP)'ne üye olan ülkelerin kıtada bulunan istasyonlar hakkında özet bilgilere yer verilmiştir. Ulusal Antarktika

Programları Yöneticileri Konseyi, 1988 yılında kurulmuş olup, 2022 yılı itibarıyla 32 üye ve beş gözlemci programa sahiptir. Antarktika Antlaşması ve Çevre Protokolüne imza atan ve kıtada araştırma yapan ülkeler bu konseye katılabilirler. İlgili konsey, uluslararası ortaklıkları kolaylaştırmak ve teşvik etmek, bilgi alışverişini sağlayacak olanaklar ve sistemler sağlamak, çevreye karşı sorumlu bir şekilde kıtadaki bilimsel faaliyetlerin etkinliğini arttıran uygulamalar geliştirmek için bir forum olarak hizmet vermek amaçlarını taşımaktadır [9].

COMNAP, kendi internet sayfası aracılığı ile üye olan araştırma istasyonlarının bilgisini içeren kaynaklar ve listeler paylaşmaktadır. Şekil 2'de Antarktika kıtasında bulunan araştırma istasyonlarının mevcut konum ve durum bilgileri gösterilmektedir [10]. Kırmızı renkli noktalar mevsimlik istasyonları temsil ederken mavi renkli noktalar yıl boyunca aktif olan istasyonları göstermektedir.



Şekil 2. Antarktika araştırma istasyonları [10]

Antarktika kıtasının kuzeybatısında bulunan King George ve Güney Shetland adaları ile kıtanın kuzey doğusunda yer alan Dronning Maud adasında araştırma istasyonlarının çoğunlukta olduğu görülmektedir [6]. Bazı devletlerin kıtada farklı bölgelerde birden fazla istasyonu bulunmaktadır.

Tablo 1'de kıtada araştırma istasyonu bulunan ülkeler ve sahip oldukları mevsimlik ve yıllık istasyon sayılarına ait özet bir liste [11] paylaşılmıştır. Bu listede bulunan ülkeler haricinde bölgede belli zamanlarda kamplar kurup bilimsel araştırmalarını sürdüren ülkeler de bulunmaktadır. Antarktika kıtasına konum olarak en yakın ülkeler arasında yer alan Arjantin'in 13, Şili'nin 11, Avustralya'nın ise toplamda 3 araştırma istasyonu bulunmaktadır. Ayrıca, kıtaya uzak coğrafyalarda bulunan Rusya, Çin, ABD, Birleşik Krallık ve Almanya gibi devletlerin de kıtada farklı bölgelerde bulunan birden fazla sayıda istasyona sahip oldukları görülmektedir.

Ülkelerin kurdukları araştırma istasyonları, kuruldukları bölgeler itibarıyla farklı bilimsel çalışmalara yoğunlaşmıştır. Ülkelerin çok sayıda istasyon kurup, faaliyetlerini

sürdürebilmelerinde farklı nedenler bulunmaktadır. Avustralya, Arjantin ve Şili gibi kıtaya yakın olan bazı ülkelerin, coğrafi konumlarının getirdiği olanaklardan yararlandığı söylenebilir. ABD, Rusya, İngiltere, Çin ve Fransa gibi ülkeler ise sahip oldukları güçlü imkanlar ve ulaşım kabiliyetleri doğrultusunda kıtanın önemli stratejik konumlarında istasyon bulundurabilmektedirler [6].

Tablo 1. Araştırma istasyonuna sahip ülkeler [11]

Ülke	Yıllık İstasyon Sayısı	Mevsimlik İstasyon Sayısı
Arjantin	6	7
Avustralya	3	-
Belçika	-	1
Brezilya	1	-
Bulgaristan	1	-
Şili	5	6
Çin	2	1
Çekya	-	1
Ekvador	-	1
Finlandiya	-	1
Fransa	1	1
Almanya	2	2
Hindistan	-	2
İtalya	1	1
Japonya	1	3
Yeni Zelanda	1	-
Norveç	1	-
Peru	-	1
Polonya	1	-
Belarus	-	1
Güney Kore	2	-
Rusya	5	7
Güney Afrika	1	1
İspanya	-	2
Ukrayna	1	-
Birleşik Krallık	1	3
ABD	3	-
Uruguay	1	1

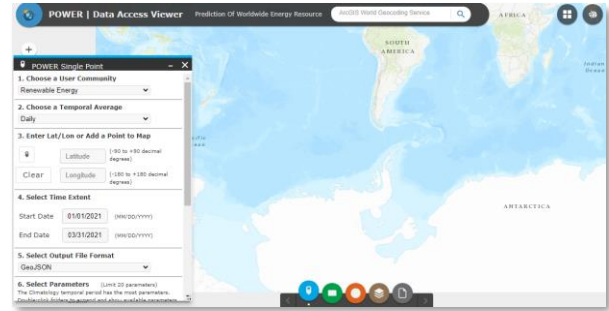
4 Antarktika araştırma istasyonları özelinde yenilenebilir enerji potansiyeli

Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından iklim araştırmaları için kullanıcılara uzun dönemleri içeren birçok veri seti sağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan veriler Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi (GMAO) tarafından geliştirilen GEOS ile yürütülen Dünya Sistemi Yeniden Analiz yöntemine dayanmaktadır [12]. Yeniden analiz atmosferik veri setlerinin uzun vadeli analizleri için atmosfer, kara, okyanus ve buz dahil olmak üzere sayısal bir modelin üretimi ile gerçekleştirilmektedir.

1980'li yıllardan başlayarak günümüze kadar veri sağlayan Modern Çağ Retrospektif Araştırma ve Uygulama Analizi (MERRA-2) iklim değişikliği süreçlerini ve aerosollerin uzaya dayalı gözlemlerini içeren uzun vadeli küresel yeniden analiz olan MERRA'nın ikinci sürümü niteliğinde geliştirilmiştir [6]. MERRA-2 asimilasyon modeli Antarktika kıtasını kapsamaktadır.

Bu çalışmada, MERRA-2' den elde edilen yeniden analiz verileri kullanılmıştır. MERRA-2 verileri Şekil 3'te paylaşılan NASA'ya Dünya Çapında Enerji Kaynaklarının

Tahmini (POWER) projesinin CBS web portalından elde edilmiştir [13]. Araştırma için Antarktika kıtasında belirlenen 20 istasyon noktasına ait aylık ve yıllık ortalama rüzgâr hızı ile kısa dalga boylu güneş radyasyonu verileri alınmıştır. Bu veriler 0.5 x 0.625 derece gridler üzerinde üretilmiştir [6].



Şekil 3. POWER projesi CBS portalı

4.1 Antarktika'da yenilenebilir enerji potansiyelinin incelenmesinde seçilen araştırma istasyonları

Antarktika kıtasında yenilenebilir enerji potansiyelini araştırabilmek adına kıta üzerinde 20 adet istasyon noktası seçilmiştir. Bu seçimde istasyonların kıtadaki dağılımlarına dikkat edilmiş, kıtanın birçok bölgesinin temsil edilmesi sağlanmıştır. İstasyon noktaları Antarktika Yarımadası, Kraliçe Maud Adası ve Transantarktika Dağları olmak üzere kıtanın ve Doğu ve Batı bölgelerini kapsamaktadır. Seçilen 18 adet istasyonda bilimsel araştırmalar gerçekleştirilirken 2 adet istasyon depo alanı olarak kullanılmaktadır [6]. Bu istasyonlar arasında yenilenebilir enerji kullananlar istasyonlar olduğu gibi sadece fosil yakıt kullanarak enerjilerini sağlayan istasyonlar da bulunmaktadır. İlgili istasyon noktaları Norveç Kutup Araştırmaları Enstitüsünün açık kaynak kodlu QGIS programına entegre ettiği Quantarktika eklentisi kullanılarak haritalandırılmıştır ve ilgili harita Şekil 4'te paylaşılmıştır.



Şekil 4. Quantarktika üzerinden istasyonların yerleri

Tablo 2'de seçilen istasyonların isimleri, kıtada hangi bölgede yer aldıkları ile enlem ve boylam bilgileri paylaşılmıştır.

Tablo 2. Analiz edilen istasyonların listesi

İstasyon adı	Konum	Enlem	Boylam
Henryk Arctowski	Antarktika Yarımadası	-62.159773	-58.473322
Palmer	Antarktika Yarımadası	-64.774261	-64.053333
Rothera	Antarktika Yarımadası	-67.569500	-68.124900
Sky Blu	Antarktika Yarımadası	-74.856351	-71.585200
Halley VI	Kraliçe Maud Adası	-75.571111	-25.473889
Neumayer III	Kraliçe Maud Adası	-70.666626	-8.279638
Princess Elisabeth	Kraliçe Maud Adası	-71.949858	23.346891
Syowa	Kraliçe Maud Adası	-69.004122	39.581836
Mawson	Doğu Antarktika	-67.602644	62.873028
Zhongshan	Doğu Antarktika	-69.373206	76.371871
Casey	Doğu Antarktika	-66.282343	110.526792
Dumont d'Urville	Doğu Antarktika	-66.662833	140.001333
Jang Bogo	Transantarktika Dağları	-74.627363	164.23585
McMurdo	Transantarktika Dağları	-77.848209	166.668422
Amundsen-Scott	Doğu Antarktika	-89.997500	139.272800
Concordia	Doğu Antarktika	-75.099975	123.332605
Kunlun	Doğu Antarktika	-80.417189	77.1159973
Kohnen	Kraliçe Maud Adası	-75.001909	0.066336
WAIS Divide	Batı Antarktika	-79.471286	-112.072154
Russkaya	Batı Antarktika	-74.765726	-136.800072

Tablo 2’de yer verilen Princess Elisabeth istasyonu, Dünya’nın ilk sıfır emisyonlu bilimsel araştırma istasyonudur [14]. İlgili istasyonun bulunduğu bölge yenilenebilir enerji kullanımı için oldukça idealdir ve bu nedenle özellikle seçilmiştir [6]. Şekil 5’te ilgili istasyona ilişkin bir görsel paylaşılmaktadır [14]. İstasyonda enerji için rüzgâr gücü ve güneş ışığından faydalanılmaktadır. Böylelikle yakıt taşıma lojistiğinde önemli bir azalma sağlanmıştır [14].



Şekil 5. Princess Elisabeth araştırma istasyonu

4.2 MERRA-2 verileri ışığında Antarktika’da yenilenebilir enerji potansiyelinin incelenmesi

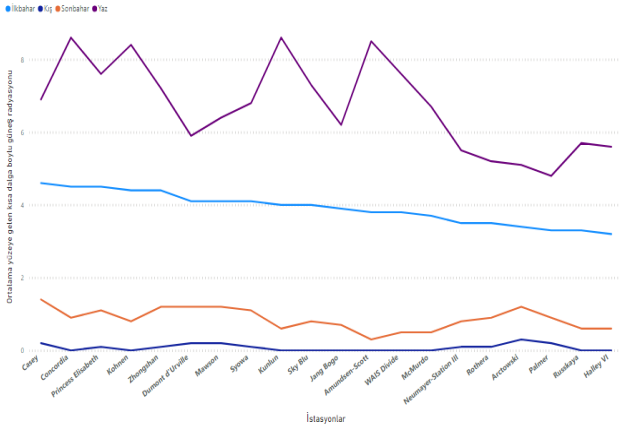
Antarktika kıtasının yenilenebilir enerji potansiyelini değerlendirebilmek için öncelikle günlük veriler kullanılarak mevsimsel değerler hesaplanmıştır. Kıtada Aralık-Ocak-Şubat ayları yaz mevsimi Mart-Nisan-Mayıs ayları sonbahar mevsimi, Haziran-Temmuz-Ağustos ayları kış mevsimi ve Eylül-Ekim-Kasım ayları da ilkbahar mevsimi olarak kabul edilmektedir.

Çalışma için alınan kısa dalga boylu güneş radyasyonu verileri 1 Ocak 1984-31 Aralık 2020 yılları arasındaki 37 yıllık dönemi kapsarken, rüzgâr hızı verileri ise 1 Ocak 1981-31 Aralık 2020 yılları arasındaki 40 yıllık dönemi kapsamaktadır.

4.2.1 Antarktika’daki araştırma üsleri özelinde güneş enerjisi potansiyeli

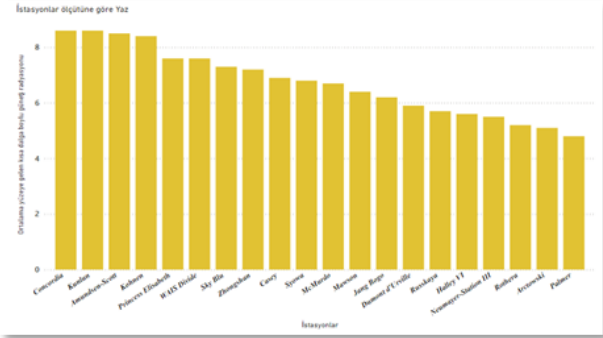
Bu bölümde kıta üzerinde seçilen 20 araştırma istasyonu özelinde, Modern Çağ Retrospektif Araştırma ve Uygulama Analizi (MERRA-2) ile elde edilen ortalama kısa dalga boylu güneş radyasyon verileri ile güneş enerjisi potansiyelleri araştırılmış ve ayrı ayrı istasyonların mevcut enerji üretim kaynakları hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Antarktika kıtasına hâkim olan iklim koşulları gereği kıtadaki güneş enerjisi potansiyelini yorumlayabilmek için öncelikle yüzey radyasyon değişimi hakkında inceleme yapmak gerekir.

1984-2021 yıllarını kapsayan MERRA-2 yeniden analiz verilerinin mevsimlere göre incelenmesi için öncelikle istasyonların aylık verileri toplanmıştır. Sonraki aşamada yaz, sonbahar, kış, ilkbahar ve yıllık ortalama değerler hesaplanmıştır. Antarktika kıtası üzerinde seçilen 20 araştırma istasyonuna ait yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu ortalama değerleri kullanılarak oluşturulan 37 yıllık ortalama mevsim grafiği Şekil 6’da paylaşılmıştır.



Şekil 6. İstasyonlarda 37 yıllık ortalama mevsimsel yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu [KWh/m²/g] [6]

Antarktika kıtasında güneş radyasyonunun en fazla olduğu zaman aralığının Aralık-Şubat dönemine ait olduğu Şekil 6'da paylaşılan grafikten açıkça görülmektedir. Kıtanın yaz aylarında önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğu ilk bakışta söylenebilir. Bu nedenle yaz mevsimine ait yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu değerleri de istasyonlar bazında incelenmiş ve Şekil 7'de ayrıca paylaşılmıştır.



Şekil 7. Yaz mevsimine ait 37 yıllık ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu [KWh/m²/g] [6]

Şekil 7'de paylaşılan grafiğe bakıldığında kutup noktalarına yakın konumda bulunan Concardia, Kunlun, Amundsen-Scott, Kohnen, gibi istasyonlarda Aralık-Şubat dönemine ait 37 yıllık ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle de güneş enerjisi potansiyelinin ilgili istasyonlar için oldukça fazla olduğu söylenebilir. Ancak sert iklim koşullarının getirdiği zorluklardan dolayı bu istasyonlarda enerji üretiminde güneş enerjisi kullanılamamaktadır [6].

Kıtanın kutup noktasına yakın iç kesimlerinden sonra en yüksek güneş enerjisi kullanımı potansiyeline sahip bölge Dronning Maud ve çevresidir. Burada bulunan Princess Elisabeth, Zhongshan ve Syowa istasyonlarında güneş panellerinin kullanıldığı da bilinmektedir [6]. Doğu Antarktika'nın kıyı bölgesinde bulunan Casey istasyonunda ise güneş enerjisi çiftliği kurulmuştur [6]. Antarktika'da kış günlerinde güneş radyasyonu neredeyse sifra yakın

değerlerde seyretmektedir. Bu nedenle kış aylarında güneş enerjisi ile enerji üretimi mümkün olmamaktadır. Kış döneminde rüzgâr enerjisi kullanılarak enerji üretiminin sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir.

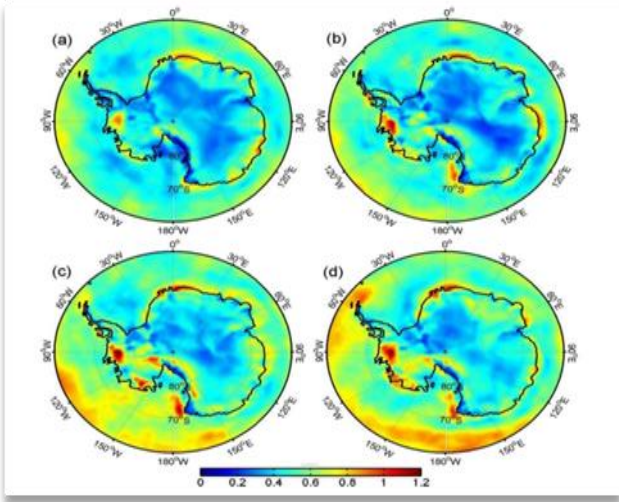
Ayrıca, kıtadaki araştırma istasyonları özelinde gerçekleştirdiğimiz güneş enerjisi potansiyeli araştırmasında, Çalışma Ortamı Araştırma Programı'nın (WCRP) bir referans ağı olan Temel Yüzey Radyasyon Ağı (BSRN)'nda yer alan ve Antarktika kıtasında bulunan Concardia (DOM), Syowa (SYO), Neumayer (GVN) ve Amundsen Scott Güney Kutup (SPO) istasyonlarına ait çalışmalar da analiz edilmiştir. Özellikle, çalışma kapsamında seçilen istasyonlar arasında bulunan Concardia istasyonunun yer aldığı bölgede bulunan Temel Yüzey Radyasyon Ağı (BSRN)'na ait Concardia (DOM) noktasında daha önce yapılan incelemeler üzerinde durulmuştur.

Bai vd. [15] DOM C (Concardia) noktası için 2006-2016 yıllarını kapsayan Temel Yüzey Radyasyon Ağı (BSRN) verilerinin kullanıldığı güneş radyasyonu analizi çalışması gerçekleştirmişlerdir. Güneş radyasyonu analizi için gerekli olan soğurma, saçılma, yansıma gibi uzun süreli atmosferik parametreler de çalışmaya dahil edilmiştir. Analiz sürecinde ayrıca bölgeye ait hava sıcaklığı, rüzgâr hızı gibi veriler de eklenerek tahminler yapılmıştır. Concardia istasyonunda yapılan bu çalışmaya göre küresel güneş radyasyon değerlerinde mevsimlere göre önemli değişimler olduğu görülmüştür [15]. Çalışmamız kapsamında Merra-2 verileri kullanarak elde edilen ortalama kısa dalga boylu güneş radyasyonu değerleri ile uyumlu olarak Bai vd. [15] yaptığı çalışmada da en fazla yoğunluk yaz mevsiminin aralık ayı içerisinde görülmüştür [15].

4.2.2 Antarktika'daki araştırma üsleri özelinde rüzgâr enerjisi potansiyeli

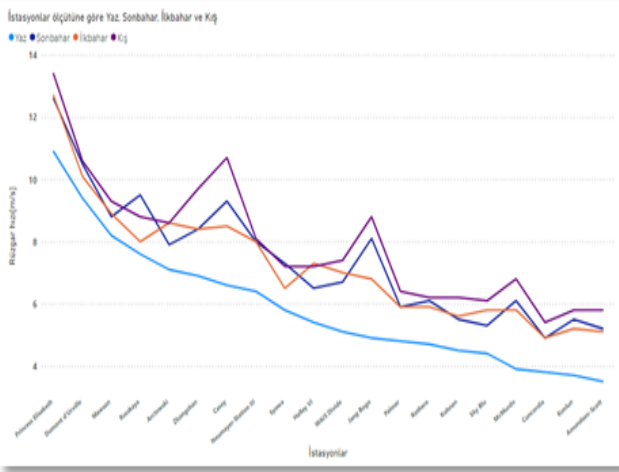
Antarktika kıtasında oldukça güçlü yüzey rüzgarları ile karşılaşmaktadır. Antarktika kıtasında kendine özgü iklimsel özelliklerinden ötürü "Katabatik Rüzgarları" oluşmaktadır. Yoğun alçak basınç sonucu oluşan ve kıta üzerinde sabit bir rüzgâr yönü oluşturan katabatik rüzgarları, dünyanın en etkili yüzey rüzgarları olarak bilinmektedir. [16].

Öncelikle, Antarktika kıtası genelindeki rüzgâr hızlarının mevsimlere ve lokasyona bağlı değişimlerinin incelenmesi oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, Yu ve diğ. [17] tarafından yapılan bir çalışmanın sonuçları incelenmiştir. İlgili çalışmada, Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) Interim Yeniden Analiz (ERA-Interim) yöntemini kullanarak 1979 – 2017 yılları içindeki Antarktika kıtası ve çevresindeki okyanuslar üzerinde rüzgâr hızının standart sapması hesaplanmıştır. İlgili hesap sonuçlarına göre mevsimsel ortalama rüzgâr hızı iç kesimlerde daha az değişime uğrarken Transantarktika, Batı Ross Denizi ve Pasifik okyanusunda daha fazla değişime uğradığı görülmektedir [17]. 1979-2017 arası dönemde Antarktika ve Güney okyanusuna ait rüzgâr hızlarının ortalama mevsimsel standart sapmalarının mekânsal dağılımı Şekil 8'de paylaşılmıştır.



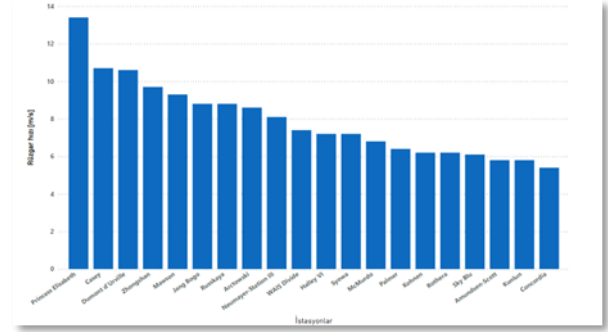
Şekil 8. 1979'dan 2017'ye rüzgâr hızı (ms^{-1}) standart sapması yaz(a), sonbahar(b), kış(c), ilkbahar(d) [17]

Ayrıca, çalışmamızın devamında kıtadaki istasyonlar esas alınarak mevcut rüzgâr enerjisi potansiyeline yönelik incelemelerde bulunulmuştur. 1981-2020 yıllarını kapsayan ve rüzgâr hızlarını içeren MERRA-2 yeniden analiz verileri seçilen istasyonlar özelinde değerlendirilmiştir. Öncelikle aylık rüzgâr hızı değerleri elde edilmiş ve sonraki aşamada yaz, sonbahar, kış, ilkbahar ve yıllık ortalamalar hesaplanmıştır. Seçilen 20 araştırma istasyonuna ait 10 m yükseklikteki ortalama mevsimsel rüzgâr hızı değerlerinden kullanılarak hazırlanan mevsim grafiği Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. İstasyonlar 'da 40 yıllık ortalama mevsimsel rüzgâr hızı (m/s) [6]

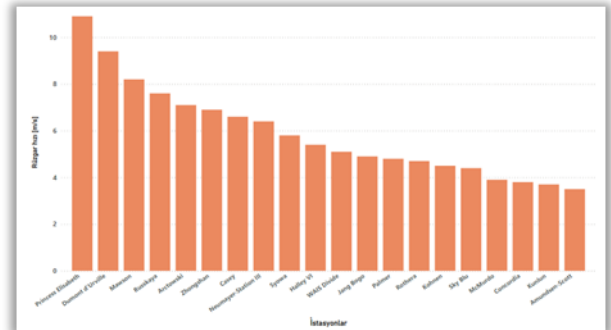
Kış aylarında Katabatik rüzgarların etkisi oldukça artmaktadır. Bu nedenle kış aylarında ortalama rüzgâr hızının yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Yaz aylarında ise güneş radyasyonu artışı nedeniyle ortalama rüzgâr hızları en düşük değerdedir [6]. Şekil 10'da 20 istasyona ait 10 m yükseklikteki kış mevsimi ortalama rüzgâr hızları gösterilmiştir.



Şekil 10. İstasyonlar 'da 40 yıllık kış mevsimi ortalama rüzgâr hızı (m/s) [6]

En yüksek rüzgâr hızı değerlerinin Antarktika kıtasının doğu kıyılarında yer alan Princess Elisabeth, Casey, Dumont d'Urville, Mawson istasyonlarına ait oldukları görülmektedir. Kıtanın iç kesimlerine doğru ilerledikçe ortalama rüzgâr hızının azaldığı görülmektedir. Şekil 10'da paylaşılan grafikten de görüldüğü üzere, ortalama rüzgâr hızı değerleri Concardia, Amudsen-scott, Kunlun ve Kohnen istasyonlarında en düşük seviyededir.

Kıta üzerinde yaz mevsiminde güneş radyasyon yoğunluğu artmakta ve bu artış yüzeyin soğumasını engellemektedir. Buna bağlı olarak katabatik rüzgarlarının gücünü azalmaktadır [16]. Şekil 11'de 20 istasyona ait 10 m yükseklikteki yaz mevsimi ortalama rüzgâr hızları gösterilmiştir.



Şekil 11. İstasyonlar 'da 40 yıllık yaz mevsimi ortalama rüzgâr hızı (m/s) [6]

Yaz aylarında rüzgâr hızında düşüş yaşandığı görülmekle birlikte Antarktika'nın doğu kıyısında bulunan Princess Elisabeth, Dumont d'Urville, Mawson istasyonlarının diğer istasyonlara oranla daha yüksek ortalama rüzgâr hızı seviyelerine sahip oldukları görülmektedir.

Antarktika Kıtası'nın mevsimlere göre ortalama rüzgâr hızı değerleri bizlere bölgede yüksek bir rüzgâr enerjisi potansiyeli olduğunu göstermektedir. Ancak, şiddetli rüzgarların kurulan rüzgâr türbinlerine verebileceği olası zararlar ve bakım maliyetleri düşünülünce rüzgâr enerjisinin kullanımının bazı zorluklar içerdiği açıktır. Örneğin Avustralya üssü Mawson istasyonunda kurulan rüzgâr türbinlerinden birinin kuvvetli rüzgarların etkisiyle kırıldığı bilinmektedir [6]. Bu nedenle bölgeye özgü rüzgâr

türbinlerinin tasarımı ve yeni teknolojik olanaklar üzerinde araştırmaların artırılması gerekmektedir.

Bölgede son zamanlarda rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisinin depolama pilleri ile birlikte kullanımı üzerinde araştırma ve uygulamalar artmaktadır. Örneğin, Zhongsan, Rothera, Princess Elisabeth, Syowa, Jang Bogo gibi istasyonlar enerji üretimlerini hibrit yöntemlerle sağlamaktadır [6].

4.2.3 Antarktika'daki araştırma üsleri özelinde gelgit enerjisi potansiyeli

Gelgit enerjisi okyanus kıyılarında kullanılabilir yenilenebilir enerji türleri arasındadır. Bu nedenle, gelgit enerjisi Antarktika kıtası için olası yenilenebilir enerji kaynakları arasında gösterilebilir. Antarktika kıtasında gelgit enerjisi kullanılarak enerji üretimi yapılmamaktadır. Enerji verimi oldukça yüksek olsa da kıtanın coğrafyası gereği sahip olduğu sert iklim koşulları kurulum ve bakım işlemlerini zorlaştırmaktadır [6].

Okyanus derinliği, okyanus hızı ve yönü ile kıyılarda biriken malzemeler sistemin sürekli ve sağlıklı bir şekilde çalışmasını etkileyecek temel faktörler arasında sayılabilir [6]. Bölge özelinde yaz mevsiminde çözünen buz kütlelerinin sisteme verebileceği zararların yanında ve ilgili sistemin deniz canlılarına verebileceği zararlar da gelgit enerjisinin bu bölgede kullanılabilmesinin önünde büyük bir engel teşkil etmektedir [6].

West vd. [18], Batı Antarktika bölgesinde Ross denizinde kurulu McMurdo istasyonunda sahada yapılan ölçümlere dayanarak gelgit enerjisi analizi gerçekleştirmişlerdir. İstasyonun bulunduğu bölge buz kütleleriyle kaplı olup, okyanus sıcaklığı donma noktasına yakındır. Bu durum, gelgit türbininin çalışması açısından olumsuz bir özellik oluşturmaktadır. Ayrıca, batimetrik ölçülerden bölgenin derinliğinin oldukça sığ olduğu görülmüştür. Bu nedenle su dibine biriken malzemelerin türbin sistemine zarar verebileceği tespit edilmiştir. İlgili çalışmada, gelgit enerjisi potansiyelinin araştırılmasında daha fazla veri ve incelemenin gerekli olduğunun altı çizilmekle birlikte McMurdo istasyonunun yer aldığı bölgedeki gelgit akım hızının düşük olması nedeniyle buraya türbin kurulumu tavsiye edilmemektedir. Ancak, ilgili çalışmada, Antarktika kıtasındaki diğer bölgelerde farklı koşullar geçerli olduğu için detaylı ölçmeler yapılarak kıta genelinde gelgit enerjisi potansiyelinin araştırılması gerektiği de ifade edilmektedir [18].

5 Horseshoe Adasının topoğrafik ve iklimsel özellikleri

2017 yılında gerçekleştirilen Birinci Ulusal Antarktika Bilim Seferi (TAE-I) ile Türkiye'nin kıtadaki faaliyetleri yoğunlaşmış, Antarktika'da üs kurma hedefinin yanı sıra farklı alanlarda çok sayıda bilimsel çalışma yürütülmeye başlanmıştır.

Ulusal Antarktika Seferleri (TAE) öncesi yapılan hazırlıklar sırasında kıtada istasyon kurulabilecek olası 35 lokasyon belirlenmiştir. 2017 yılında gerçekleştirilen TAE-I seferinde yürütülen saha çalışmaları neticesinde olası lokasyon sayısı 17'ye düşürülmüştür [3].

17 bölgeden toplanan verilerin analizi sonucunda olası bölge sayısı 4'e düşürülmüştür. Gerçekleştirilen TAE-II

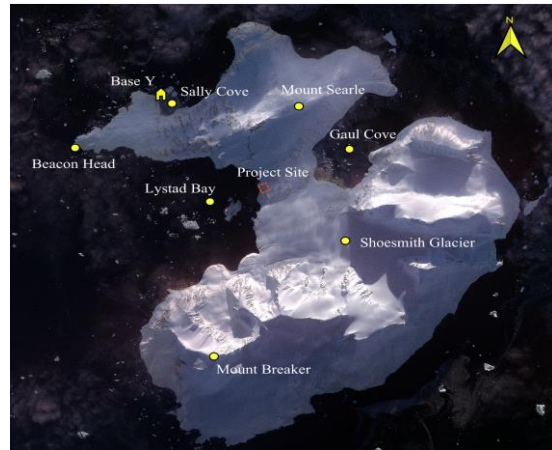
seferi sırasında belirlenen 4 bölgede saha çalışmaları detaylandırılarak gerçekleştirilmiş ve bölge şartları hakkında veriler toplanmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) aracılığı ile Analitik Hiyerarşi Yöntemi kullanılarak 4 bölge kapsamında bir seçim analizi gerçekleştirilmiştir [3].

Antarktika kıtasında, TAE seferlerinin yapıldığı ve sonrasında ülkemizin bilimsel üssüne ev sahipliği yapması planlanan yer Horseshoe Adasıdır. Bu çalışmamızda Horseshoe Adası özelinde yenilenebilir enerji kullanım potansiyelinin analizine yönelik bir ön çalışma da yapılmıştır.

Horseshoe Adası, Antarktika Yarımadasında 67,83° Güney enlemi ve 67,24° Batı boylamında yer almaktadır [19]. Ada hafif eğimli bir araziye sahiptir. Adada 537 m yükseklikte Searle Dağı ile 879 m yükseklikte Breaker Dağı bulunmaktadır [6]. Ada içerisinde yaklaşık 6,5 km²'lik alana sahip Shoemith Buzulu bulunmaktadır [6]. Adanın doğusunda Galya Koyu yer alırken, batısında Lystad Körfezi bulunmaktadır [6]. Ulaşım ve erişim kolaylığı nedeniyle Türk Araştırma Üssü Lystad Körfezinde çalışmalarını yürütmektedir [6]. Şekil 12'de Horseshoe Adasının kıtadaki konumunda ilişkin bir görsel paylaşılmaktadır. Şekil 13'te ise Horseshoe Adasının genel görünümüne ve üzerindeki önemli coğrafi bölgelere ilişkin bir görüntüye yer verilmiştir (TÜBİTAK, 2021).



Şekil 12. Horseshoe adası konumu [19]



Şekil 13. GÖKTÜRK-2 uydu görüntüsünden Horseshoe adasının genel görünümü (TÜBİTAK, 2021)

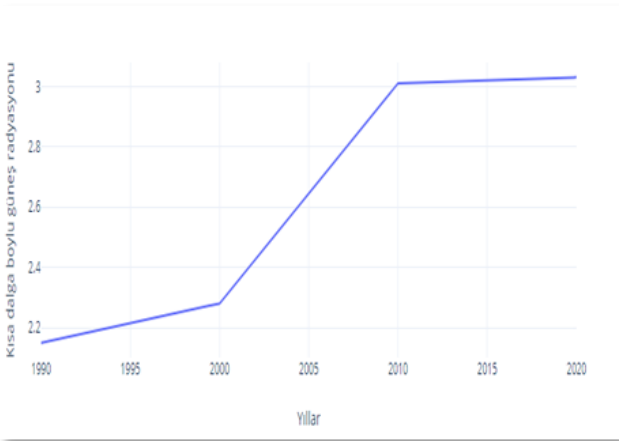
TÜBİTAK tarafından Horseshoe adası için yayımlanan "Türk Araştırma İstasyonu Çevresel Değerlendirme Raporu'nda" bölgedeki iklim şartlarına ilişkin değerlendirmelerin yapılmasında adaya yakın olan San Martín ve Rothera araştırma istasyonları ait uzun süreli meteorolojik veriler kullanılmıştır. Bu raporda yer alan bilgilere göre, San Martín Üssü'nün 1990-2014 yılları arasında yıllık ortalama sıcaklığı 4,6 °C iken, Rothera üssünde 1976-2021 yılları arasındaki aylık ortalama sıcaklıkların -20,5 ile 2,7 °C arasında değiştiği belirtilmiştir. Rothera istasyonuna ait on yıllık günlük sıcaklık ortalaması ise -3,9 °C'dir [6].

6 Horseshoe Adası yenilenebilir enerji potansiyeli

Horseshoe adasında kalıcı ve aktif bir araştırma istasyonu bulunmamaktadır. Türkiye, TAE seferlerinin yapıldığı Horseshoe adasında kalıcı bir araştırma istasyonu kurmayı hedeflemektedir. Bu istasyonda yürütülecek faaliyetler için ihtiyaç duyulacak enerjinin nasıl elde edilebileceği oldukça önemli bir konudur.

Türkiye'nin bölgede kuracağı kalıcı istasyonda enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılaması kitadaki doğal kaynakların ve çevrenin korunmasına katkısı yanında uluslararası kabul edilebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır [6]. Bu bağlamda, bu bölümde Horseshoe adasının yenilenebilir enerji potansiyeli üzerine bir ön değerlendirmede bulunulmuştur.

Horseshoe adasında yenilenebilir enerji potansiyeli için MERRA-2 yeniden analiz verileri kullanılmıştır. Horseshoe adasının 1990,2000,2010 ve 2020 yıllarına ait yıllık ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu verileri kullanılarak oluşturulan grafik Şekil 14'te verilmiştir. Grafikte görüleceği üzere, Horseshoe adası için elde edilen radyasyon değerleri yıllar içinde giderek artmış ve 2020 yılında en yüksek noktaya ulaşmıştır.



Şekil 14. Horseshoe adası 1990-2020 yılları arası ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu [KWh/m²/g] [6]

Oluşturulan bir diğer grafik ise Şekil 15'te sunulmuştur. Bu grafikte ortalama yıllık rüzgâr hızı verileri paylaşılmaktadır. Ortalama rüzgâr hızında yıllara göre

farklılıklar gözlenmiştir. Ortalama rüzgâr hızı en düşük 6.6 m/s iken en yüksek 8,1 m/s olarak kaydedilmiştir.



Şekil 15. Horseshoe Adası 1990-2020 yılları arası ortalama rüzgâr hızı [m/s] [6]

Çalışmanın devamında, Horseshoe adasının yenilenebilir enerji potansiyeli çevre bölgelerle kıyaslanmıştır. Bunun için adaya yakın konumda bulunan Rothera istasyonu ile Antarktika kıtasında enerji ihtiyacı için sadece yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıldığı Princess Elisabeth istasyonu seçilmiştir. Tablo 3'te Rothera ve Princess Elisabeth istasyonuna ait bazı bilgiler verilmiştir.

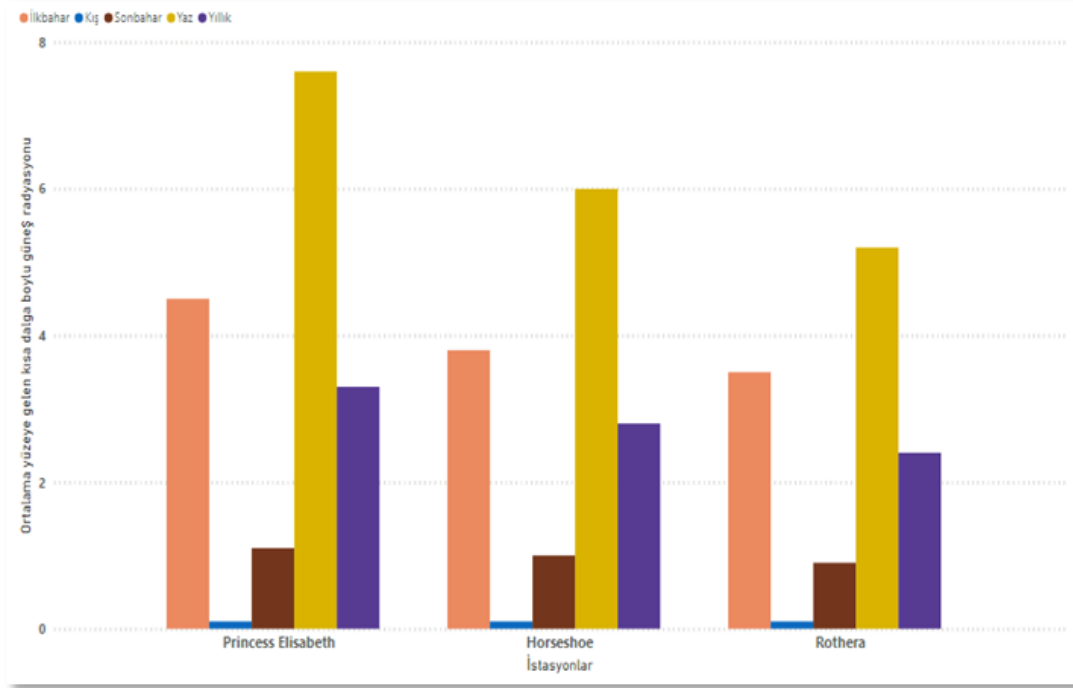
Belçika tarafından işletilen Princess Elisabeth istasyonu yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek olan Dronning Maud Adasında kurulmuştur. İngiliz araştırma üssü olan Rothera istasyonu Horseshoe adasına yakın bir konuma sahip olup, enerji üretiminin belli bir kısmını yenilenebilir enerji ile karşılayabilmektedir. Horseshoe adasının, yakın çevresinde bulunan bu iki araştırma istasyonu ile karşılaştırılması, adanın yenilenebilir enerji potansiyelinin ortaya konması açısından bizlere önemli bilgiler sunabilir [6].

Tablo 3. Princess Elisabeth ve Rothera araştırma istasyonları enerji kaynağı durumu [6]

İstasyonlar	Konum	Enerji Kaynağı
Princess Elisabeth	Dronning Maud Adası	Güneş paneli, Rüzgâr türbini, Depolama pilleri
Rothera	Antarktika Yarımadası	Güneş paneli, Rüzgâr türbini, Depolama pilleri, Fosil yakıt

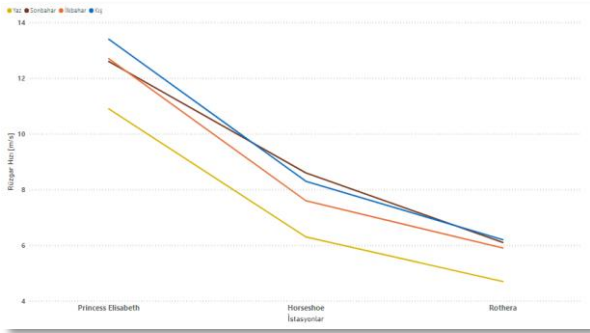
1984-2020 yıllarını kapsayan MERRA-2 yeniden analiz verileri kullanılarak kıyaslanan istasyonlar için mevsimsel ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 16'da paylaşılan grafikte görüldüğü üzere, kıyaslanan üç istasyon için de güneş radyasyon değerleri yaz mevsiminde oldukça yüksektir. Horseshoe adasında görülen radyasyon değerleri Rothera ve Princess Elisabeth istasyonlarının sahip olduğu değerlerinin arasındadır.



Şekil 16. Horseshoe adası ve istasyonlar 'da 37 yıllık ortalama yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu [KWh/m²/g]

Şekil 17'deki grafikte ise kıyaslanan üç istasyona ait ortalama mevsimsel rüzgâr hızları paylaşılmıştır. Ele alınan üç istasyon değerlendirildiğinde hâkim rüzgâr hızı en yüksek Princess Elisabeth istasyonunda hesaplanırken, ilgili istasyonu sırasıyla Horseshoe adası ve Rothera istasyonu takip etmektedir. Ortalama rüzgâr hızları 3 bölge için de kış mevsiminde oldukça etkili görülmektedir.



Şekil 17. Horseshoe adası ve istasyonlar 'da 40 yıllık ortalama rüzgâr hızı [m/s] [6]

7 Bulgular ve tartışma

Antarktika kıtasının topoğrafik, çevresel ve iklimsel özellikleri dikkate alındığında, bölgenin kullanımına izin verdiği yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve gelgit enerjisi sayılabilir. Bu nedenle bölgeye ait potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarının durumu analiz edilirken, sayılan bu üç yenilenebilir enerji kaynağı üzerinde değerlendirmeler yapılmıştır. NASA'ya ait MERRA-2 yeniden analiz

verilerinin kullanıldığı bu çalışmada ortalama tahmin değerleriyle yüzeye gelen kısa dalga boylu güneş radyasyonu ile rüzgâr hızı değerleri elde edilmiştir. Öncelikle, Antarktika'da seçilen 20 araştırma istasyonu üzerinden kıtanın yenilenebilir enerji kullanım potansiyeli ortaya konulmuştur. Ardından, Türkiye'nin kalıcı bir araştırma istasyonu kurmayı hedeflediği Horseshoe adası üzerinde yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli hakkında bir değerlendirme yapılmıştır.

20 istasyon kapsamında 37 yıllık ortalama güneş radyasyon verileri incelendiğinde kıtada Aralık-Şubat döneminde kutup bölgelerine yakın istasyonlarda daha fazla güneş radyasyonu değerleri olduğu gözlemlenirken kış mevsiminde bu değer neredeyse sıfıra inmektedir. Özetle, kıta genelinde güneş enerjisi potansiyeli yalnızca yaz mevsiminde değerlendirilebilmektedir.

20 istasyon kapsamında 40 yıllık ortalama rüzgâr hızı verileri değerlendirildiğinde katabatik rüzgarlarının da etkisiyle rüzgâr hızlarının kış aylarında oldukça arttığı görülmektedir. Mekânsal olarak rüzgâr hızlarının dağılımı incelendiğinde ise Antarktika'nın doğu kıyılarında daha yoğun olan rüzgâr hızının iç bölgelerde daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.

Kıtada hâkim olan aşırı soğuk ve sert iklim şartları nedeniyle rüzgâr ve güneş enerjisinin kullanımında süreklilik sağlanamadığı görülmektedir. Bu nedenle istasyonlarda bu iki enerji kaynağının yetersiz kaldığı durumlarda birbirini destekleyen sistemlerin oluşturulduğu anlaşılmaktadır. Depolama pilleri ile desteklenen hibrit modelin istasyonlarda kullanımının oldukça yoğun olduğu görülmektedir.

Horseshoe adası özelinde gerçekleştirilen çalışmada özellikle Rothera ile kaynağı yalnızca yenilenebilir enerji olan Princess Elisabeth istasyonu verileri değerlendirilmiş ve Horseshoe Adası ile kıyaslanmıştır. Yapılan analizler doğrultusunda adanın konumu itibarıyla yenilenebilir enerji potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan çalışmada elde edilen verilen ortalama tahmin değerleri olduğundan istasyonlara ait çalışmalar daha detaylı gözlemlere dayalı olmalıdır. Ön çalışmada ortaya çıkan potansiyel kullanımlara ilişkin senaryolar doğrultusunda yapım, kullanım ve bakım süreçleri üzerinde değerlendirmeler derinleştirilmelidir. Horseshoe adası özelinde farklı enerji kaynaklarının yaklaşık kurulum maliyetleri ile yaklaşık kullanım ömürlerinin de ayrıntılı bir şekilde analizi gerçekleştirilmelidir. Bu doğrultuda Horseshoe Adası'nda detaylı saha çalışmaları yapılmalıdır.

8 Sonuçlar

Bu çalışmada Antarktika kıtası genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım durumları ve potansiyeli seçilen araştırma istasyonları baz alınarak incelenmiş ve Horseshoe adası özelinde de ilgili konuda değerlendirmelerde bulunulmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda bir liste halinde özetlenmiştir;

- Kıtadaki bazı bilimsel araştırma istasyonlarında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim mevcuttur ancak bu sayı yeterli oranda değildir.
- Araştırma istasyonları özelinde yapılan analizler bölgedeki yenilenebilir enerji kullanım potansiyeli hakkında olumlu sonuçlar verirken, istasyonlardaki mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım durumu da oldukça umut vericidir.
- Yenilenebilir enerji kaynakları mevsimsel farklılıklardan etkilendiği için kıta üzerinde hibrit modelin uygulanması en uygun yöntem olarak görülmektedir.
- Türk araştırma üssünün bulunduğu Horseshoe adasında güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelinin bulunduğu görülmektedir. Özellikle Princess Elisabeth ve Rothera araştırma istasyonları ile yapılan kıyaslamalar da bu durumu desteklemektedir.
- Sürdürülebilir bir yaşam için gerekli olan sürdürülebilir kaynakların geleceğimizi şekillendirdiği açıkken, bu konuda yapılan her çalışma ve atılacak her adım büyük önem taşımaktadır. Ülkemiz adına kurulacak istasyonda yenilenebilir enerji kullanımına yönelik hayata geçirilecek projelerle bölgedeki görünürlüğümüz ve kabul edilebilirliğimiz artacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Oğuz SELBESOĞLU danışmanlığında İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Öğrencisi Şehriban Yiğit tarafından gerçekleştirilen "Antarktika'da yenilenebilir enerji potansiyeli ve Türk araştırma üssü

özelinde bir inceleme" başlıklı ve 740221 Tez Nolu Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

Bu çalışma, TÜBİTAK KUTUP ARAŞTIRMALARI 1001 kapsamında yürütülen, 118Y322 Numaralı ve "Antarktika Bölgesinde Troposfer ve Kar Derinliğinin/Kalınlığının GNSS Meteorolojisi ve GNSS Reflektometresi Yöntemleri ile İzlenmesi" başlıklı projesi ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] R.M. Alkan, S. Erol, B. Mutlu, IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği. *Yerbilimleri*, 43 (1), 76-95, 2022. <https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1050124>.
- [2] S. Altın Coşkun, Antarktika kıtasındaki hukuki rejim ve Türkiye'nin kıtadaki varlığı. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 22 (3), 67-112, 2019
- [3] M. Şenel ve H.H. Yavaşoğlu, Antarktika'da araştırma istasyonu kurmak için en uygun yer seçimi: Türkiye örneği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (1), 72-82, 2020. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.647320>
- [4] E. Özcan, A. Yılmaz, O. Okur ve B. Özsoy, Antarktika seferlerinde araştırma gemilerinin karbon emisyonlarının istatistiksel yaklaşımla belirlenmesi. *Mersin Üniversitesi Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, 4 (1), 25-43, 2022. <https://doi.org/10.54410/denlojad.1079719>
- [5] E. Koç ve K. Kaya, Enerji kaynakları-yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 56 (668), 36-47, 2015.
- [6] Ş. Yiğit, Antarktika'da yenilenebilir enerji potansiyeli ve Türk Araştırma Üssü özelinde bir inceleme, *Yüksek Lisans Tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 2022.
- [7] T. Erdem, Galindez Adası (Antarktika Yarımadası), sediment ve balık örneklerinde pestisit bileşiklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi*, 2018.
- [8] A. Civanoğlu, Türk dış politikasında yeni yönelimler: Antarktika'da Türk araştırma üssü kurulması ve kıtanın geleceği hakkında öngörüler, *Doktora Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Trakya Üniversitesi*, 2019.
- [9] Ulusal Antarktika Programları Yöneticileri Konseyi Hakkında: <https://www.comnap.aq/our-story>, Son Erişim: 17.11.2022.
- [10] CONMAP Antarktika Araştırma Üsleri Web Uygulaması: <https://ucnz.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8663617ffa264e45aa3804d0d08fcdf8>, Son erişim: 17.11.2022
- [11] CONMAP Antarktika Araştırma Üsleri Listesi: <https://github.com/PolarGeospatialCenter/comnap>

- [antarcticfacilities/blob/master/dist/csv/COMNAP_Antarctic_Facilities_Master.csv](#) Son erişim: 17.11.2022
- [12] Küresel Modelleme ve Asimilasyon Ofisi (GMAO) – GEOS: https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao_mission, Son erişim: 18.11.2022.
- [13] Dünya Çapında Enerji Kaynaklarının Tahmini (POWER) projesi: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=52116d331ff64e468fe9351fc1c76423>, Son Erişim: 18.11.2022.
- [14] Princess Elisabeth Antarktika İstasyonu, <http://www.antarcticstation.org/>, Son erişim: 17.11.2022.
- [15] J. Bai, X. Zong, C. Lanconelli, A. Lupi, A. Driemel, V. Vitale, K. Li, et al. Long-term variations of global solar radiation and its potential effects at Dome C (Antarctica). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 3084, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph19053084>,.
- [16] C. Hallgren, Assessment of green power production in Antarctica. Project report 2013, <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-341702>.
- [17] L. Yu, S. Zhong ve B. Sun, The climatology and trend of surface wind speed over Antarctica and the Southern Ocean and the implication to wind energy application. *Atmosphere*, 11(1), 108, 2020 <http://dx.doi.org/10.3390/atmos11010108>.
- [18] B. West, I. Gagnon, M. Wosnik, Tidal energy resource assessment for McMurdo Station, Antarctica. 10.13140/RG.2.2.27884.97920, 2016.
- [19] M.O. Selbesoğlu, H. H. Yavaşoğlu, M. F. Karabulut, H. A. Yavaşoğlu, H. G. Özcan, Ö. Oktar, B. Özsoy, H. Karaman, M. E. Kamaşak ve V. E. Güral, Antarktika'da küresel iklim değişikliği izleme için GNSS istasyon tasarımı: TUR1 ve TUR2 GNSS istasyonlarının 4. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'nde Antarktika Horseshoe Adası'na kurulumu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(6), 1353-1365, 2021 <https://doi.org/10.35414/akufemubid.946282>.





A statistical investigation on the effects of different GNSS systems

Farklı GNSS sistemlerinin etkileri üzerine istatistiksel bir araştırma

Kutalmış Gümüş^{1*}, Cahit Tağı Çelik², Münevver Gizem Gümüş³

^{1,2,3}Niğde Ömer Halisdemir University, Geomatic Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

This study is to investigate the effects of various solutions of GPS only, GLONASS only, and combined GPS/GLONASS observations under different elevation angles on different GNSS days by using Magic GNSS software. Different elevation angles and measurement days were considered to investigate the increasing or decreasing number of satellites' effects on the measurement accuracy, and positioning accuracy affected by the solutions of GPS only, GLONASS only, and combined GPS/GLONASS observations, respectively. The assessment was based on statistical tests, namely ANOVA and Post Hoc tests. A test network, consisting of all the continuous stations of the ISKI CORS network in Istanbul city, was used to fulfill the aims of the study. The results showed that significant differences between positions of points obtained by GNSS in various elevation angles and with different satellite configurations were determined. Different satellite and measurement configurations affect position accuracy. In addition, the results showed that on the 136th GNSS day, significant differences in X and Z components were found while in Y components there were no significant differences encountered. In conclusion, combined GPS/GLONASS solutions produced better results under small elevation angles of 5° 10° or 15° than the solutions of GPS-only and GLONASS-only observations.

Keywords: ANOVA, Elevation Angles, GPS/GLONASS, magic GNSS, Post Hoc Test

1 Introduction

Over the last ten years, GLONASS observations have been combined with GPS observations to improve the positioning accuracy offered by GPS-only and GLONASS-only solutions of phase or code observations. Investigating the position accuracies of combined GPS/GLONASS observations to GPS only observations, several researchers drew slightly controversial conclusions. Steward et al. [1] investigated the internal and external precision of long baselines from GPS, GLONASS and combined GPS/GLONASS observations, and found that long baseline solutions of three cases were compatible with each other at a level of 0.01 ppm. However, larger error ellipses from combined least square solutions were interpreted as the availability of less number of observations of GLONASS for such thousands of kilometer baseline length at the time of the

Öz

Bu çalışma, Magic GNSS yazılımı kullanılarak farklı GNSS günlerinde farklı yükseklik açıları altında yalnızca GPS, yalnızca GLONASS ve kombine GPS/GLONASS gözlemlerinin çeşitli çözümlerinin etkilerini araştırmak içindir. Uydu sayısının artan veya azalan ölçüm doğruluğu üzerindeki etkilerini araştırmak için farklı yükseklik açıları ve ölçüm günleri dikkate alınmıştır. Değerlendirme, ANOVA ve Post Hoc gibi istatistiksel testlere dayanmaktadır. Çalışmanın amaçlarını gerçekleştirmek için İSKİ CORS ağının İstanbul ilindeki tüm sürekli istasyonlarından oluşan bir test ağı kullanılmıştır. Sonuçlar, GNSS ile çeşitli yükseklik açılarında ve farklı uydu konfigürasyonlarında elde edilen noktaların konumları arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Farklı uydu ve ölçme konfigürasyonları, konum doğruluğunu etkilemektedir. Ayrıca sonuçlar, 136. GNSS gününde X ve Z bileşenlerinde anlamlı farklılıklar bulunduğunu, Y bileşenlerinde ise anlamlı bir farkla karşılaşılmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, kombine GPS/GLONASS çözümleri, yalnızca GPS çözümlerine ve yalnızca GLONASS gözlemlerine göre 5° 10° veya 15°'lik küçük yükseklik açıları altında daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar kelimeler: ANOVA, Yükseklik Açılı, GPS/GLONASS, Magic GNSS, Post Hoc Testi

observations (1998-1999). Another study indicating results close to the former by Wang and Wang [2] was carried out to determine the effects of combined GPS/GLONASS observation in long baseline solution and found that the combining GLONASS with GPS observation for long baseline solution increased the baseline accuracy by utilizing two networks namely, four-station network in Australia and EUREF Permanent Network (EPN). While EPN network solution with combined GPS/GLONASS solution slightly improved the accuracy, the solution from the network in Australia presented equal magnitudes of Root Mean Square (RMS) errors with respect to GPS-only observations. Likewise, comparisons of solutions of GPS+GLONASS combination to GPS-only observations showed that combined solutions were compatible to European Permanent Network without degrading the accuracy [3]. Similarly, Cai

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kgumus@ohu.edu.tr (K.Gümüş)

Geliş / Received: 02.11.2022 Kabul / Accepted: 27.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1198208

and Gao [4] investigated the accuracy and reliability of combined GPS and GLONASS solutions by using 10° elevation cut off angle in processing the observations and stated that the combination of GLONASS with GPS-only observation increased the accuracy of PPP solution. Superior results from combined GPS/GLONASS observations compared to solutions of GPS-only observations were obtained by Azab, et al. [5]. Supporting the results of the study, Alcaay et al. [6] concluded that adding GLONASS observations to GPS observations improved the results for short measurement time; typically, up to 4 hours of observations. However, due to Anquela et al. [7], solutions from combined GPS and GLONASS observations did not always improve the convergence of static PPP, but kinematic solutions of them produced more accurate results than that of GPS-only observations. Mohammed et al. [8], investigated achievable repeatability and accuracy from daily PPP solutions using GPS only, GLONASS only and combination of GPS and GLONASS for static positioning. Combined GPS and GLONASS solution produced low repeatability compared to GPS only and GLONASS only in Easting, Northing, and Up components. However, from the precision and accuracy point of view, little or no improvement was achieved compared to GPS only and GLONASS only. Abd-Elazeem, et al. [9], studied the effect of cut-off elevation angle (ranging from 5 to 30 degrees) on the accuracy of GPS positioning and found small standard deviations of the differences between GPS and total station coordinates for low elevation angles (10 to 20 degrees). Ning and Elgered [10] studied trend in atmospheric integrated water vapor for different elevation angles, concluded that systematic errors which were elevation angle dependent varied with time, and recommended more studies to be done.

In terms of processing software, there have been a number of online PPP GNSS processing services available over the last decade. These services provide opportunities for users to obtain high precision results free of charge in

International Terrestrial Frame. Martin et al. [11,12] compared Magic GNSS PPP results to those provided by online services namely; Canadian Spatial Reference System Online Global GPS Pro-cessing Service (CSRS-PPP), the automatic precise positioning service (APPS), GPS analysis and position software (GAPS), and BERNESE, and concluded good performance of Magic GNSS. Considering the above studies, solutions of combined GPS/GLONASS observations need more testing with different strategies.

The aims of this study were to statistically investigate the effects of various solutions utilizing GPS-only, GLONASS-only, and combined GPS/GLONASS observations under different elevation cut off angles on different GNSS days by using Magic GNSS service. Different elevation cut-off angles were considered to investigate the increasing or decreasing number of satellites' effects on the measurement accuracy, and taking observations on different GNSS days aimed at positioning accuracy affected by the solutions utilizing GPS only GLONASS only and combined GPS/GLONASS observations.

2 Material and methods

ISKI CORS network established in Istanbul city consists of eight continuously operating stations. All the stations (Beyk, Kcek, Pala, Sile, Slvr, Terk, Tuzl, Yali) from the ISKI CORS network were used to fulfil the aim of this study. GNSS measurements on the stations covered 24 hours of observations of the 136th, 164th, and 166th GNSS days of the year 2012. Station names, satellite configuration and elevation angles were depicted in Table 1, and Figure 1 shows the locations of the stations. All the measurements from eight stations for three days were included in obtaining coordinates of the stations by using Bernese 5.0 software. In the processing, 13 IGS stations (Ankr, Bucu, Drag, Dubr, Glsv, Graz, Ista, Mat1, Nico, Not1, Polv, Ramo, Sofi) were used as reference stations.

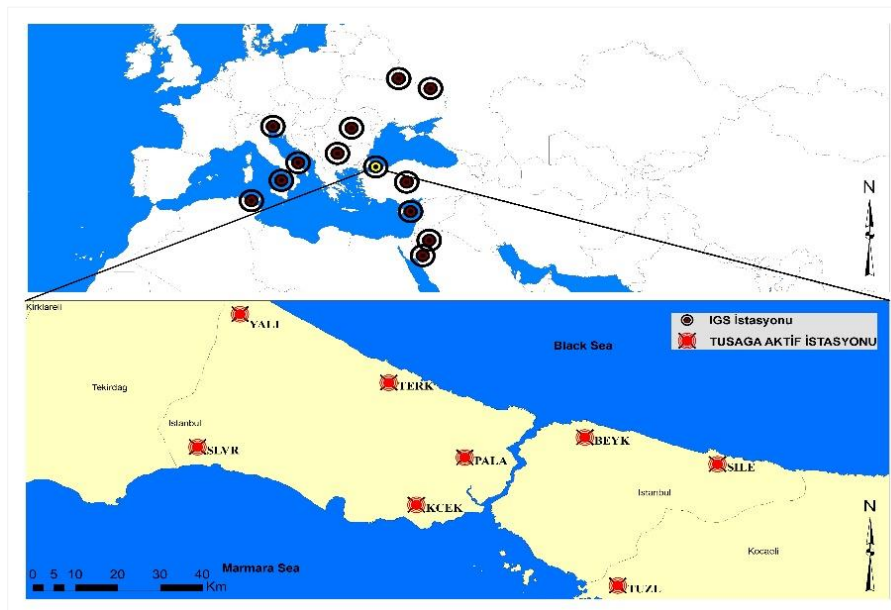


Figure 1. Station location

Table 1. Elevation angles, station names and satellite configurations of ISKI

Elevation Angle (degree)	Satellite Configuration			ISKI UKBS CORS Configuration	IGS Stations	Measure Time	
	GPS+GLONASS	GPS	GLONASS				
0°	√	√	√	Coverage Area: Istanbul	SOFI	ISTA	2012 Year
5°	√	√	√	Datum: ITRF 2008	ANKR	MAT1	
10°	√	√	√	GNSS Stations : 8	BUCU	NICO	136. Day
15°	√	√	√	BEYK KCEK PALA	DRAG	NOT1	164. Day
20°	√	√	√	SILE SLVR TERK	DUBR	POLV	166. Day
25°	√	√	√	TUZZ YALI	GLSV	RAMO	
30°	√	√	√		GRAZ		

In this study, the datum of the coordinate is ITRF2008.00 (International Terrestrial Reference Frame, in 2008.00 epoch) and X, Y, Z are the Cartesian coordinates in meters throughout the study. The coordinates of the eight stations were estimated from the observations taken on three different GNSS days, and the average of these coordinates was taken as true coordinates. These measurements were processed by the web-based Magic GNSS software called MagicPPP which supports GPS, GLONASS, and GALILEO constellations performs static positioning as one of the processing modes, and accepts RINEX or RTCM format as input. Magic GNSS software claims that it can provide sub-cm level of accuracy for observations time around 24 hours [13].

The software can utilize code and phase dual-frequency ionosphere-free combinations. It runs least-squares algorithm which minimizes measurement residuals to solve for GNSS satellite orbits and clock, phase ambiguities, tropospheric zenith delays [14]. The software can create orbit and clock files of GPS and GLONASS with a latency of 30 from GNSS stations distributed worldwide. If IGS products are available at the time of processing, it uses the available IGS files. If not, it uses the created GLONASS orbit and clock files in the process. So, solution of combined GPS and GLONASS observations was made possible [7].

Differences between true coordinates (assumed as the average of these coordinates obtained by processing all the observations in three GNSS days) and those obtained through Magic GNSS processing were taken and used to test whether they were statistically significant or not. A common test for two mean comparisons is usually t-tests. It can be applied to paired means taken at a time but this increases the type 1 error possibility. Therefore, variance test with 95% confidence level was applied to the differences. In the test, the assumption of the each variance of the test groups being homogeneous and normally distributed was statistically tested so the assumptions were fulfilled. According to the test results, if there is any significant difference between the coordinates, then a Post Hoc test in terms of satellite configurations and different elevation angles may be applied to reveal factors that contribute to the significant differences. This test may allow one to analyse which satellite configurations and what elevation angle cause to affect the coordinate accuracy. For the entire statistical test applied SPSS 6.0 software (Statistical Package for the Social Sciences) was used.

In statistical analyses, the t-test is usually used to determine whether there is a significant difference between the two means. Analysis of variance is also used to determine

whether there is a difference between more than two means. In the analysis of variance, dependent and independent variables are used. In general, the effect of independent variables (factors) on dependent variables is investigated. The type of analysis of variance varies according to the number of dependent and independent variables. In Analysis of Variance (ANOVA), each of the groups to be tested must be normally distributed and whether the variances of the groups are homogeneous should be tested before analysis. In this study, differences between groups were evaluated by applying the Tukey test if variance homogeneity was provided, and Tamhane's T2 test if variance homogeneity was not achieved. The ANOVA table generally tells whether there is a difference between the means of the groups. If there is a difference between the groups as a result of the analysis of variance, post-hoc tests are very important so that we can see which group the difference originates from. Tukey and Benferroni tests are commonly used in post-hoc tests. In the ANOVA table, it is tested whether there is a difference between the groups compared. If the value of F used in statistics is greater than the table value of F at the 95% significance level, the Ho hypothesis is rejected. For this, it is necessary to look at the tabular value of F. SPSS gave us the p-value (Sig). If this value is less than 0.05, the Ho hypothesis is rejected. This indicates that there is a difference between the groups. It can be said that there is a significant difference between the groups with significance levels below 0.05. Significance levels are determined by looking at the table values (sig.) obtained from SPSS. Accordingly, pairwise comparisons are made between the groups to determine whether there is a difference between which groups. In addition, SPSS creates subgroups according to the dependent variable. These subgroups are determined according to whether the variables show the same or different characteristics. In this study, the results were interpreted using these statistical analyzes and tests [15].

3 Results and discussions

Coordinates (X, Y, Z) of eight continuously operating reference stations from ISKI CORS in Istanbul acquired on different days (136th, 164th, and 166th GPS days) under different elevation cut-off angles (0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°) were statistically tested whether they were significant or not. Figure 2 shows the mean RMS residuals for the code and phase observations of GPS only, GLONASS only and the combination of GPS/GLONASS obtained through using Magic GNSS, depicting the precision of the raw data in the static position fixing.

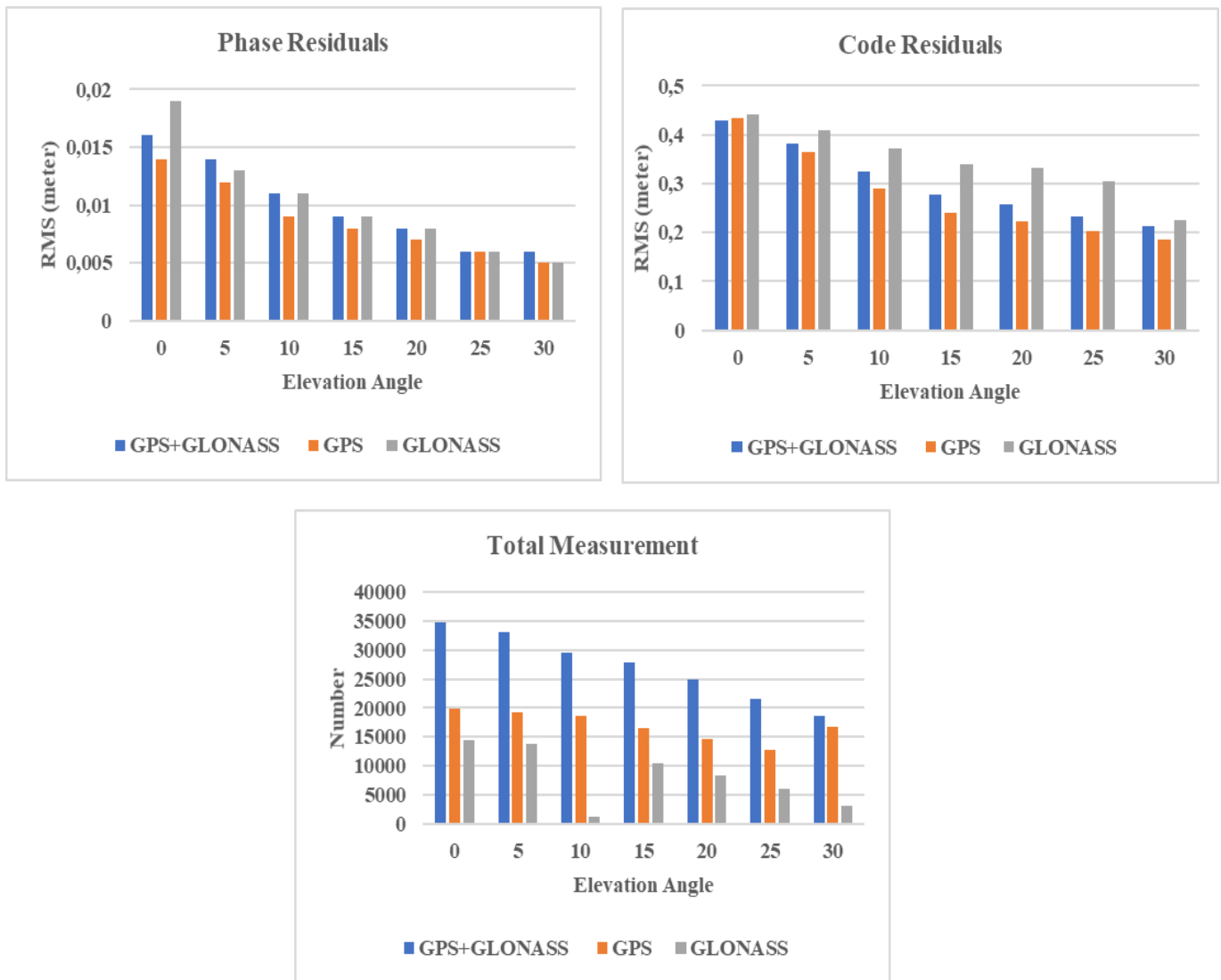


Figure 2. a) RMS of phase residuals, b) RMS of code, and c) RMS of total measurements with respect to elevation cut-off angles for GPS only, GLONASS only and the combination of GPS/GLONASS Observations.

In these results, it is clearly seen that RMS values of phase and code measurements decreased when the satellite elevation angle increased. On the other hand, GPS only solution presented smaller RMS values with respect to those of GLONASS-only solution of code and phase. Accordingly, the results of GPS/GLONASS combinations reflected average values according to the results obtained from GPS only and GLONASS only solutions. In the assessment regarding satellite elevation angles, the total number of observations, which provide useful advantages in GNSS solutions, were naturally decreased. As GLONASS observations provide less number of observations compared to that of GPS only, GPS/GLONASS combinations were improved in terms of number of observations.

Table 2 shows standard deviations of the coordinates from the measurements collected on different days under various elevation angles, and Figure 3 represents the standard deviations of coordinates on the 136th day only.

The standard deviations of coordinates from the combination of GPS and GLONASS, GPS only and GLONASS only observations at 10° and 15° angles on the 136th and 166th days were small compared to those of different elevation angles (Table 2). However, the standard deviations of coordinates on 164th day did not follow the same pattern for the solutions of GPS-only observations while those of GLONASS-only observations illustrate compatible results. In terms of standard deviations of the coordinates, the combination of GPS and GLONASS observations produced ‘best’ results under 10° elevation angles.

True coordinates of the stations were assumed to be the coordinates obtained from the Bernese GNSS software version 5.0. The results of ANOVA (ANALYSIS OF VARIANCE) of the averaged coordinate differences between true values of coordinates and the coordinates obtained from Magic GNSS software on different GNSS days under different elevation angles showed statistically significant differences.

Table 2. Standard deviations of coordinates under different satellite configurations on different days (m).

GNSS Time	Elevation Angle (degree)	GPS+GLONASS			GPS			GLONASS		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
136.DAY	0°	0.006	0.005	0.004	0.009	0.004	0.006	0.020	0.010	0.016
	5°	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.010	0.004	0.009
	10°	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.004	0.005
	15°	0.004	0.004	0.004	0.005	0.004	0.004	0.007	0.006	0.008
	20°	0.007	0.004	0.006	0.007	0.003	0.005	0.009	0.008	0.011
	25°	0.006	0.003	0.005	0.008	0.002	0.007	0.009	0.006	0.014
	30°	0.004	0.004	0.005	0.007	0.006	0.007	0.013	0.008	0.010
164. DAY	0°	0.009	0.006	0.009	0.026	0.018	0.024	0.012	0.006	0.011
	5°	0.006	0.003	0.005	0.007	0.004	0.005	0.005	0.002	0.004
	10°	0.006	0.003	0.005	0.005	0.005	0.005	0.008	0.006	0.006
	15°	0.005	0.002	0.003	0.006	0.004	0.004	0.009	0.002	0.007
	20°	0.003	0.002	0.002	0.003	0.006	0.003	0.009	0.004	0.008
	25°	0.004	0.003	0.004	0.005	0.005	0.007	0.013	0.007	0.011
	30°	0.003	0.004	0.003	0.005	0.009	0.004	0.009	0.007	0.013
166.DAY	0°	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.009	0.016	0.009	0.018
	5°	0.004	0.008	0.007	0.005	0.007	0.006	0.010	0.006	0.012
	10°	0.003	0.008	0.004	0.005	0.009	0.005	0.004	0.006	0.004
	15°	0.004	0.006	0.004	0.005	0.008	0.004	0.004	0.006	0.004
	20°	0.004	0.006	0.003	0.004	0.008	0.002	0.008	0.007	0.006
	25°	0.007	0.006	0.005	0.007	0.007	0.008	0.014	0.009	0.015
	30°	0.005	0.007	0.007	0.006	0.012	0.006	0.014	0.013	0.014

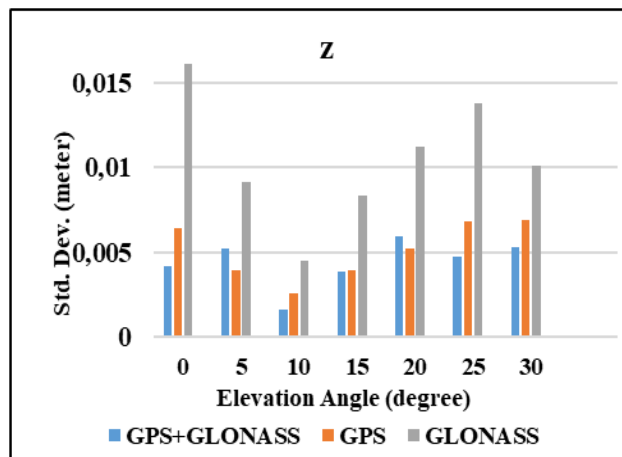
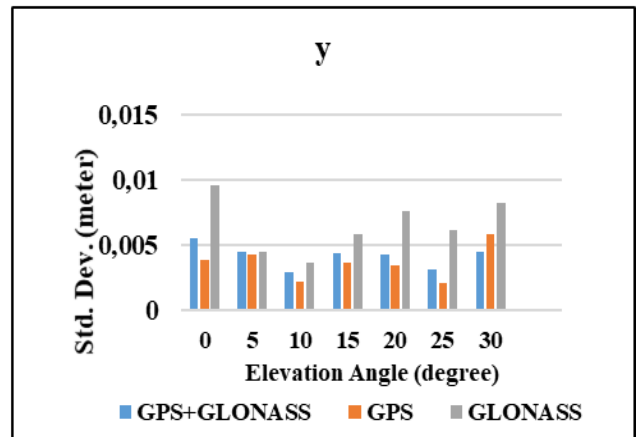
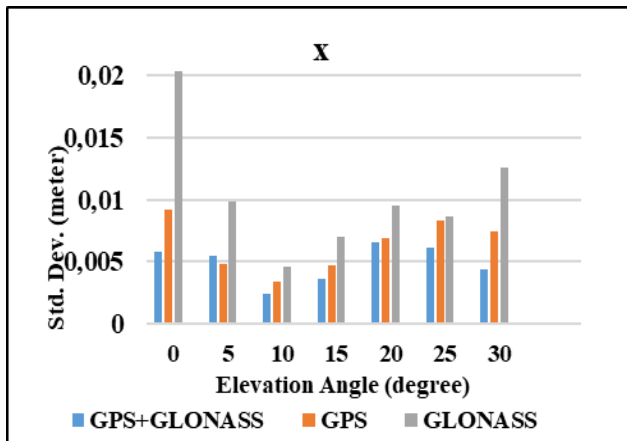


Figure 3. Standard deviations of coordinates on the day of 136th

Therefore, Post Hoc test were applied to mean differences to reveal which satellite constellations were causing the significant differences. This was done by comparing mean coordinate differences obtained from paired combinations of GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS only observations, and Table 3 shows the significant differences found. When the table above is examined, it shows that there is a statistically significant difference between the groups whose (Sig.) value is less than 0.05. In Table 3, grey highlighted rows represent statistically significant differences. Clearly, on the 136th GNSS day, significant differences in X and Z components were determined while in Y components there were no significant differences encountered. This may be because of the degrading GLONASS observations. On the other hand,

GNSS days of 164 and 166 didn't represent any significant differences.

Table 4 shows the subgroups obtained from different satellite configurations. From Table 4, the coordinates obtained through the combination of GPS and GLONASS and GPS only observations on 136th and 164th GNSS days were included in the same group while the coordinates from GLONASS-only observations were assigned in a single group. This indicated that both results of the combined GPS/GLONASS and GPS only observations showed similar properties. However, for the 166th GNSS day, all the coordinate components were included in one group. One can generalize this as the results of the combined GPS/GLONASS and GPS-only observations show similar solutions.

Table 3. Comparisons of mean coordinate differences obtained from paired combinations of GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS only observations in terms of satellite configurations (m)

Dependent Variable	Satellite (I)	Satellite (J)	x		y		z	
			Mean Diff. (I-J)	Sig.	Mean Diff. (I-J)	Sig.	Mean Diff. (I-J)	Sig.
136. DAY	GPS+GLONASS	GPS	-0.003	0.681	0.002	0.167	-0.001	0.962
		GLONASS	0.009	0.005	0.001	0.635	0.007	0.027
	GPS	GPS+GLONASS	0.003	0.681	-0.002	0.167	0.001	0.962
		GLONASS	0.012	0.000	-0.001	0.970	0.008	0.007
	GLONASS	GPS+GLONASS	-0.009	0.005	-0.001	0.635	-0.007	0.027
		GPS	-0.012	0.000	0.001	0.970	-0.008	0.007
164. DAY	GPS+GLONASS	GPS	0.001	0.965	-0.001	0.988	0.001	0.934
		GLONASS	-0.003	0.631	-0.003	0.242	-0.002	0.794
	GPS	GPS+GLONASS	-0.001	0.965	0.001	0.988	-0.001	0.934
		GLONASS	-0.004	0.459	-0.002	0.517	-0.004	0.532
	GLONASS	GPS+GLONASS	0.003	0.631	0.003	0.242	0.002	0.794
		GPS	0.004	0.459	0.002	0.517	0.004	0.532
166. DAY	GPS+GLONASS	GPS	-0.003	0.760	-0.001	0.918	-0.002	0.832
		GLONASS	-0.001	0.994	-0.002	0.702	-0.002	0.746
	GPS	GPS+GLONASS	0.003	0.760	0.001	0.918	0.002	0.832
		GLONASS	0.002	0.872	-0.001	0.972	0.000	0.999
	GLONASS	GPS+GLONASS	0.001	0.994	0.002	0.702	0.002	0.746
		GPS	-0.002	0.872	0.001	0.972	0.000	0.999

Table 4. Subgroups created according to different satellite configurations (m)

Tukey HSD (Subset for alpha = 0.05)														
Satellite	x					y					z			
	136.DAY		164.DAY		166.DAY	136.DAY		164.DAY		166.DAY	136.DAY		164.DAY	
	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	1
GPS+GLONASS	-0.004		-0.001		0.000	-0.001	-0.010		-0.006	-0.002		0.005		0.000
GPS	-0.001		-0.003		0.002	-0.003	-0.010		-0.005	-0.001		0.004		0.002
GLONASS		-0.013		0.002	0.000	-0.002		-0.007	-0.004		-0.010		0.008	0.003
Sig.	0.171	1.000	0.714	0.179	0.198	1.000	0.897	0.100	0.473	0.741	1.000	0.599	0.341	0.265

Means for groups in homogeneous subsets are displayed

Similarly, Post Hoc test were applied to the mean differences to reveal which elevation angles contributed to the significant differences resulting from the variance test.

The test results in Y, X and Z components were tabulated in Table 5, 6, and 7 correspondingly. In the tables, only those of insignificant differences were given to save space.

Table 5. Comparisons of mean coordinate differences of Y component in pair of the results of combined GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS only observations in terms of elevation cut-off angles

136.DAY				164.DAY				166.DAY			
Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.	Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.	Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.
0°	5°	-0.003	0.710	0°	5°	-0.006	0.353	0°	10°	-0.007	0.122
0°	10°	-0.005	0.103	5°	0°	0.006	0.353	5°	0°	0.004	0.924
0°	15°	-0.005	0.181	10°	15°	-0.001	1.000	5°	10°	-0.003	0.949
0°	20°	-0.007	0.017	10°	20°	-0.003	0.905	5°	15°	-0.006	0.125
5°	0°	0.003	0.710	15°	10°	0.001	1.000	10°	0°	0.007	0.122
5°	10°	-0.002	0.982	15°	20°	-0.002	0.584	10°	5°	0.003	0.949
5°	15°	-0.001	0.999	20°	10°	0.003	0.905	10°	15°	-0.002	0.998
5°	20°	-0.003	0.396	20°	15°	0.002	0.584	10°	20°	-0.004	0.726
10°	0°	0.005	0.103	25°	30°	-0.005	0.160	15°	5°	0.006	0.125
10°	5°	0.002	0.982	30°	25°	0.005	0.160	15°	10°	0.002	0.998
10°	15°	0.000	1.000	0°	5°	-0.004	0.924	15°	20°	-0.002	1.000
10°	20°	-0.002	0.974					15°	25°	-0.005	0.280
15°	0°	0.005	0.181					20°	10°	0.004	0.726
15°	5°	0.001	0.999					20°	15°	0.002	1.000
15°	10°	0.000	1.000					20°	25°	-0.003	0.922
15°	20°	-0.002	0.986					25°	15°	0.005	0.280
20°	5°	0.003	0.396					25°	20°	0.003	0.922
20°	10°	0.002	0.974					25°	30°	-0.006	0.517
20°	15°	0.002	0.986					30°	25°	0.006	0.517
20°	25°	-0.004	0.274								
25°	20°	0.004	0.274								
25°	30°	-0.003	0.907								
30°	25°	0.003	0.907								

Table 6. Comparisons of mean coordinate differences of X component in pair of the results of combined GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS only observations in terms of elevation cut-off angles

136.DAY				164.DAY				166.DAY			
Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.	Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.	Angle (I)	Angle (J)	Mean Diff. (I-J)	Sig.
0°	5°	-0.010	0.073	0°	5°	-0.008	0.533	0°	5°	-0.006	0.583
5°	0°	0.010	0.073	5°	0°	0.008	0.533	5°	0°	0.006	0.583
5°	10°	-0.002	0.996	10°	15°	-0.004	0.776	20°	25°	-0.004	0.799
10°	5°	0.002	0.996	15°	10°	0.004	0.776	25°	20°	0.004	0.799
20°	25°	-0.007	0.145	15°	20°	-0.005	0.205	25°	30°	-0.007	0.615
20°	30°	-0.011	0.095	20°	15°	0.005	0.205	30°	25°	0.007	0.615
25°	20°	0.007	0.145								
25°	30°	-0.004	0.999								
30°	20°	0.011	0.095								
30°	25°	0.004	0.999								

Table 7. Comparisons of mean coordinate differences of Z component in pair of the results of combined GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS only observations in terms of elevation cut-off angles

136.DAY				164.DAY				166.DAY			
Angle	Angle	Mean Diff.	Sig.	Angle	Angle	Mean Diff.	Sig.	Angle	Angle	Mean Diff.	Sig.
(I)	(J)	(I-J)		(I)	(J)	(I-J)		(I)	(J)	(I-J)	
0°	5°	-0.009	0.089	0°	5°	-0.008	0.374	0°	5°	-0.006	0.640
5°	0°	0.009	0.089	5°	0°	0.008	0.374	5°	0°	0.006	0.640
5°	10°	-0.003	0.917	10°	15°	-0.004	0.497	5°	10°	-0.006	0.057
10°	5°	0.003	0.917	15°	10°	0.004	0.497	10°	5°	0.006	0.057
10°	15°	-0.005	0.072	15°	20°	-0.004	0.116	20°	30°	-0.005	0.411
15°	10°	0.005	0.072	20°	15°	0.004	0.116	25°	30°	0.009	0.089
15°	20°	-0.007	0.021					30°	20°	0.005	0.411
20°	30°	-0.007	0.082					30°	25°	-0.009	0.089
25°	30°	0.005	0.961								
30°	20°	0.007	0.082								
30°	25°	-0.005	0.961								

In general, pairwise comparison became significant as the difference of elevation angle increased and vice versa. It is noted here that the results of comparisons in Y components as compared to the other components showed more statistical insignificance. The effect of elevation angle on coordinate

accuracies was determined by creating subgroups similar to the ones created for different satellite configurations. The results of the Y, X, and Z components are given in [Table 8](#), [9](#), and [10](#) correspondingly.

Table 8. Sup groups of elevation angles for Y components

Elevation	Tukey HSD (Subset for alpha = 0.05)														
	136. DAY				164. DAY					166. DAY					
Angle	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
0°	-0.01				-0.02					-0.01					
5°	0.00	0.00				-0.02				-0.01	-0.01				
10°		0.00					-0.01			-0.01	-0.01	-0.01			
15°			0.00					-0.01			0.00	0.00	0.00		
20°				0.00				-0.01	-0.01				0.00	0.00	
25°					0.00	0.00			0.00	0.00				0.00	
30°							0.01			0.00				0.01	
Sig.	0.25	0.23	0.14	0.54	1.00	1.00	0.72	0.09	0.08	0.06	0.24	0.62	0.37	0.19	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Table 9. Sup groups of elevation angles for X components

Elevation Angle	Tukey HSD (Subset for alpha = 0.05)															
	136. DAY					164. DAY					166. DAY					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
0°	-0.03					-0.02						-0.02				
5°		-0.02					-0.01						-0.01			
10°		-0.01	-0.01					-0.01						0.00		
15°			-0.01					0.00	0.00				0.00	0.00		
20°				0.00					0.00					0.01	0.01	
25°				0.01	0.01					0.01					0.01	0.01
30°					0.01						0.02					0.02
Sig.	1.00	0.97	0.22	0.06	0.59	1.00	1.00	0.72	0.53	1.00	1.00	0.16	0.05	0.12	0.42	0.07

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

Table 10. Sub groups of elevation angles for Z components

Elevation Angle	Tukey HSD (Subset for alpha = 0.05)																	
	136. DAY						164. DAY						166. DAY					
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
0°	-0.02					-0.01						-0.02						
5°		-0.01					-0.01						-0.01	-0.01				
10°		-0.01	-0.01				0.00	0.00					0.00	0.00				
15°			-0.01					0.00	0.00					0.00	0.00			
20°				0.00					0.01						0.01	0.01		
25°					0.08					0.02						0.01		
30°					0.01						0.03						0.02	
Sig.	1.00	0.90	0.31	1.00	0.34	1.00	0.09	0.70	0.59	1.00	1.00	0.15	0.13	0.12	0.33	0.37	1.00	

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

In the tables above, in the subgroups created for the elevation angle, groups with the same or different characteristics ranging from 4 to 6 were found. In each group, elevation angles showed similar properties. The elevation angles of 5°, 10° and 15° were grouped together while the elevation angle 25° and 30° were grouped into another. It is noted here that as the difference of elevation angles in degrees increased, they didn't present similar properties. In another word, significant differences between various elevation angles and satellite configurations became obvious. Rising and setting satellites affected the accuracy of the coordinates.

In addition to these, the effects of satellite configurations and elevation angles as the dependent variables in

determining the coordinate components of eight stations were investigated. This was done by carrying out Multivariate test. The Wilk's Lambda test results were given in Table 11. In Table 11, it can be seen that the effect of elevation angles in positioning was more than that of the solutions of GPS/GLONASS, GPS-only, GLONASS-only observations. The magnitude of the effect can be seen in the column of Partial Eta Squared, and the significance of the effects of independent variables to dependent variables can be seen in the sig column. Here only satellite*angle in Y components were found to be insignificant, and the effects of different satellite configurations and different elevation angles together to independent variable were obtained to be small.

Table 11. Multiple comparisons

	Effect	Value	F	df	Error df	Sig.	Partial Eta Squared
x	Intercept	0.566	37.114	3	145.000	0.000	0.434
	Satellite	0.600	14.067	6	290.000	0.000	0.225
	Angle	0.148	21.973	18	410.607	0.000	0.471
	Satellite * Angle	0.594	2.301	36	429.146	0.000	0.160
y	Intercept	0.277	125.984	3	145.000	0.000	0.723
	Satellite	0.912	2.266	6	290.000	0.037	0.045
	Angle	0.281	12.904	18	410.607	0.000	0.345
	Satellite * Angle	0.744	1.255	36	429.146	0.153	0.094
h	Intercept	0.420	66.798	3	145.000	0.000	0.580
	Satellite	0.689	9.884	6	290.000	0.000	0.170
	Angle	0.158	20.960	18	410.607	0.000	0.459
	Satellite * Angle	0.685	1.628	36	429.146	0.014	0.118

4 Conclusions

This study was to investigate the effects of various solutions of GPS only, GLONASS-only and combined GPS/GLONASS observations under different elevation angles on different GNSS days by using Magic GNSS service.

Coordinates (X, Y, Z) obtained from ISKI CORS in Istanbul acquired on different days (136th, 164th, and 166th GPS days) under different elevation cut-off angles (0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°) compared to the assumed true coordinates, and were statistically tested whether they were significant or not.

The results showed that RMS values of phase and code measurements decreased when the satellite elevation angle increased. On the other hand, GPS only solution presented smaller RMS values with respect to those of GLONASS-only solution of code and phase. Accordingly, the results of GPS/GLONASS combinations reflected average values according to the results obtained from GPS only and GLONASS-only solutions. In the assessment regarding satellite elevation angles, the total number of observations naturally decreased. As GLONASS observations provide less number of observations compared to that of GPS only, GPS/GLONASS combinations were improved in terms of number of observations.

The standard deviations of coordinates from the combination of GPS and GLONASS, GPS-only and GLONASS-only observations at 10° and 15° angles on 136th and 166th days were small compared to those of different elevation angles. However, the standard deviations of coordinates on the 164th day did not follow the same pattern for the solutions of GPS-only observations while those of GLONASS-only observations illustrate compatible results. In terms of standard deviations of the coordinates, the

combination of GPS and GLONASS observations produced 'best' results under 10° elevation angles.

The results of ANOVA of the averaged coordinate differences between true values of coordinates and the coordinates obtained from Magic GNSS software on different GNSS days under different elevation angles showed statistically significant differences

Post Hoc test were applied to mean differences to reveal which satellite constellations were causing the significant differences. The results showed that there were statistical significant differences of the mean coordinate differences obtained from paired combinations of GPS/GLONASS, GPS only and GLONASS-only observations. The results showed that on the 136th GNSS day, significant differences in X and Z components were determined while in Y components there was no significant differences encountered. This may be because of the degrading GLONASS observations. On the other hand, GNSS days of 164 and 166 didn't represent any significant differences.

Similarly, Post Hoc test were applied to the mean differences to reveal which elevation angles contributed in the significant differences resulted from the variance test. It was found that significant differences between various elevation angles and satellite configurations were detected. Rising and setting satellites effected the accuracy of the coordinates.

It is concluded that better results from GPS/GLONASS combinations in comparison to GPS and GLONASS-only solutions might be obtained under small elevation cut-off angles of 5° 10° or 15°.

This research was conducted using all the continuously operating stations of ISKI CORS in Istanbul. The stations extend 10-30 km baseline length. Results from larger CORS network should be carried out.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 12%

References



- [1] M. P. Stewart, M. Tsakiri, J. Wang and J. F. Monico, The contribution of GLONASS measurements to regional and continental scale geodetic monitoring regimes. *Earth, planets and space*, 52(10), 877-880, 2000. <https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/BF03352299>
- [2] J. Wang and J. Wang, Comparing long baseline results from GPS and GPS/GLONASS. In *Combined Int. Symp. & Exhibition on Geoinformation & GNSS, Johor Bahru, Malaysia, 5-7, 2007*. https://www.researchgate.net/profile/Jinling-Wang-8/publication/252717012_Comparing_Long_Baseline_Results_from_GPS_and_GPS_GLONASS/links/0deec52c2163d3e413000000/Comparing-Long-Baseline-Results-from-GPS-and-GPS-GLONASS.pdf
- [3] C. Bruyninx. Comparing GPS-only with GPS + GLONASS positioning in a regional permanent GNSS network. *GPS Solutions*, 11, 97–106, 2007. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-006-0041-9>
- [4] C. Cai and Y. Gao, Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations. *Journal of Global Positioning Systems*, 6(1), 13-22, 2007. <https://www.scirp.org/html/348.html?pagespeed=noscript>
- [5] M. Azab, A. El-Rabbany, M. N. Shoukry & R. Khalil. Precise Point Positioning Using Combined GPS/GLONASS Measurements. *FIG Working Week Bridging the Gap between Cultures Marrakech, Morocco, 18-22 May, 2011*. http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2011/ppt/ts04j/ts04j_azab_elrabbany_et_al_5277_ppt.pdf
- [6] S. Alcay, C. Inal, and C. Ozer, Contribution of GLONASS Observations on Precise Point Positioning. *FIG Working Week 2012, knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. Rome, Italy, 6-10 May, 2012*.
- [7] A. B. Anquela, A. Martín, J. L. Berné and J. Padín, GPS and GLONASS Static and Kinematic PPP Results. *Journal of Surveying Engineering*, 47, February, 2013. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000091](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000091)
- [8] J. Mohammed, T. Moore, C. Hill, R. M. Bingley and D. N. Hansen, An assessment of static precise point positioning using GPS only, GLONASS only, and GPS plus GLONASS, *Measurement* 88, 121–130, 2016. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116300161>
- [9] M. Abd-Elazeem, A. Farah, and F. A. Farrag, Cut-Off elevation angle effect on GPS positioning accuracy. *Al-Azhar University Engineering Journal, JAUES*, 5(1), 565 -570, 2010.
- [10] T. Ning and G. Elgered, Trends in the atmospheric water vapor content from ground-based GPS: The impact of the elevation cutoff angle. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(3), 744-751, 2012. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6185695>
- [11] A. Martín, A. B. Anquela, J. L. Berné and M. Sanmartín, Kinematic GNSS-PPP results from various software packages and raw data configurations, *Sci. Res. Essays*, 7(3), 419-431, 2012. <https://riunet.upv.es/handle/10251/34504>
- [12] A. Martín, A. B. Anquela, R. Capilla and J. L. Berné, PPP technique analysis based on time convergence, repeatability, IGS products, different software processing, and GPS 1 GLONASS constellation. *J. Surv. Eng.*, 137(3), 99-108, 2011. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000047](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000047)
- [13] GMV, <https://www.gmv.com/en-es/products/space/mag icpppr>, Accessed 28 June 2020
- [14] R. Piriz, A. Mozo, P. Navarro and D. Rodríguez, MagicGNSS: Precise GNSS products out of the box. In *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*, 1242-1251, 2008. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8036>
- [15] S. Kalaycı, SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri, Asil Yayın Dağıtım Ltd., Şti. 5. Baskı, Kızılay, Ankara, ISBN: 975-9091-14-3, 2010.





İnce taneli zeminlerin kayma dayanım parametrelerinin drenajlı deneylerle belirlenmesi

Determination of shear strength parameters of fine grained soils by drained tests

Hatice Seray Zedeli^{1,*} , Hasan Savaş² 

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26040, Eskişehir, Türkiye

Öz

Zeminlerin kayma dayanımı geoteknik mühendisliğinin önemli konulardan biridir. Zeminlerde gerilme-deformasyon karakteristiklerinin belirlenmesinde, temellerin taşıma gücü hesaplarında, istinat yapılarının tasarımında, heyelan analizlerinde ve şev stabilite tahkiklerinde kayma dayanımı parametrelerine ihtiyaç duyulur. Analizlerde kullanılacak dayanım parametreleri efektif ve toplam gerilmeler esasında değerlendirilir. Uzun dönemli analizlerde drenajlı (efektif), kısa dönemli analizlerde ise drenajsız (toplam) parametreler kullanılır. Uzun dönemli analizlerde gerek duyulan efektif parametrelerin belirlenmesinde farklı laboratuvar deney yöntemleriyle deneylerin yapılması ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması güvenilir tasarım için gereklidir. Bu çalışmada ince taneli zeminlerin drenajlı kayma dayanım parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla kompaksiyon karakteristiklerinde hazırlanan ince taneli zemin örnekleri üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı (CD) üç eksenli basınç deneyi, kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyi yapılmış ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kayma dayanımı, Üç eksenli basınç deneyi, Halka kesme deneyi, Kesme kutusu deneyi, Kil

1 Giriş

Malzemenin taşıyabileceği en büyük veya nihai gerilmeye dayanım denir. Geoteknik mühendisliğinde esas olan zeminlerin kayma dayanımıdır. Çünkü zemin çekme gerilmelerini çok fazla alamaz. Zemin problemlerinin çoğu zeminin dayanımını aşan kayma gerilmelerinden kaynaklanmaktadır [1]. Zeminlerin kayma dayanımı kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) parametreyle ifade edilmektedir. Bu parametreler zemin tabakalarından alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu parametreler bir zemin için sabit değerler olmayıp deneyde kullanılan yükleme ve drenaj koşullarına göre değişkenlik göstermektedirler. Ayrıca zeminlerin kayma mukavemeti için gerilme şekil değiştirme davranışları incelendiğinde kayma gerilmelerinin deformasyon seviyelerinden etkilendiği görülmektedir. Kayma gerilmesinin artan deformasyon ile birlikte pik kayma gerilmesine ulaşıktan sonra düşmeye başlayıp

Abstract

Shear strength of soils is one of the important issues in geotechnical engineering. Shear strength parameters are needed in determining the stress-strain characteristics of soils, calculating the bearing capacity of foundations, designing retaining structures, landslide analyzes and slope stability verifications. The strength parameters to be used in the analysis are evaluated on the basis of effective and total stresses. Drained (effective) parameters are used in long-term analyzes and undrained (total) parameters are used in short-term analyzes. To determine the effective parameters required in long-term analysis, it is necessary to conduct experiments with different laboratory test methods and to compare the results obtained for reliable design. In this study, it is aimed to find the drained shear strength parameters of fine-grained soils. For this purpose, consolidated-drained (CD) triaxial compression test, shear box test and ring shear test were performed on fine-grained soil samples prepared with compaction characteristics and the results were compared.

Keywords: Shear strength, triaxial compression test, Ring shear test, Shear box test, Clay

sabitlendiği değere ise kalıcı (rezidüel) kayma dayanımı olarak tanımlanmıştır [2].

Kayma dayanımı parametreleri zemin türüne ve yükleme hızına göre toplam gerilme parametreleri (drenajsız) ve efektif gerilme parametreleri (drenajlı) olarak ikiye ayrılır. Stabilite problemlerinde bu parametrelerden hangisinin kullanılacağını belirlemek önemlidir. İnce taneli zeminlerin geçirgenliği (permabilitesi) düşük olduğu için drenajsız kayma dayanımı parametreleri kullanılırken, iri taneli zeminlerde drenajlı kayma dayanımı parametreleri kullanılır [3]. Bahsedilen durumlara ek olarak; ince taneli zeminlerin uzun süreli stabilite analizleri söz konusuysa, suyun sistemden bu süre içerisinde drene olabileceği varsayılarak drenajlı kayma dayanımı parametreleri kullanılır. Drenajsız dayanım laboratuvar ve arazi deneyleriyle belirlenebilirken; drenajlı dayanım sadece laboratuvar deneyleriyle belirlenir. Kesme kutusu, halka kesme ve konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli kesme deneyi drenajlı dayanımı bulmak için kullanılan deneylerdendir [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: seraysezgin@hotmail.com (H. S. Zedeli)
Geliş / Received: 29.11.2022 Kabul / Accepted: 18.01.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1211891

Zeminlerin kayma dayanımıyla ilgili çalışmalar 18.yüzyılın ortalarında Coulomb ile başlamıştır. Coulomb bu dönemde kayma dayanımı parametrelerini bulmak için kesme kutusuna benzer bir düzenek kullanmıştır. 19.yüzyılda Collin; kil şevlerdeki yenilmeler ve kil zeminlerin kayma dayanımının ölçülmesiyle ilgili çalışmalar yapmıştır [1]. 1954'te Skempton ve Bishop zeminin karşı koyduğu en büyük kayma gerilmesinin kayma direnci olduğunu ispatlamıştır. Horslev ise 1960'ta zeminin yenilme anındaki kayma gerilmesini kayma dayanımı olarak açıklamıştır [4]. Fredlund ve Rahardjo (1993), kayma dayanımını konsolidasyonlu drenajlı deneyle ölçmek için modifiye edilmiş direkt kesme makinesi kullanmışlardır [5]. Kenney (1959), Bjerrum ve Simons (1960), U.S. Navy (1971) ve Ladd vd.(1977) yaptıkları çalışmalarda drenajlı kayma dayanımı parametreleriyle ilgili önemli bulgular ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalara dayanarak killer üzerindeki üç eksenli basınç deneyinde efektif içsel sürtünme açısının plastisite indisine bağlı olduğu korelasyonlar elde edilmiştir [6-9]. Skempton 1985'te halka kesme deneyiyle bulunan kayma dayanımının gerçek dayanımından daha küçük olduğunu belirtmiştir [1].

Güncel literatür çalışmalarından; kalıcı kayma dayanımını belirlemek için killer üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi ve kesme kutusu deneyi yapıp sonuçlar karşılaştırıldığında içsel sürtünme açılarının konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deneyinden bulunan değerlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir [10-12]. Kesme kutusu ve halka kesme deneyleriyle bulunan killerin kalıcı mukavemet açıları karşılaştırıldığında ise; tekrarlı kesme kutusu deneylerinin halka kesme deneylerinden daha yüksek kalıcı kayma mukavemeti açısı verdiği görülmüştür. [13-14].

Bu çalışmada ince taneli zeminlerin drenajlı kayma dayanım parametrelerini bulmak için optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanmış örnekler üzerinde konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli basınç deneyi, kesme kutusu deneyi ve halka kesme deneyi yapılmıştır. Deneyler literatürde ve standartlarda verilen kesme hızları göz önüne alınarak en az üç farklı gerilme altında yapılmıştır. Deney sonuçlarında bulunan kayma dayanımı parametrelerinin kullanılan deney yöntemine göre değişimi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Afyon ve İznik bölgesinden alınan ince taneli zemin örnekleri üzerinde konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli basınç deneyi, halka kesme deneyi ve kesme kutusu deneyi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zemin örneklerinin geoteknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

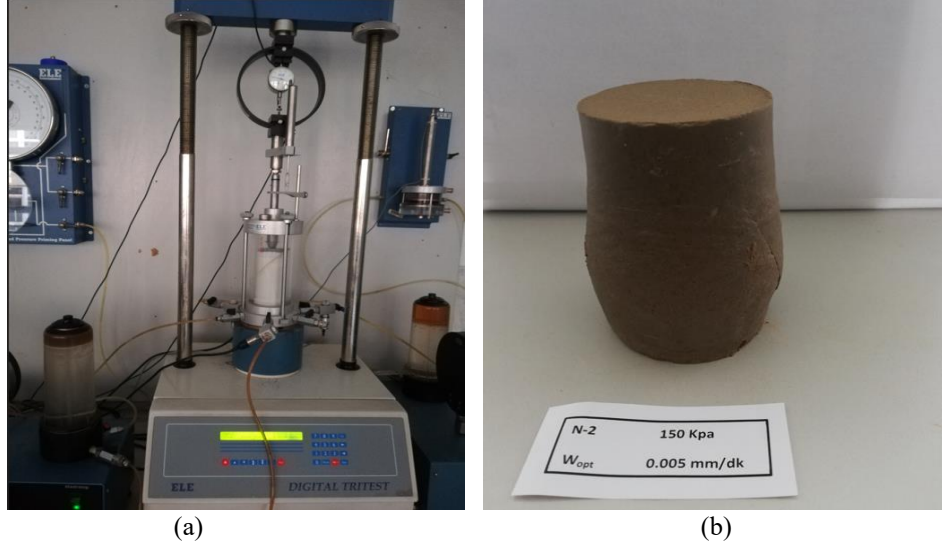
Üç eksenli deneyi arazideki gerilme ve drenaj şartlarının laboratuvarında modellenbildiği en uygun deneydir. Deney sırasıyla; doyumluk, konsolidasyon ve kesme aşamalarından oluşmaktadır. Bu çalışmada ELE marka üç eksenli deney sistemi kullanılmıştır. Deney 100-150-200 kPa olmak üzere üç farklı çevre basıncı (σ_3) altında yapılmıştır. Zemin numunelerinin doyumluğunu sağlamak için karbondioksit (CO_2) uygulaması yapılmıştır. İlk olarak 10 kPa çevre basıncı verilerek CO_2 'nin membran ve numune arasından geçip numune içerisindeki boşluklara girmeden çıkması önlenmiştir. Karbondioksit uygulanmasını takiben, 30 kPa hücre basıncı ve buna karşılık 25 kPa ters basınç uygulanarak numunenin doyumluğa ulaştırılmasına devam edilmiştir. Çevre basıncı 60 kPa ve 90 kPa olarak kademeli artırılmıştır. Her kademede uygulanan hücre basıncından 5 kPa daha az ters basınç uygulanmıştır.

Hücre basıncı verildikçe numunedeki boşluk suyu basıncı (u) artar. Bu artış boyutsuz bir parametre olan B değeri ile tanımlanmıştır [15]. Boşluk suyu basıncındaki değişimin hücre basıncındaki değişime oranı olan B değeri 1 olduğunda doyumluk zemin örneğinin doyum olduğu kabul edilmektedir. [16].

Doyumluk sağlandıktan sonra konsolidasyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada çevre basıncı artırılarak istenilen efektif gerilmeye ulaşılmış ve bu gerilme değeri altında numunenin konsolide olması sağlanmıştır. Konsolidasyon sona erdiğinde eksenel yüklem aşamasına diğer bir ifadeyle kesme aşamasına geçilmiştir. Drenaj koşulları sağlanarak 0.005 mm/dk hızla yaklaşık %20 deformasyon olana kadar eksenel yüklemeye devam edilmiştir. Kesme hızının oldukça düşük olması ilave boşluk suyu basıncı oluşmasını engellemiştir. Bu yüzden konsolidasyonlu-drenajlı üç eksenli deney sonunda bulunan kayma dayanımı parametreleri efektif esastadır. Aynı işlemler 150 kPa ve 200 kPa çevre basınçları için iki numuneye de uygulanıp Mohr-Coloumb hipotezine göre numunenin kayma dayanım parametreleri bulunmuştur. Deney aşaması ve deney sonucuna ait görsel Şekil 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin geoteknik özellikleri

Numune Adı	Zemin Grup Sembolü	Maksimum kuru yoğunluk $\rho_{dmax}(Mg/m^3)$	Optimum Su Muhtevası $W_{opt}(\%)$	Likit Limit $W_L\%$	Plastik Limit $W_P\%$	Plastisite İndisi $I_P\%$	Özgül Gravite
Afyon-3	CL	1.537	21	46	24	22	2.65
Kunduzlar	ML	1.540	21.5	49	28	21	2.69
Kırka-Boraks	MH	1.505	25.0	60	33	27	2.71
İznik	CL	1.532	22.6	32	20	12	2.76



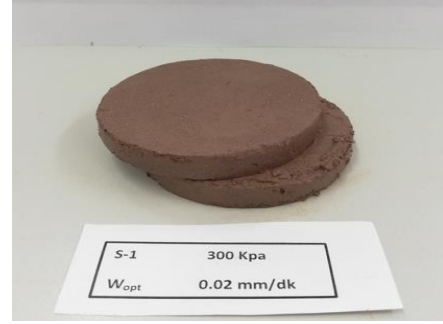
Şekil 1. (a) Üç eksenli deney aşaması ve (b) deney sonu numune görünümü

Kesme kutusu deneyi kayma dayanımı parametrelerini bulmak için yaygın olarak kullanılan en eski deneylerden biri olup, numuneyi kesme etkisine maruz bırakarak kayma direncini belirleme esasına dayanır. Çalışma kapsamında yapılan deneylerde; kesme kutusu içerisine numune yerleştirilip numuneyi doymun halde getirmek ve tutmak için kutu içerisinin su ile doldurulmasıyla başlanmıştır. Yükleme başlığının yerleştirilip, deformasyon saatinin sıfırlanmasının ardından numune; arazide aldığı gerilmeleri temsil eden sabit düşey yükler altında konsolidasyona bırakılmıştır. Çalışma 100-200-300 kPa olmak üzere üç farklı düşey gerilmeyle yapılmıştır. İlk numuneye 100 kPa gerilme uygulanıp; bu yüke eşdeğer olacak şekilde yükleme koluna 3 kg ağırlık yerleştirilmiştir. Konsolidasyon tamamlandıktan sonra kesme aşamasına geçilmiştir. Dairesel kesitli iki parçadan oluşan rijit kesme kutusunun üst parçası sabit kalırken alt parçasının yatayda sabit bir hızla hareket ettirilmesiyle kayma düzlemi oluşturulur. Bu aşamada yatay ve düşey hareketler ile kesme kuvveti ölçümü yapılır. Kesme kutusu deneyinde zeminin arazideki drenaj şartları kesme hızına bağlı olarak simüle edilir. Bu çalışmada killerin ve siltlerin drenajlı kayma dayanımı parametrelerinin bulunması amaçlandığından; kesme hızı yavaş seçilmiştir. 0.02 mm/dk hızla kesme kuvveti uygulanmış ve 13 mm yer değiştirme olana kadar deneye devam edilmiştir.

Aynı işlemler 200 kPa düşey gerilmeye karşılık yük koluna 6 kg yük; 300 kPa düşey gerilmeye karşılık 9 kg yük koyularak tekrar edilmiştir. 3 farklı gerilme altında zeminin normal gerilme-kayma gerilmesi grafiği elde edilmiş ve zeminin kayma dayanımı parametreleri bulunmuştur. Yapılan deneyler sonunda kesme haznesinden çıkarılmış bir numunenin kesme yüzeyi Şekil 2’de gösterilmiştir.

Halka kesme deneyi ise rotasyonel kaymayı modelleyerek kayma direnci parametrelerinin bulunmasını sağlayan bir deneydir. Deney aletinin üst kısmının sabit tutulup alt kısmının sabit normal gerilme altında belirli bir hızda döndürülmesiyle kayma hareketi oluşturulur. Çalışma kapsamında yapılan halka kesme deneyine; numunenin halka hücresine yerleştirilip hücre içerisine su doldurularak ilk

numune için 100 kPa düşey gerilme altında konsolidasyona bırakılmasıyla başlanmıştır. 100 kPa gerilme için yükleme koluna 4 kg ağırlık koyulmuştur. Konsolidasyon bittikten sonra 0.027 der/dk hızla dairesel deplasmana zorlanarak kesilme aşamasına geçilmiştir. Yaklaşık 50 mm. kayma yer değiştirmesi olana kadar devam edilmiştir. Aynı işlemler 200 kPa gerilme için yükleme koluna 8 kg, 300 kPa için 12 kg ağırlık koyularak tekrarlanmıştır. Üç farklı normal gerilme altında gerilme-kayma gerilmesi grafiği elde edilerek kayma dayanımı parametreleri bulunmuştur. Deney sonunda kaymaya zorlanan numune Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 2. Halka kesme deneyinde kaymaya zorlanan numune



Şekil 3. Halka kesme deneyinde kaymaya zorlanan numune

3 Bulgular ve tartışma

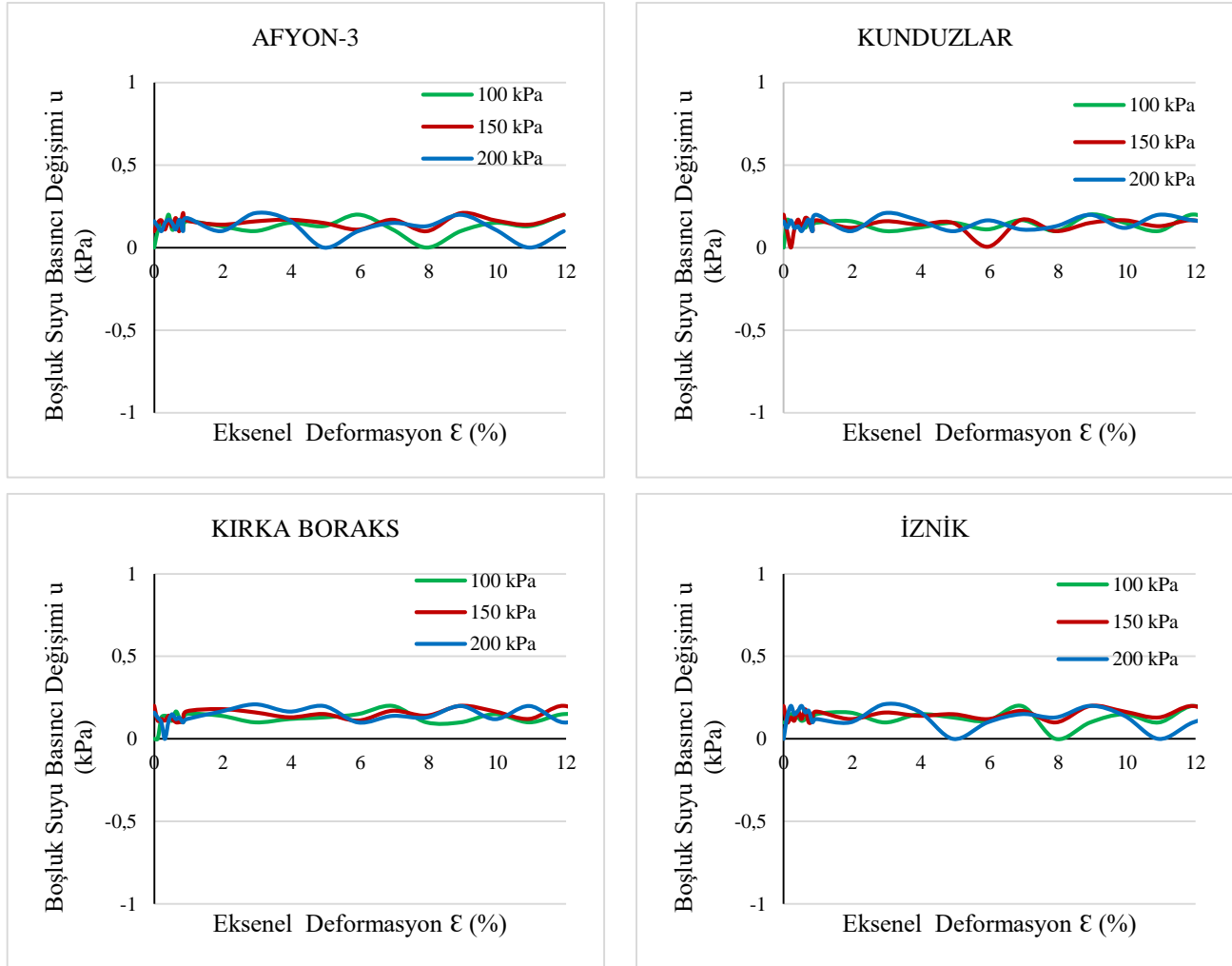
Yapılan drenajlı kayma dayanımı deneyleri sonucunda; elde edilen dayanımların deney yöntemine göre değişimi incelenmiştir.

Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney süresi boyunca oluşan boşluk suyu basınç değişimleri Şekil 4'te verilmiştir. Boşluk suyu basınçlarının sıfıra yakın olması; örneklerde drenajlı koşulların sorunsuz modellenebildiğini kanıtlar niteliktedir.

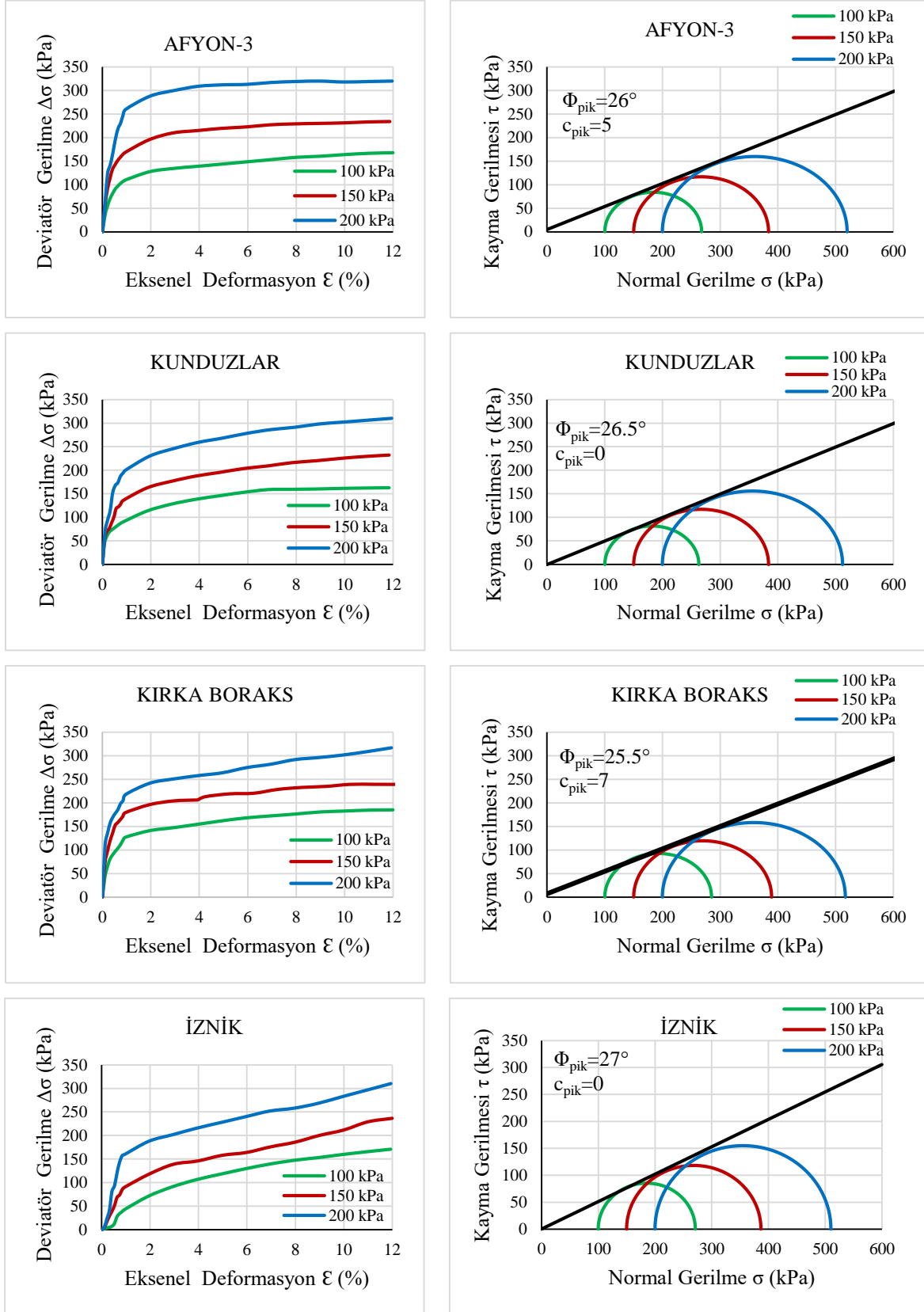
Numunelerde artan eksenel deformasyon ile deviatör gerilmenin artış gösterip belirli bir pik değere ulaştıktan sonra genelde sabitlendiği görülmektedir. Her bir numune için göçme anındaki gerilmeleri temsil eden Mohr daireleri çizilip pik içsel sürtünme açısı ve pik kohezyon değerleri belirlenmiştir. Deney sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.

Kesme kutusu ve halka kesme deneyleri sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-kayma yer değiştirmesi grafikleri incelendiğinde kesme kutusunda artan kayma yer

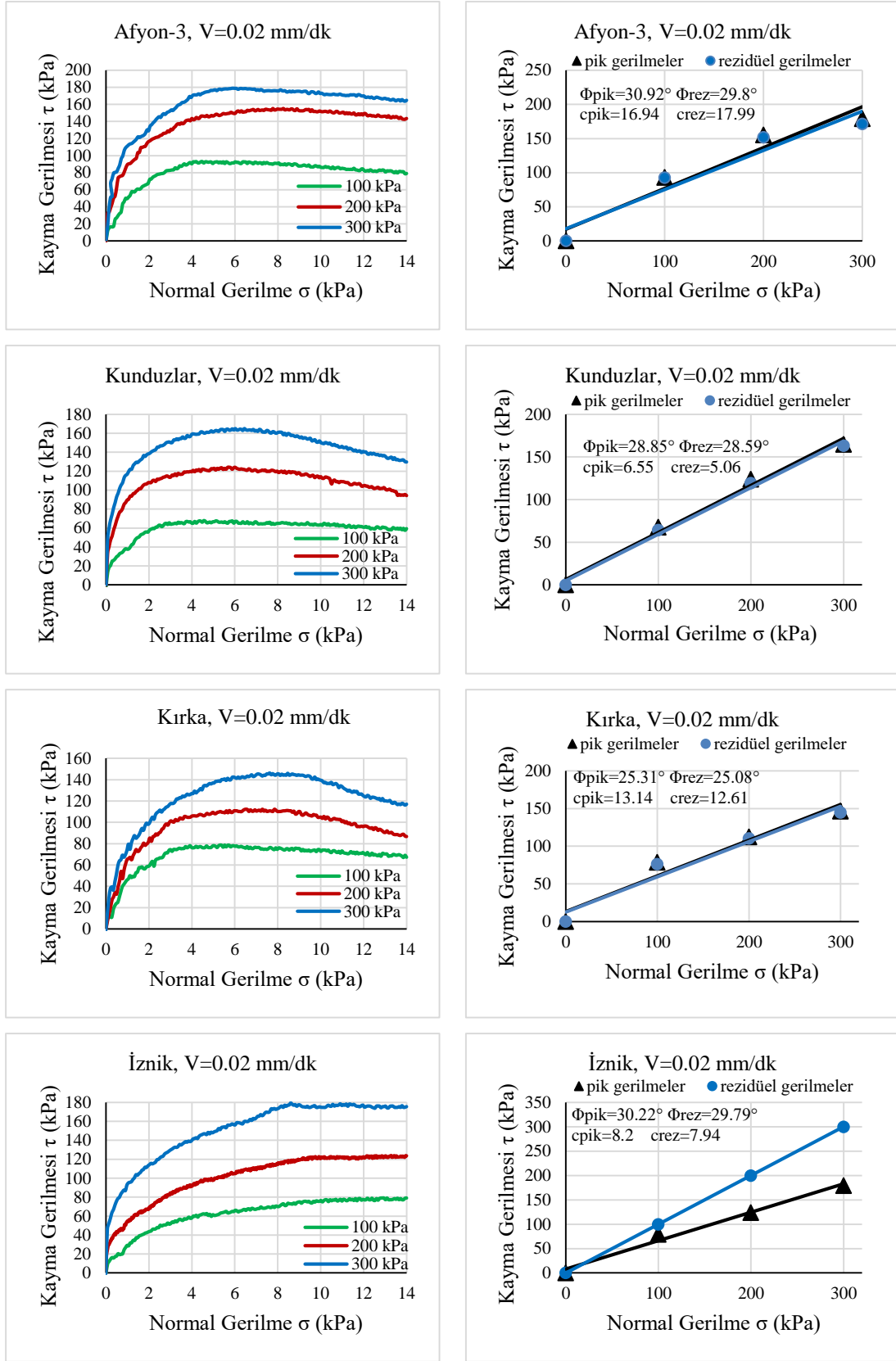
değiştirmesiyle kayma gerilmesinin arttığı, pik kayma gerilmesine ulaştıktan sonra azalmaya başladığı görülürken, halka kesme deneyinde artan kayma yer değiştirmesiyle kayma gerilmesinin arttığı, pik kayma gerilmesine ulaştıktan sonra azalarak sabitlendiği görülmüştür. Bu durumun halka kesme deneyinin deformasyon sınırının daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki deneyde; uygulanan 100, 200, 300 kPa normal gerilmelere karşılık gelen pik ve rezidüel kayma gerilmeleri belirlenmiştir. Normal gerilme-kayma gerilmesi grafiği oluşturularak belirlenen gerilmeler arasından geçirilen yaklaşık bir doğru ile kırılma zarfı oluşturulmuştur. Normal gerilme arttıkça pik ve kalıcı kayma mukavemeti değerlerinin arttığı, rezidüel kayma dayanımı parametrelerinin pik kayma dayanımı parametrelerine göre daha düşük olduğu görülmüştür. Kesme kutusu deneyine ait deney sonuçları Şekil 6'da, halka kesme deneyine ait deney sonuçları ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

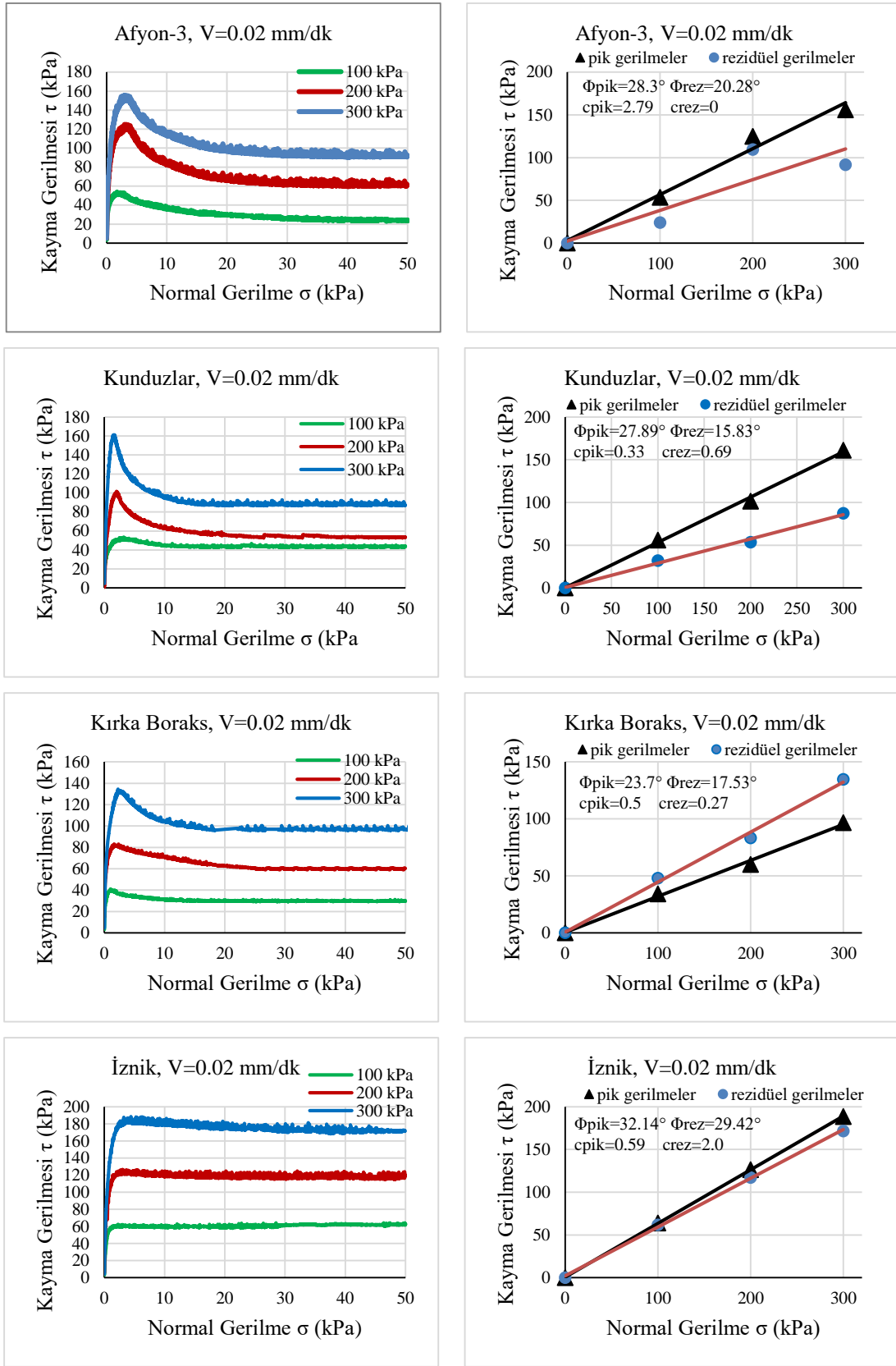


Şekil 4. Numunelerin üç eksenli deney boyunca oluşan boşluk suyu basınçları



Şekil 5. Üç eksenli deney sonuçları





Şekil 7. Halka kesme deney sonuçları

Tablo 2. Numunelerin deney yöntemlerine göre bulunan pik kayma dayanımı parametreleri

Numune Adı	CD Deneyi		Kesme Kutusu Deneyi		Halka Kesme Deneyi	
	ϕ (°)	c (Kpa)	ϕ (°)	c (Kpa)	ϕ (°)	c (Kpa)
Afyon-3	26.00	5.00	30.92	16.94	28.30	2.79
Kunduzlar	26.50	0.00	28.85	6.55	27.89	0.33
Kırka Boraks	25.50	7.00	25.31	13.4	23.70	0.50
İznik	27.00	0.00	30.22	8.20	32.14	0.59

Tablo 3. Numunelerin deney yöntemlerine göre kalıcı kayma dayanımı parametreleri

Numune Adı	Kesme Kutusu Deneyi		Halka Kesme Deneyi	
	ϕ_r (°)	c_r (kPa)	ϕ_r (°)	c_r (kPa)
Afyon-3	29.80	17.99	20.28	0.00
Kunduzlar	28.59	5.06	15.83	0.69
Kırka Boraks	25.08	12.61	17.53	0.27
İznik	29.79	7.94	29.42	2.00

Yapılan deneyler sonunda bulunan pik içsel sürtünme açıları incelendiğinde İznik numunesi hariç; kesme kutusu deneyinden bulunan değerler halka kesme deneyinden bulunan değerlerden 1-2° daha fazladır. Genel olarak konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneyden en düşük içsel sürtünme açıları bulunmuştur. Literatür araştırmalarına göre farklılık gösteren bu durumun; deneyde kullanılan kesme hızının diğer deney yöntemlerinde kullanılan kesme hızlarından farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kesme kutusu ve halka kesme deneyinden elde edilen kalıcı kayma dayanımı parametreleri incelendiğinde bütün numunelerde rezidüel dayanım parametrelerinin pik dayanım parametrelerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Deneylerde bulunan kohezyon değerleri incelendiğinde; en yüksek değerlerin kesme kutusu deneyinden geldiği görülmüştür. Laboratuvar deneylerinde kohezyon değerini sıfır elde etmek pratikte pek mümkün olmamaktadır. Grafiklerden bulunan pik ve kalıcı kayma dayanımı parametreleri düzenlenip **Tablo 2** ve **Tablo 3**'te sunulmuştur.

4 Sonuçlar

İnce taneli zeminler üzerinde yapılan drenajlı laboratuvar deneylerinden; konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneyi, kesme kutusu deneyi ve halka kesme deney sonuçlarından elde edilen bulgular aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Kesme kutusu deneyinden bulunan içsel sürtünme açısı değerlerinin, halka kesme deneyinden bulunan içsel sürtünme açısı değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Halka kesme ve kesme kutusu deneylerinden elde edilen kalıcı kayma dayanımı parametreleri, pik

kayma dayanımı parametrelerinden daha düşük bulunmuştur.

- En düşük içsel sürtünme açıları konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deneyden elde edilmiştir. Deneyde kullanılan kesme hızının diğer iki deney yönteminde kullanılan kesme hızlarından dört kat daha yavaş olması sebebiyle kesme işleminin düşük seviyelerde sonlandırılmasının bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir.
- En yüksek kohezyon değerleri kesme kutusu deneyinden bulunmuştur. Üç eksenli ve halka kesme deneyinden sıfıra yakın kohezyon değerleri elde edilmiştir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik Oranı (iThenticate): %15

Kaynakça

- [1] R. D. Holtz, W. D. Kovacs, An Introduction Geotechnical Engineering, Ankara, 2010.
- [2] M. Hatipoğlu, Kalıcı kayma mukavemetinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2012.
- [3] M. İspiroğlu, İnce taneli zeminlerde drenajlı kayma direnci parametrelerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [4] C. EURFUR, Laboratory and field evaluations of undrained shear strength of bonneville clay. Doktora Tezi, Utah State University, Amerika, 2004.
- [5] İ. Özkaynak, Sıkıştırılmış ara zeminlerin drenajlı ve drenajsız kayma dayanımı parametrelerinin

- ilişkilendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2017.
- [6] T. C. Kenny, Geotechnical properties of glacial lake clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(3), 67-79, 1959.
- [7] L. Bjerrum, N.E. Simons, Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, *Proceedings of the ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils*, 711-726, 1960.
- [8] U. S. Navy, Soil mechanics, foundations and earth structures, *NAVFAC Design Manual DM-7*, Washington, 1971.
- [9] R. S. Ladd, Specimen preparation and cyclic stability of sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 103(1), 535-547, 1977.
- [10] A. Bayın, Konsolidasyonlu drenajlı üç eksenli deney yöntemiyle kalıcı kayma direncinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2011.
- [11] Y. Satı, Sıkıştırılmış ince taneli zeminlerin kayma mukavemetinin drenajlı deneylerle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [12] H. Bilici, Aşırı konsolide killerin dayanım özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [13] S. Koltuk, Zeminlerin kalıcı kayma mukavemetinin halka kesme deneyi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2005.
- [14] E. Yılmaz, Zeminlerin endeks özelliklerinin kalıcı kayma mukavemetine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [15] A.W. Skempton, The pore pressure coefficient A and B, *Geotechnique*, 4(4), 143-147, 2020 <https://doi.org/10.1680/geot.1954.4.4.143>.
- [16] M. B. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, İngiltere, 2010.





Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ile uçucu kül ve cüruf esaslı tasarlanmış geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri

Mechanical and microstructural properties of engineered cementitious composite with fly ash and slag-based engineered geopolymer composites

Hatice Öznur Öz¹, Muhammet Güneş^{2,*}

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Bu çalışmada, literatürde M45 kodu ile bilinen standart tasarlanmış çimento esaslı kompozite (ECC) benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine sahip bir uçucu kül+yüksek fırın cürufu (UK+YFC) esaslı tasarlanmış geopolimer kompozit (EGC) karışımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ECC'nin yanı sıra farklı oranlarda UK ve YFC içeren iki farklı EGC karışımı geliştirilmiştir. Üretilen bu üç karışımın taze ve reolojik özelliklerinin yanı sıra basınç dayanımı, elastisite modülü, hava kurusu birim hacim ağırlığı, yapısal verimliliği, ultrasonik titreşim hızı (UTH), kırılma tokluğu ve eğilme performansı 7. ve 28. günlerde belirlenmiştir. Sonuçta, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına ve süneklığe sahip bir EGC karışımı elde edilmiştir. Ayrıca, artan YFC içeriğinin mekanik dayanımı ve tokluğu artırdığı ancak, sünekliliği azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumun nedenleri XRD, TGA/DTA ve FTIR analizleri ile mikroyapısal olarak araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: ECC, EGC, Uçucu kül, Cüruf, Mekanik ve mikroyapısal özellikler

1 Giriş

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (Engineered Cementitious Composite (ECC)), az miktarda süreksiz liflerle (tipik olarak hacimce \leq %2) tasarlanmış yüksek performanslı özel bir harç malzemesidir [1]. 1990'larda geliştirilen ECC, yol, bina, tünel, köprü ve diğer uygulamaların yapımında ve bakımında başarıyla kullanılmaktadır [2]. Şekil değiştirme sertleşmesi özelliğine sahip olan ECC, geleneksel beton ile karşılaştırıldığında %6'ya varan bir çekme şekil değiştirme kapasitesi yanı sıra yaklaşık olarak 600 kat daha yüksek süneklilik sergilemektedir [3, 4]. ECC'nin dikkat çeken özelliği geliştirilmiş süneklilik, tokluk ve kırılma enerjisine yol açan çoklu ince çatlakların (mikro çatlaklar) eşlik ettiği, özellikle çekme ve eğilme altında şekil değiştirme sertleştirme davranışdır [5]. Bu üstün özellikleri elde etmek için, ECC'de kullanılan PVA lifinin varlığı ve içeriğinin yanı sıra kompoziti oluşturan hammaddelerin (çimento, uçucu kül, silis kumu ve silis dumanı) kullanım oranı ve içeriği son derece önemlidir [6]. Ayrıca, ECC'nin matris kırılma

Abstract

In this study, it was aimed to develop a fly ash+blast furnace slag (FA+BFS)-based engineered geopolymer composite (EGC) mixture having similar bearing strength and deformation capacity to the standard engineered cementitious composite (ECC) known with the M45 code in the literature. For this purpose, in addition to ECC, two different EGC mixtures incorporating different ratios of FA and BFS were produced. The compressive strength, modulus of elasticity, air dry unit volume weight, structural efficiency, ultrasonic pulse velocity (UPV), fracture toughness and flexural performance were determined on the 7th and 28th day as well as the fresh and rheological properties of these three mixtures. Finally, an EGC mixture having much higher compressive strength and ductility was obtained than that of ECC. Moreover, it was determined that increasing amount of BFS improved mechanical strength and toughness, but decreased ductility. The reasons of these situations were investigated microstructurally by XRD, TGA/DTA and FTIR analyzes.

Keywords: ECC, EGC, Fly ash, Slag, Mechanical and microstructural properties

tokluğunu azaltmak için iri agrega kullanılmamaktadır [7]. Bu nedenle, tipik bir ECC karışımı genellikle geleneksel beton karışımından 2-3 kat daha yüksek çimento içeriğine ihtiyaç duymaktadır [8]. Portland çimentosunun üretimi yoğun enerji ihtiyacı gerektiren ve ayrıca, yüksek CO₂ emisyonuna neden olan bir süreç olduğundan, ECC üretmek (klinker olmayan çimento, örneğin; geopolimer kullanımı) dikkat çekici sürdürülebilir bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmalar, uçucu kül (UK) esaslı geopolimer üretiminin Portland çimentosu üretimine kıyasla yaklaşık %60 daha az enerji tükettiğini ve yaklaşık %80 daha az CO₂ emisyonu ürettiğini göstermiştir [9, 10].

Özel bir yüksek performanslı lif takviyeli geopolimer kompozit türü olan, Tasarlanmış Geopolimer Kompozitler (Engineered Geopolymer Composites (EGCs)), ultra yüksek süneklığe sahip yeni bir çevre dostu yapı malzemesi olarak ortaya çıkmıştır [11, 12]. Şekil değiştirme sertleşmesi sergileyen geopolimer kompozit olarak da adlandırılan EGC'nin [13] tasarım yöntemi, ECC ile aynıdır. Öyle ki; çimento matrisi yerine geopolimer matrisi kullanılmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muhammet-gunes50@hotmail.com (M. Güneş)

Geliş / Received: 08.10.2022 Kabul / Accepted: 14.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1186020

Çimentolu matris ile karşılaştırıldığında, geopolimerin enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu sırasıyla %70 ve %65 oranında azalmaktadır [2, 14]. Ayrıca, uygun karışım tasarımı ve yeterli kür koşulları altında geopolimerlerin, çimento esaslı malzemelere göre daha yüksek mekanik dayanım ve dayanıklılığa sahiptir [15,16]. Son zamanlarda, EGC'nin temel mekanik özellikleri farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Ling vd. [1], uygun karışım tasarımı (bağlayıcının %80'i UK ve %20'si C, aktivatör çözeltisinin (NaOH+Na₂SiO₃) bağlayıcıya (UK+YFC) oranı 0.27 ve %2 PVA lifi (matris hacmine göre)) ve yüksek sıcaklıkta kürleme ile EGC'nin basınç dayanımının 28 günde 102 MPa seviyesine kadar ulaşabileceğini göstermişlerdir. Zahid vd. [17], EGC'nin gerilme davranışları üzerindeki PVA lif geometrisi ve NaOH molaritesinin etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, ince lifler (0,04 mm çap ve 8 mm ve 12 mm uzunluk) içeren 8 M matrislen yapılan numunelerin çatlama sonrası aşamada iyi performans gösterdiğini ve şekil değiştirme sertleşmesi kriterlerini karşıladığını göstermiştir [17]. Nguyen vd. [18], aktivatörlerin geopolimerik matris üzerinde etkilerini araştırmanın yanı sıra, %13.7 maksimum çekme gerilmesi ile ultra sünek EGC'yi geliştirmişlerdir. EGC'nin eğilme ve çekme davranışlarını inceleyen Trindade vd. [19], ECC ile karşılaştırıldığında EGC'nin daha küçük çatlak genişliği ile daha iyi çatlama davranışı gösterdiği sonucuna varmışlardır. Dolayısıyla bu sonuç, EGC'nin yapı mühendisliğinde geniş bir uygulama yelpazesi için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, sıradan lif takviyeli geopolimer kompozitlerle karşılaştırıldığında, EGC, çoklu çatlama modları ile ayırt edici çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermektedir [20]. Farklı karışım tasarımına sahip EGC'nin temel mekanik davranışları, yani tek eksenli çekme [21], basınç [22] ve eğilme davranışları [17] incelenmiştir. EGC'nin yüksek enerji tüketimi özelliklerine sahip benzersiz çekme şekil değiştirme sertleşmesi davranışları sayesinde depreme ve patlamaya dayanıklı yapılarda, uygulamada dikkat çekici sonuçlar olduğu gözlenmiştir [12]. Trindade vd. [23], EGC'nin yarı statik davranışları üzerinde yapmış olduğu deneysel araştırmalarda, EGC'nin dinamik yüke maruz kaldığında mükemmel enerji yajma kapasitesinin yanı sıra çekme sünekliğine sahip olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Son zamanlarda, EGC olarak adlandırılan geopolimer esaslı ECC'yi geliştirmek için, Portland çimentosunun tamamen UK esaslı bir geopolimer ile değiştirildiği fizibilite çalışması yapılmaktadır [24]. UK, alüminosilikat bileşimi, yüksek işlenebilirlik için düşük su talebi ve dünya çapında bulunabilirliği sayesinde geopolimerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir alkali çözeltide, UK, katılma yoluyla kayıp partikülleri/lifleri bağlayan, yapısal olarak düzensiz, yüksek oranda çapraz bağlı alüminosilikat-hidrat (N-A-S-H) jelleri oluşturarak geopolimerizasyona uğramaktadır [25]. EGC'nin geleneksel bir ECC ile benzer mekanik özelliklere sahip olduğunu kanıtlanmıştır [24]. Ayrıca, tek eksenli çekme veya eğilme altında, EGC, çoklu mikro çatlakların eşlik ettiği şekil değiştirme sertleşmesi davranışı sergilemektedir. Bununla birlikte, UK'nin düşük reaktivitesinden dolayı, UK esaslı EGC karışımlarından nispeten düşük dayanımlar elde edilmiştir (28 günde 17.4–

27.6 MPa basınç dayanımı ve 2.9–3.4 MPa çekme dayanımı). Tipik bir ECC'nin (M45 kodu ile bilinen ECC) genellikle çok daha yüksek dayanım performansına sahiptir (28 günde 50-60 MPa basınç dayanımı ve 4-5 MPa çekme dayanımı). Mevcut EGC'nin düşük mukavemeti, inşaat sektöründeki uygulamalarını kısıtlamaktadır.

Son zamanlarda, geleneksel UK esaslı geopolimerlerin özelliklerini iyileştirmek için önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Dikkat çekici yaklaşımlardan biri, UK'nin yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi reaktif tozların kullanılması olmuştur [26]. UK ile karşılaştırıldığında, YFC genel olarak çok daha yüksek reaktiviteye ve daha iyi çimentolama özelliklerine sahiptir. C, esas olarak yüksek CaO içeriğine katkıda bulunarak geopolimer kompozitin erken yaş dayanımını arttırmaktadır [27]. Ayrıca, CaO, UK aktivasyon sürecine katılarak UK esaslı geopolimer jel (N-A-S-H) ile birlikte C-S-H/C-A-S-H jeli üretebilmektedir. Böylece geopolimerin mikro yapısını değiştirerek mekanik özelliklerini daha da iyileştirmektedir [28]. Deb vd. [29], YFC ve aktivatör içeriğinin UK esaslı geopolimer betonun işlenebilirlik ve dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve 180 güne kadar her yaşta YFC içeriğinin artmasıyla UK+YFC esaslı geopolimerin basınç dayanımının arttığını göstermiştir. Nath ve Kumar [28, 30, 31], geopolimerler için UK ile birlikte kullanılan çeşitli YFC türlerini araştırmışlar ve dayanım iyileştirmelerinin esas olarak daha yüksek derecede YFC reaksiyonuna, daha fazla jel fazının oluşumuna ve daha kompakt mikro yapının gelişimine atfedildiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, EGC'nin gelişimi henüz başlangıç safhasında olduğundan, YFC'lerin UK esaslı EGC'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırılan sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır.

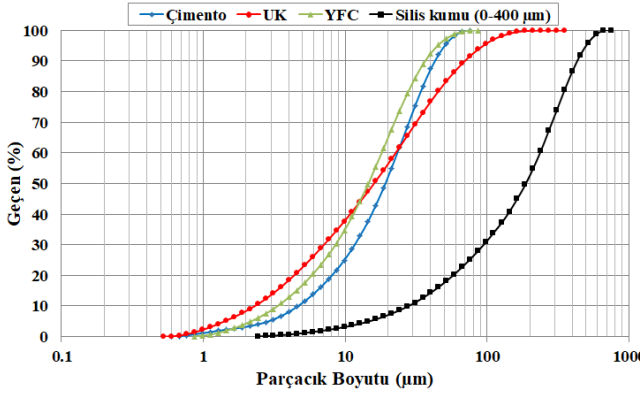
Bu çalışmada, ECC ile benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine ulaşabilecek bir UK+ YFC esaslı EGC karışımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, ECC ile birlikte farklı UK ve YFC içeriklerine sahip EGC karışımları tasarlanmış ve bu karışımların, taze reolojik, mekanik ve mikroyapısal özellikleri belirlenmiştir.

2 Materyal ve metod

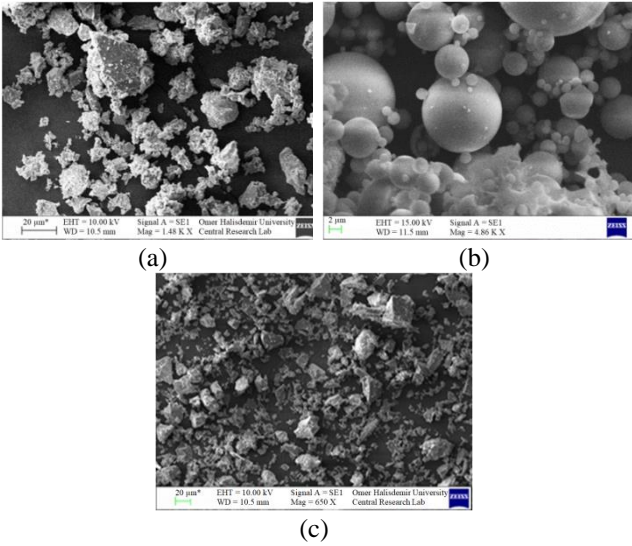
2.1 Malzemeler

ECC üretiminde, TS EN 197-1 [32] standardına uygun ve ASTM Tip I'e uyumlu CEM I 42.5 R tipi Normal Portland çimentosunun yanı sıra UK, su, maksimum tane boyutu 400 µm olan silis kumu, süper akışkanlaştırıcı (SA) ve PVA lifi kullanılmıştır. Kullanılan silis kumunun su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı sırasıyla, %0.3 ve 2.65'tir. Bu agregaya için tane boyutu dağılım eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir. ECC karışımlarının işlenebilirliğini artırmak için, BASF Yapı Kimyasalları tarafından üretilen ve eski adı glenium 51 olan masterglenium 51 isimli bir polikarboksilik eter tipi SA kullanılmıştır. SA'nın özgül ağırlığı ve katı içeriği sırasıyla, 1.1 ve %40'tır. UK+YFC esaslı EGC tasarımlarında bağlayıcı malzemeler olarak UK ve YFC, alkali aktivatörler olarak NaOH ve Na₂SiO₃, ekstra su ve PVA lifi kullanılmıştır. ECC ve/veya EGC içerisinde kullanılan çimento, UK ve C'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo

1’de, tane boyut dağılımları Şekil 1’de ve SEM görüntüleri ise Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çimento, UK, YFC ve silis kumunun tane boyut dağılımları



Şekil 2. (a) Çimento, (b) UK ve (c) YFC'nin SEM fotoğrafları

Daha önceki çalışmalar, geopolimerlerde hammadde olarak UK kullanıldığında NaOH molarite konsantrasyonunun 8 ila 16 M aralığında olması gerektiğini belirtmiştir [33, 34]. Pavithra vd. [35], farklı NaOH molaritelerinin (10M, 12M, 14M, 16M ve 18M) UK esaslı geopolimer harçlar üzerindeki etkilerini incelemiş ve 16M'ye kadar NaOH molaritesinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı ve daha sonra bulunan dayanımın NaOH molaritesinin daha da artmasıyla azaldığını tespit etmiştir. Sentez parametrelerinin UK esaslı geopolimer betonun basınç dayanımına etkisi üzerine yapılan bir çalışmada [36], yüksek basınç dayanımlı beton üretmek için en iyi NaOH konsantrasyonunun 12 M olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının tasarımında Na₂SiO₃ ve 13 M NaOH alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. %98 saflıktaki NaOH peletleri, 13 M konsantrasyonlu NaOH çözeltisi hazırlamak için bir imalatçı tarafından saf suda damıtılmış ve NaOH çözeltisi özgül ağırlığı 1.50 olan sıvı formda tedarik edilmiştir. Özgül ağırlığı 1.399 olan Na₂SiO₃,

yani su camı, bir imalatçıdan sıvı formda alınmıştır. SiO₂/Na₂O mol oranı (Na₂SiO₃'ün modülü) 2.5 olan sıvı Na₂SiO₃ solüsyonu %38.5 katı ve %61.5 sudan (H₂O) üretilmiştir. Na₂SiO₃ alkali aktivatörünün katı kısmı %27.56 SiO₂ ve %10.94 Na₂O oksit içerir. ECC ile UK+YFC esaslı EGC'lerin tasarımlarında kullanılan PVA lifinin mikro-mekanik hesaplamalar sonucunda belirlenen geometrik özellikleri Tablo 2’de listelenmiştir. Tablo 2’de ayrıca PVA lifinin mekanik özellikleri de verilmiştir. PVA lifi, moleküler zincirlerinde hidroksil grubunun mevcudiyetinden dolayı çimento ile güçlü kimyasal bağ kurması nedeniyle, çimento esaslı bir matriste çekip çıkmak yerine kopma eğilimindedir [37]. Aşırı lif kopması, kompozitin şekil değiştirme sertleşmesi kapasitesini sınırlamaktadır. Kompozitin şekil değiştirme sertleşmesi performansını sergileyebilmesi için lif/matris ara yüzey bağ kuvvetini azaltmak gerekir. Bu nedenle, PVA lifinin yüzeyi ağırlıkça %1.2 hidrofobik yağ ile kaplanmaktadır. Malzeme homojenliğini dikkate alarak karışım tasarımında hesaplanan kritik lif içeriğinin üzerinde bir lif içeriği kullanılmaktadır. Hacimce %2 olarak kullanılan bu lif içeriği, ECC'nin mikro-mekanik tasarım teorisi ile belirlenmiştir. Bu lif oranının önceki araştırmalarda [37, 38] ECC özellikleri için optimum değer olduğu kanıtlanmıştır. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarında da PVA lif içeriği hacimce %2 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Çimento, UK ve C'nin, kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	UK	C
CaO	60.15	1.47	38.83
SiO ₂	20.46	61.25	36.82
Al ₂ O ₃	7.78	22.19	13.31
Fe ₂ O ₃	3.09	7.02	0.70
MgO	2.66	1.70	5.65
SO ₃	2.33	0.06	0.50
K ₂ O	0.82	2.34	0.75
Na ₂ O	0.22	0.27	-
TiO ₂	0.30	0.90	-
Fiziksel Özellikler	Çimento	UK	C
Kızdırma Kaybı	2.55	2.6	1.92
Özgül Ağırlık	3.10	2.31	2.89

Tablo 2. PVA lifinin mekanik ve geometrik özellikleri

Nominal Dayanım (MPa)	1620
Görünen Dayanım (MPa)	1092
Çap (µm)	39
Uzunluk (mm)	8
Elastik Modülü (GPa)	42.8
Uzama (%)	6
Özgül Ağırlık	1.3

2.2 Karışım oranları ve üretim prosedürü

İlk olarak, ECC karışımı üretilmiştir. ECC'nin karışım oranları **Tablo 3**'te verilmiştir. Daha sonra ECC ile benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine ulaşabilecek bir EGC karışımı tasarlayabilmek için **Tablo 4**'te sunulan UK+YFC esaslı EGC'ler tasarlanmıştır. Üretilen EGC30 ve EGC40 karışımlarının sırasıyla, %70 ve %60 oranlarında F sınıfı UK içerdiği **Tablo 4**'te verilmiştir. Son derece düşük CaO içeriğine sahip olan F sınıfı UK içeren geopolimerlerin ortam sıcaklığında kürlenme ile düşük dayanım gelişimi sağladığı ve dayanım kazanması için etüv kürüne (40 °C ile 85 °C arasında) ihtiyaç duyduğu bilinmektedir [39-41]. Bununla birlikte, ön çalışmalarda EGC30 ve EGC40 karışımlarının etüv küründe YFC'nin yüksek CaO içeriğinden dolayı çatılma problemlerinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, EGC30 ve EGC40 karışımları deney gününe kadar ortam küründe bekletildiğinde ise yüksek UK ve düşük YFC içeriğinden dolayı dayanımları düşük kalmıştır. Bu nedenle, karşılaşılan sorunları çözmek için literatür çalışmaları incelenmiştir. Coppala vd. [42], eşit su/ön madde oranında sodyum silikat, potasyum hidroksit ve sodyum karbonat ile aktive edilen farklı YFC/UK oranlarıyla tasarlanan geopolimer harçlar üzerinde ısı ve/veya buharla kürlenmenin etkisini incelemişler ve buharla kürlenme sıcaklıklarının 40 °C veya 60°C olduğu sonucuna varmışlardır. Özellikle, yüksek YFC/UK kullanım oranlarında ortam kürü ile karşılaştırıldığında daha yüksek erken basınç dayanımı gelişimi sağlanmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada, YFC'nin sıcak su içerisinde sağladığı önemli dayanım gelişiminden faydalanılmıştır. Bu nedenle, kalıba döküldükten sonra laboratuvar ortamında 24 saat kür edilen ECC ve UK+YFC esaslı EGC'ler deney gününe kadar sırasıyla, kapalı poşetler içerisinde ve 60 °C sıcaklığındaki su içerisinde bekletilmiştir. UK+YFC esaslı EGC karışımlarında Na₂SiO₃ çözeltisi/NaOH çözeltisi oranı 2.5 olarak kullanılmıştır. Karışımlar arasındaki tek farklılık UK ve YFC içerikleridir. Öyle ki, %30 YFC içeren EGC30 kodlu UK+YFC esaslı EGC karışımındaki YFC içeriği %40'a çıkarılarak ikinci bir UK+YFC esaslı EGC karışımı elde edilmiştir. Bu iki karışıma ait karışım oranları **Tablo 4**'te verilmiştir. EGC30 karışımındaki M6, 0.33, 1720 ve 30C sırasıyla, karışımın ismini, karışımlarda alkali aktivatörler toplamının (Na₂SiO₃+NaOH), UK+YFC'ye oranını ve toplam alkali aktivatör+bağlayıcı (Na₂SiO₃+NaOH+UK+YFC) içeriğini ve bağlayıcıdaki ağırlıkça YFC kullanım yüzdesini göstermektedir.

ECC ve EGC karışımlarının üretilmesi için 20 litre kapasiteli bir harç mikseri kullanılmıştır. İlk olarak, katı bileşenler 100 RPM'de bir dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra, kuru karışıma ECC için su ve SA, EGC'ler için ise su+SA+Na₂SiO₃+NaOH ilave edilmiş ve PVA lifi içermeyen homojen bir ECC/EGC matrisi üretmek amacıyla 150 ve 300 RPM'de ikişer dakika boyunca karıştırılmıştır. Son aşamada, PVA lifi ilave edilmiş ve karışım 150 ve 300 RPM'de sırasıyla, iki ve dört dakika karıştırılmıştır. Karışımlardan her test günü ve yükleme koşulu için 3'er adet numune alınmıştır. 50 mm'lik küp numuneler; basınç dayanımı ve elastisite modülü testleri için, 360x50x75 mm prizma numuneler; kırılma tokluğu ve dört noktalı eğilme testleri için kullanılmıştır.

2.3 Test Prosedürleri

2.3.1 Taze ve reolojik özellikler

ECC'nin mikro-mekanik tabanlı tasarım hesaplamaları, liflerin matrise homojen bir şekilde dağıldığı kabul edilerek yapılmaktadır. Üretilen karışımın özellikleri mikro-mekanik tabanlı tasarım hesaplamalarından elde edilen bulgulara uygun olsa da lifler matrise homojen olarak dağılamayabilmektedir. Bu nedenle, homojen lif dağılımını etkileyen en önemli parametrelerden birisi ECC/EGC matrisinin (PVA lifi içermeyen ECC/EGC) işlenebilirlik, eşik gerilmesi ve plastik viskozite gibi taze ve reolojik özellikleridir. Bunun yanı sıra, ECC/EGC'nin taze ve reolojik özellikleri malzemenin akışkanlık derecesini ve kalıba yerleştirilebilirliğini etkileyen parametrelerdir.

Bir Bingham sıvı davranışını izleyen ECC ve EGC matrislerinin akışı (reolojik özellikler), reoloji testlerinden ölçülen akma gerilmesi ve plastik viskozite gibi parametrelerle tamamen belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, taze özellik testi, işlenebilirliğin yalnızca bir özelliğini ifade etmektedir. Örneğin, ECC ile ilgili literatür çalışmaları, mini-yayıma akışının akma gerilmesini gösterebileceğini ve mini-v hunisi ile Marsh hunisi akış sürelerinin viskozite hakkında fikir verebileceğini belirtmektedir [43, 44]. Bu nedenle, ECC ve EGC matrislerinin akış davranışlarını belirlemek için daha fazla işlenebilirlik testi gereklidir. Akış özelliklerinin tam tanımını sağlayamayan işlenebilirlik testlerinin hala temel birimlerde sonuç veremediği bilinmektedir. Ancak, saha koşullarında uygulanabilirliği, test ekipmanının nispeten düşük maliyeti ve test prosedürlerinin kolaylığı nedeniyle bazı testler de alternatif reoloji testleri olarak kullanılabilir.

Tablo 3. ECC'nin karışım oranları (1 kg/m³)

Karışım İsmi	UK/C	Çimento	UK	Su	PVA	Silis Kumu	SA
ECC	1.2	564.4	677.7	329.9	26	451.1	5

Tablo 4. Farklı UK ve YFC içerikleriyle tasarlanan UK+YFC esaslı EGC'lerin karışım oranları (1 kg/m³)

Karışım İsmi	NaOH Çözeltisi	Na ₂ SiO ₃ Çözeltisi	UK	YFC	PVA	Ekstra Su
EGC30	122.9	307.1	903.0	387.0	26.0	153.7
EGC40	124.6	311.6	785.2	523.5	26.0	157.1

Bu nedenle hem ECC matrisinin hem de EGC matrislerinin akış özelliklerini tanımlamak için mini-v hunisi ve Marsh hunisi testleri ile mini-yayılma akış testi de uygulanmıştır. Ayrıca, reoloji testinin işlenebilirlik testlerinden bir diğer farkı, reoloji testinin matris stabilitesinin fiziksel olarak incelenmesini sağlayabilmesidir. Reolojik parametrelerin uygulanması için testler sırasında matris sabit kalmalıdır.

2.3.1.1 Mini-yayılma hunisi

Mini-yayılma hunisi ile yayılma çapı hem lifsiz hem de lifli ECC/EGC'ler için belirlenmiştir. Mini-yayılma hunisi kesik koni şeklinde olup, üst çapı, alt çapı ve yüksekliği sırasıyla, 70, 100 ve 60 mm olan metal bir hunidir. Karıştırma işlemi tamamlanan lifsiz veya lifli malzeme herhangi bir sıkıştırma işlemine maruz bırakılmaksızın bu huni içerisine yerleştirilir. Daha sonra huni yukarıya doğru dik bir şekilde düşük hızla kaldırılır ve malzeme yayılmaya başlar. Malzeme akışını tamamladığında, dairesel bir şekil ortaya çıkmaktadır. Bu dairesel şeklin çapı, birbirine dik iki doğrultuda ölçülür ve ölçümlerin ortalaması ile yayılma çapı belirlenir. ECC ve EGC'lerin çökme akışındaki deformasyonlar, harcın akışının durduğu andaki akış çapı olarak tanımlanmıştır [43].

2.3.1.2 Mini-V hunisi

Numunelerin viskozite/akıcılık özelliklerini tespit etmek amacıyla mini-v hunisi deney aparatı kullanılmıştır. Mini-V hunisi taze ECC/EGC matrisi ile doldurulduktan sonra alt taraftaki kapağın açılmasıyla ECC/EGC matrisinin boşalma süresi ölçülmüştür [44].

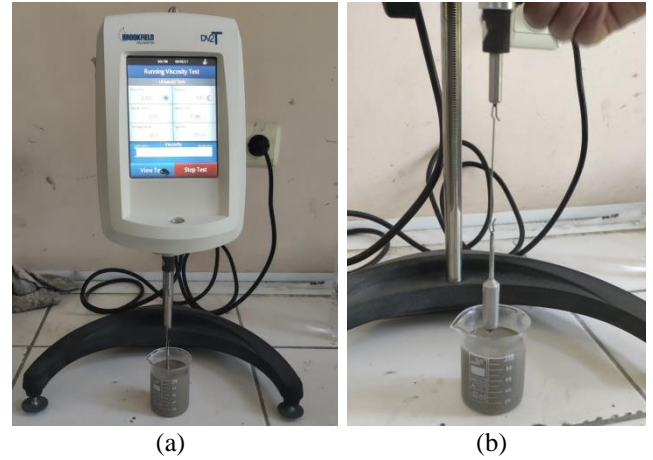
2.3.1.3 Marsh hunisi

Marsh hunisi akış süresi, belirli bir malzeme hacmi için gerekli akış süresinin ölçülmesiyle belirlenmektedir [43]. Bu çalışmada, 4.56 mm iç delik çapına ve 1.5 L hacme sahip demir huni kullanılmıştır. Alt çıkış deliği kapatılan huninin içine ECC/EGC matrisi konulmuş ve deliğin açılmasıyla beraber kronometrenin çalıştırılmasıyla malzemenin akması sağlanmıştır. Huninin altına konulan dereceli bir silindirik kap vasıtasıyla 100 ml hacmindeki ECC/EGC'nin kaç saniyede aktığı belirlenmiştir. Marsh hunisinde, 100 ml suyun akma süresi 23 ± 2 °C sıcaklıkta 1.76 saniyedir.

2.3.1.4 Reolojik özellikler

Harç, beton ve geopolimer genellikle yüksek gerilmelerde viskoz akışkan olarak akan ancak düşük gerilmelerde katı bir cisim gibi davranan visko-plastik malzemeler olarak bilinmektedir [45]. Bu akış, Bingham'ın reolojik modelini ifade etmektedir. Bingham plastik, belirli bir akma gerilmesine ulaşılan kadar herhangi bir kesme hızı göstermez. Akma gerilmesi eşiği aşıldığında, taze harç, beton veya geopolimer akmaya başlar ve plastik viskozite ile tarif edildiği gibi gerinim hızının artmasıyla paralel olarak kayma gerilmesi yükselmektedir [46]. Bu nedenle, taze ECC ve EGC matrislerinin reolojik özelliklerini Bingham modeliyle tam anlamıyla tanımlamak için akma gerilmesi ve plastik viskozite esastır [47].

ECC/EGC matrislerinin reolojik parametreleri (eşik gerilmesi ve plastik viskozite) Şekil 3(a)'da verilen rotasyonel bir viskozimetre kullanılarak ölçülmüştür. Deney esnasında kullanılan başlığa ait fotoğraf ise Şekil 3(b)'de verilmiştir. Numune, ölçme kabına konulduktan sonra, viskozimetrenin ölçüm yapan ucu numune içine daldırılmıştır. Daha sonra hız 0.5 rpm (devir/dakika) değerinden 200 RPM değerine yavaş yavaş çıkarılmıştır. Daha sonra hız, 200 RPM'den (68 s^{-1}), 0.5 RPM (0.17 s^{-1}) değerine basamaklar halinde azaltılmış ve her basamakta ölçümler alınmıştır. Bu basamaklarda dikkate alınan hızlar: 68.0, 34.0, 17.0, 6.80, 3.40, 1.70, 0.85, 0.34 ve 0.17 s^{-1} olarak belirlenmiştir. Her basamakta numune 20 saniye süreyle aynı kayma hızına tabi tutulup, bu sürenin sonunda kayma gerilmesi (Pa) kaydedilmiştir. Bu şekilde elde edilen kayma hızı-kayma gerilmesi veri çiftleri bir grafikte noktalar halinde çizilmiş ve bu noktalara doğrusal eğilim çizgisi oturtulmuştur. Bilindiği gibi bu doğrusal eğilim çizgisi Bingham modelini oluşturmaktadır. Bu çizginin eğimi plastik viskoziteyi, çizginin kayma eksenini kestiği nokta ise eşik gerilmesini vermektedir. Bingham davranışına ait kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi Şekil 4'te verilmiştir. Her bir ECC ve EGC için Bingham davranışı dikkate alınarak kayma gerilmesi-kayma hızı ve görünen viskozite-kayma hızı eğrileri çizilmiştir.

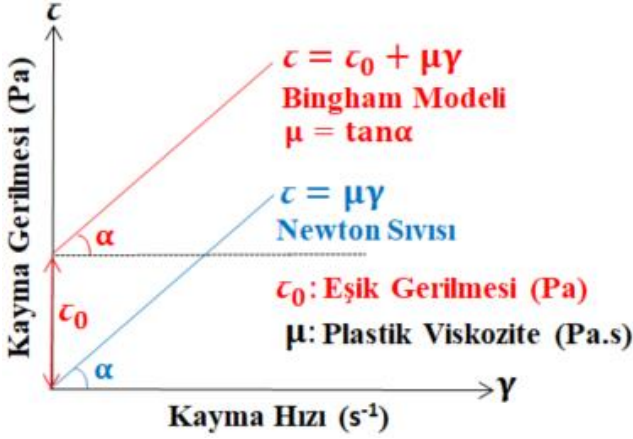


Şekil 3. (a) Viskozimetre ile reolojik parametrelerin belirlenmesi ve (b) deneyde kullanılan başlık

2.4.2 Mekanik özellikler

2.4.2.1 Basınç dayanımı

ASTM C109 [48] standardına uygun olarak gerçekleştirilen basınç dayanımı testi 50 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde 0.9 kN/s yükleme hızı ile yapılmıştır. ECC/EGC matrisi ve PVA lifli içeren ECC/EGC karışımlarından üçer adet küp numune alınmıştır. Karışımların basınç dayanımları üç numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Bingham davranışına ait kayma gerilmesi-kayma hızı ilişkisi

2.4.2.2 Elastisite modülü

ECC ve EGC'lerin elastisite modülü, ASTM C 469'a [49] göre test edilebilmektedir. Elastisite modülünün genellikle incelik oranı 2.0 olan silindirler ve prizmalar için ölçüldüğü bilinmektedir. Bununla birlikte, literatür çalışmaları tarafından desteklendiği gibi beton küplerin birim şekil değiştirme deformasyonu, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi de araştırılmaktadır [44, 50-55]. Bu nedenle, elastisite modülünün belirlenmesi için bir boyutu 50 mm küp numuneler üretilmiştir. Basınç yüklemesine maruz bırakılan kübik numuneler, basınç dayanımının %40'ına kadar dört kez yüklenip boşaltılmış ve video ekstansometre ile numunelerdeki deformasyonlar belirlenmiştir.

2.4.2.3 Hava kuruşu birim hacim ağırlık, yapısal verimlilik ve ultrasonik titreşim hızı

Lifsiz ve lifli ECC karışımı ile lifsiz ve lifli UK esaslı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kırılma tokluğu ve eğilme performansı deneylerinde kullanılan 360x75x50 mm boyutlarındaki kiriş numunelerinin deney gününde ağırlık tartımları yapılmıştır. Kiriş ağırlığının kalıp hacmine oranı ile hava kuruşu birim hacim ağırlık ve basınç dayanımının hava kuruşu birim hacim ağırlığa oranı ile yapısal verimlilik değeri belirlenmiştir.

Ultrasonik dalğanın numunenin bir tarafından diğer tarafına ilk varış süresinin ölçülmesi esasına dayanan ultrasonik titreşim hızı (UTH) testi ASTM C597'ye [56] göre uygulanmıştır. UTH testi, çimento esaslı kompozitlerin veya geopolimer kompozitlerin göreceli kalitelerinin ve boşluklar ve çatlaklar gibi bazı kusurlarının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. UTH testi, 360x75x50 mm boyutlarındaki, 3 prizmatik lifsiz ve lifli ECC ve EGC numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu test deney gününde kirişlerin 360 mm'lik uzunluğuna uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyinde de kullanılan UTH testi, 400x100x100 mm boyutlarındaki prizmatik

numunelere de uygulanmıştır. Bir numuneden 2 adet olmak üzere toplamda alınan 6 adet okumanın ortalaması deney sonucu olarak tespit edilmiştir. Elde edilen UTH verilerine göre ECC ve EGC'lerin kalitesinin değerlendirilebilmesi için Tablo 5'te verilen Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı [57] kriterleri kullanılmıştır.

Tablo 5. UTH'ye göre beton kalitesinin sınıflandırılması [57]

Boyuna Titreşim Hızı (m/s)	Betonun Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Orta
2000-3000	Kötü
<2000	Çok Kötü

2.4.2.4 Kırılma tokluğu

Çimento esaslı kompozitlerin kırılma tokluğunu belirlemek için standart bir test yöntemi yoktur. ASTM E399 [58] "Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials", maksimum agrega boyutu 1000 μm olan çimento esaslı kompozitlere uygulanmış ve laboratuvarında kullanılan numune boyutuna kıyasla küçük işlem bölgesi boyutuna bağlı olarak doğrulanmıştır [7]. Bu test yönteminin iri agrega içermeyen çimento esaslı matrislere uygulaması daha önce yapılmış olan çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenmiş ve ECC gibi matris içerisinde iri agrega içermeyen sistemlerde uygulanabilirliği ispatlanmış ve kullanılmıştır [7,8,59-62]. Ayrıca, bu standart metotla belirlenen ECC matrisinin kırılma tokluğu değeri mikromekanik tasarım hesaplamaları aşamasında oldukça etkin bir rol oynamıştır [7,63]. Kırılma tokluğu tayini için her bir karışımdan her bir test için 360x75x50 mm boyutlarında 3 adet kiriş numunesi üretilmiş ve numunelerin tam ortalarına yaklaşık olarak 30 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Bu nedenle, kırılma tokluğunun belirlenmesi aşamasında çentik açılan bölgeyi ihmal edebilmek için $f(a/W)$ değeri hesaplanmıştır. Ardından, numunelere üç noktalı eğilmede-çekme testi uygulanmış ve 0.002 mm/saniye hızla yükleme yapılmıştır. Çentik bölgesinden kırılan numunelerin önce çentik derinlikleri net olarak belirlenmiş ve daha sonra kırılma tokluğu değerleri Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^2} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

P_Q : Tepe yükü, S : Açıklık uzunluğu, B : Numunenin yüksekliği, W : Numunenin derinliği ve $f(a/W)$: geometrik kalibrasyon faktörü (deney sonrasında ölçülen gerçek çatlak derinliğine göre 1.91 ile 2.18 aralığında değişmektedir). $f(a/W)$ 'nin formülü Denklem (2)'de sunulmuştur.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\left(2.15 - 3.93\frac{a}{W} + 2.7\frac{a^2}{W^2}\right)\right]}{2\left(1 + 2\left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\right)^{3/2}} \quad (2)$$

2.4.2.5 Eğilme performansı

ECC/EGC'lerin eğilme yükü-orta noktadaki sehimsin değerlerini tespit etmek amacıyla geliştirilen her karışımdan 360x75x50 mm boyutlarında üçer adet prizmatik numune her test yaşı için üretilmiştir. Universal test sistemi kullanılarak gerçekleştirilen eğilme-çekme deneyinde, merkez açıklık uzunluğu ile 304.8 mm ve eğilme yükünün açıklık uzunluğu 101.6 mm'dir. Eğilme deneyi, maksimum yük kapasitesi 100 kN olan kapalı devre elektro-mekanik test cihazı kullanılarak, 0.003 mm/saniye deformasyon kontrollü olarak literatüre uygun yapılmıştır [44]. Test esnasında, numunelerin orta noktasında oluşan sehimsin, yüksek hassasiyetli bir video ekstansometre seti ile ölçülmüş ve şekil değiştirmeye karşılık gelen yük bilgisayar sistemi yardımıyla saniyede 10 veri olacak şekilde kaydedilmiştir. Eğilme-çekme testinden sonra, el mikroskobu kullanılarak numunelerin yüzeyindeki çatlak genişlikleri tespit edilmiştir [44].

2.4.3 Mikroyapısal özellikler

UK+YFC esaslı EGC karışımları ile cüruf içeriğindeki artışın mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisi 7. ve 28. gün için tespit edilmiştir. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının mikroyapısal özellikleri X-ışını kırınım yöntemi (XRD), termogravimetrik analiz/diferansiyel termal analiz (TGA/DTA) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleri ile belirlenmiştir. Panalytical/Empyrean (Marka/Model) cihazı ile yapılan XRD analizinin tarama işlemi 10-90 açısal konumda [°2θ] ve 0.013°'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Linseis/ STA TG-DSC/DTA PT1600 (Marka/Model) cihazı ile gerçekleştirilen TGA/DTA analizi 15 mg'lık toz numuneler üzerinde, 25-1000 °C sıcaklık aralıklarında, 10 °C/dk tarama hızı ile nitrojen atmosferi koşullarında uygulanmıştır. Bruker/Vertex 70 (Marka/Model) cihazı ile yapılan FTIR ile bireysel spektrumların analizi, numunedeki bir kimyasal reaksiyonu tespit etmektedir. Kızılötesi ışık numuneden geçtiğinde, her bir fonksiyonel grup, spektrumların karakteristik absorpsiyon frekanslarında rezonansa girmesini sağlamaktadır. Elde edilen veriler, moleküller arasındaki kimyasal reaksiyonu tanımlar. FTIR analizindeki sıcaklık ve relatif nem sırasıyla, 20 °C ve %60 olarak sabit tutulmuştur.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Taze ve reolojik özellikler

ECC, EGC30 ve EGC40 karışımlarının lifli ve liffsiz yayılma çapları, mini-V hunisi akış süreleri, Marsh hunisi akış süreleri Tablo 6'da verildiği gibidir. Tablo 6'dan görüldüğü üzere bu üç karışım benzer yayılma çapına sahip olacak şekilde tasarlandığı için taze özellik verileri birbirine oldukça yakın değerler sağlamıştır. Ayrıca, Şekil 5'te verilen, Bingham modeline iyi derecede uyumlu olan uydurma eğrilere göre, R² için, 0.999'dan fazla değerler elde edilmiştir. Şekil 5'te verilen bu reolojik eğrilerden elde edilen kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri Tablo 6'da listelenmiştir. Farklı tasarım parametreleri ile geliştirilen UK+YFC esaslı M6 matrislerinin ve ECC matrisinin kayma gerilmesi, kayma hızındaki değişimle aynı

davranışı göstermiş ve kayma hızının artması sonucu kayma gerilmesi artmıştır. Şekil 6'da verilen kayma hızına bağlı olarak görünür viskozite değerlerindeki değişimlerden görüldüğü üzere, bu artışın bir sonucu olarak, matrislerin görünür viskozitesi kademeli bir şekilde azalmış ve daha sonra stabil davranış sergilemiştir.

Şekil 5 ve Şekil 6'da verilen sonuçlara göre, ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kayma gerilmesi, plastik viskozite ve görünür viskozite değerleri, yukarıda açıklanan taze özellik sonuçları gibi benzer reolojik ve işlenebilirlik özellikleri sergilemektedir. EGC40 karışımı %2.2 daha fazla su içeriğiyle EGC30 karışımı ile benzer taze ve reolojik özellik değerlerine ulaşmıştır. EGC40 karışımındaki YFC içeriği EGC30 karışımından %10 daha fazla olmasından dolayı EGC40 karışımındaki su içeriği artırılmıştır. Bu durum muhtemelen karışımların fiziksel özelliklerindeki ve kimyasal reaksiyonlarındaki farklılıkların bir sonucudur [64,65]. Ayrıca, bağlayıcı malzemelerin kıvamı ve işlenebilirliği malzemenin tipine ve inceliğine bağlı olmaktadır [66-68]. Bu nedenle, bu durum UK ve YFC minerallerinin Şekil 2'de verilen SEM görüntüleri yardımıyla açıklanabilir. Şekil 2'den görüldüğü üzere YFC minerali mikrodüzeyde köşeli bir tanecik yapısına sahipken, UK minerali küresel bir tanecik yapısına sahiptir [64]. Sonuç olarak, YFC içeriği arttıkça, köşeli parçacıkların sayısı artarken UK'nin küresel parçacıklarının miktarı azalmaktadır. Bu nedenle akış esnasında, UK mineralinin bu özel yapısı işlenebilirliği olumlu yönde etkilerken, YFC mineralinin pürüzlü tanecikleri işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemiştir. Ayrıca, YFC ve UK'nin karıştırılması, daha reaktif malzeme sunarak hızlı sertleşmeye neden olarak işlenebilirliği azaltmaktadır [64].

3.2 Mekanik özellikler

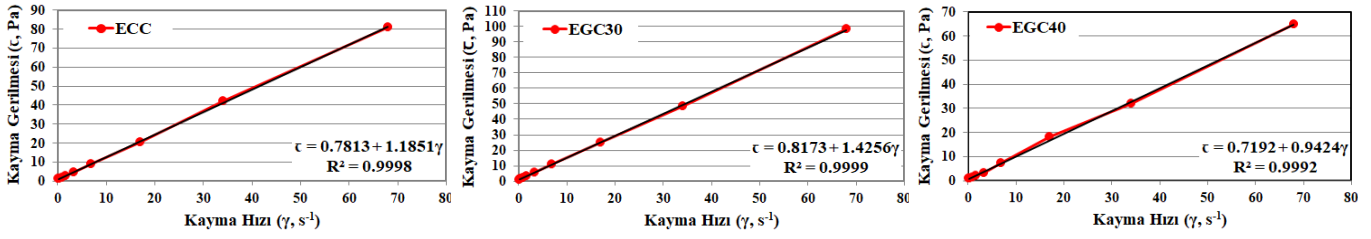
3.2.1 Basınç dayanımı

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının basınç dayanımları Şekil 7'de verilmiştir. %30 YFC ile geliştirilen EGC30 karışımının liffsiz ve lifli basınç dayanımları ECC'den 7. günde sırasıyla, %9.8 ve %-0.3 oranlarında daha düşük çıkmıştır. 28. günde ise bu değerler sırasıyla, %31.1 ve %27.8 olarak belirlenmiştir. EGC30 karışımı ECC'den daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu için bu karışımdaki YFC içeriği %40 oranına çıkarılarak M6_0.33_1745_40YFC karışımı geliştirilmiştir. Bu karışımın 7. gündeki liffsiz ve lifli basınç dayanımı ECC'den sırasıyla, %107.5 ve %119.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. 28. günde ise bu değerler sırasıyla, %47.0 ve %40.8 olarak belirlenmiştir. Böylece, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına sahip bir UK+YFC esaslı EGC karışımı geliştirilmiştir.

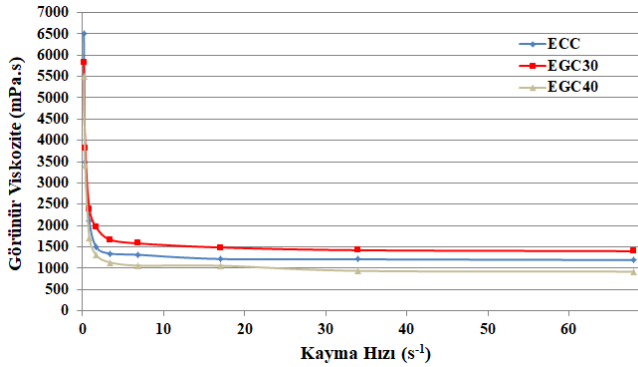
EGC40 karışımının basınç dayanımı EGC30 karışımından ise 7. günde sırasıyla, %130.2 ve %118.9 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla %113.5 ve %94.9 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, Škvára vd. [69], YFC içeriğindeki artışla geopolimerde yüksek basınç dayanımı, düşük kuruma büzülmesi, düşük sünme, takviye ile iyi bağlanma ve asit, sülfat ve ateşe karşı iyi direncin baskın olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Tablo 6. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının taze ve reolojik özellikleri

Taze Özellikler	ECC	EGC30	EGC40
Mini-Yayılma Hunisi Lifsiz Yayılma Çapı (cm)	31.85	31.70	32.60
Mini-Yayılma Hunisi Lifli Yayılma Çapı (cm)	15.80	15.80	16.60
Mini-V Hunisi Akış Süresi (sn)	4.50	4.29	3.97
Marsh Hunisi 100 ml Akış Süresi (sn)	135	124	120
Eşik Gerilmesi (Pa)	0.781	0.817	0.719
Plastik Viskozite (Pa.s)	1.185	1.426	0.942



Şekil 5. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının eşik gerilmesi ve plastik viskozite değerlerinin belirlenmesi



Şekil 6. ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının kayma hızına bağlı olarak görünür viskozite değerlerindeki değişimler

Öyle ki, YFC gibi kalsiyum bakımından zengin alümino silikatlar bazen sistemin reaktivitesini artırmak için F sınıfı UK gibi CaO bakımından düşük reaktifle birlikte kullanılabilir ve sonuç olarak ısıyla kürlenme ihtiyacını ortadan kaldırdığı söylenebilir [70-72]. UK, YFC ile değiştirildiğinde, esas olarak değişen birincil bileşenin, hem geopolimerlerde hem de alkali ile aktive edilmiş malzemelerde basınç dayanımının geliştirilmesi için etkili bir bileşen olarak rapor edilen CaO olduğu bilinmektedir [73,73]. Bununla birlikte, C'nin UK yerine yüksek oranlarda kullanıldığı durumlarda sistemde önemli miktarda CaO'nin varlığının sertleşmeyi hızla gerçekleştirdiği ve sistemin uygulanabilirliğini tehlikeye atabileceği söylenebilir [71,75]. Bu nedenle, sistemdeki kalsiyum miktarının geopolimer malzemelerin hem taze hem de sertleşmiş özelliklerine etkileri göz önünde bulundurularak optimize edilmesi gerekmektedir [65].

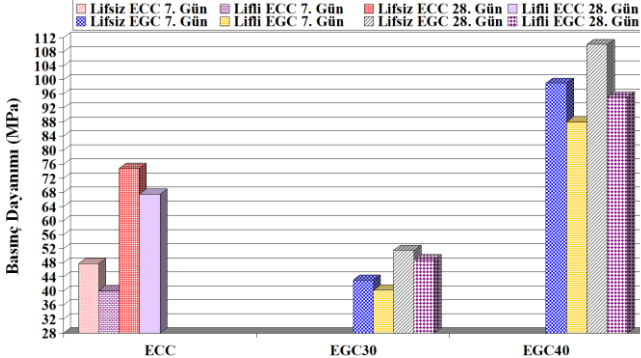
3.2.2 Elastisite modülü

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının elastisite modülü verileri Şekil 8'de grafiksel olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre ECC'nin 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %8.3 ve %2.9, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %12.9 ve %6.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. EGC40'un 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %25.5 ve %26.5, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %23.8 ve %25.0 oranlarında çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 7. gündeki lifsiz ve lifli elastisite modülü değerleri ECC karışımından sırasıyla, %15.1 ve %22.8, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %7.9 ve %16.8 oranlarında çok daha yüksek çıkmıştır. Benzer bir bulgu olarak, Oderji vd. [65] YFC içeriğinin artmasının dayanımı geliştirdiğini belirtmişlerdir. Bilindiği üzere, UK veya metakaolinin kısmi ikamesi olarak YFC'nin matrisine eklenmesi ile geopolimerin laboratuvar ortamında sertleşmesinin sağlanmakta ve daha kısa sürede daha yüksek dayanım gelişimine ulaşmaktadır [76]. Bu nedenle, artan YFC içeriği sayesinde EGC40 karışımının ulaştığı bu yüksek elastisite modülü değerleri YFC'nin matrisine eklenmesi ile artan C-S-H jellerinin bir sonucu olarak geopolimerin daha kısa sürede daha yüksek dayanım gelişimi sağladığını göstermektedir [76].

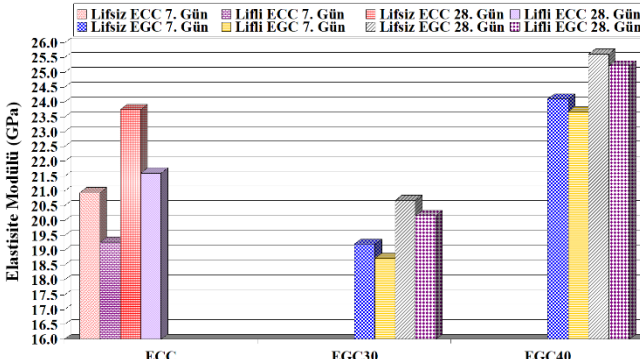
3.2.3 Hava kuru birim hacim ağırlık

Şekil 9'da ECC, EGC30 ve EGC40 karışımlarının hava kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmiştir. Bu karışımların teorik birim hacim ağırlıkları sırasıyla, 2054.1, 1899.7 ve 1928.0 kg/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu verilerden ve Şekil 9'dan görüldüğü üzere ECC ve EGC40 karışımlarının teorik birim hacim ağırlıkları ve hava kuru birim hacim ağırlık değerleri hem 7. günde hem de 28. günde

EGC30 karışımından daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, ECC ve EGC40 karışımları karşılaştırıldığında teorik birim hacim ağırlığı daha yüksek olan ECC'nin hava kuru birim hacim ağırlık değerlerinin genel olarak EGC40'tan daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 7. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç dayanımı verileri



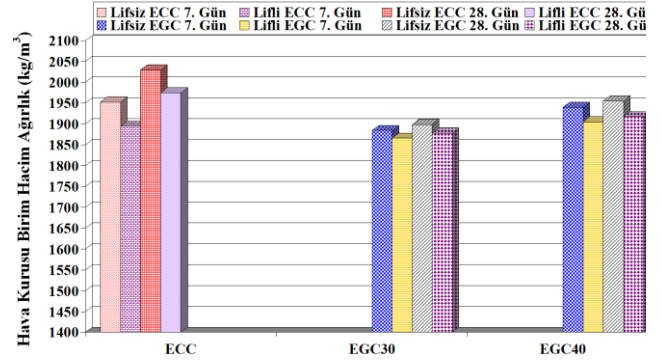
Şekil 8. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki elastisite modülü verileri

3.2.4 Yapısal verimlilik

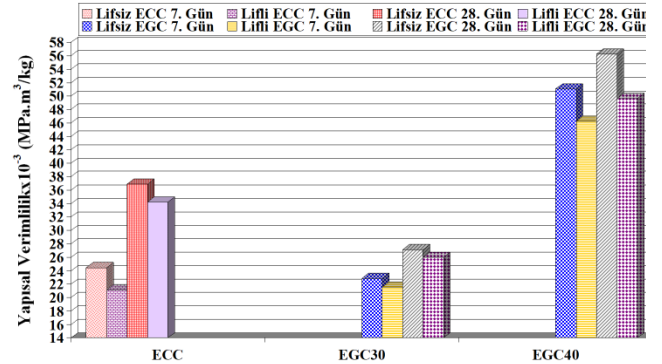
ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının yapısal verimlilik değerleri Şekil 10'da grafiksel olarak sunulmuştur. Sonuçlara göre ECC'nin 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %6.5 ve %1.8, 28. gündeki elastisite modülü değerleri ise sırasıyla, %26.4 ve %24.1 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. EGC40'ın 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri EGC30 karışımından sırasıyla, %123.5 ve %114.4, 28. gündeki yapısal verimlilik değerleri ise sırasıyla, %107.3 ve %90.9 oranlarında çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 7. gündeki lifsiz ve lifli yapısal verimlilik değerleri ECC karışımından sırasıyla, %108.8 ve %118.4, 28. gündeki yapısal verimlilik değerleri ise sırasıyla, %52.6 ve %44.9 oranlarında çok daha yüksek çıkmıştır. M6_0.33-1745_40C karışımının hem ECC hem de EGC30 karışımına göre bu son derece yüksek yapısal verimlilik değerleri çok yüksek basınç dayanımının bir sonucu olarak açıklanabilir. Bu nedenle, bu karışımların yapısal verimlilik değerlerinin basınç dayanımına paralel olarak değiştiği söylenebilir [77].

3.2.5 Ultrasonik titreşim hızı

ECC ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının UTH değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11'den görüldüğü üzere basınç dayanımı ve elastisite modülü hem ECC hem de EGC30 karışımından önemli ölçüde yüksek olan EGC40 karışımının UTH sonuçları ECC'den çok daha düşük veriler göstermiştir. ECC'nin lifsiz ve lifli UTH verileri EGC40 karışımından 7. günde sırasıyla, %32.6 ve %26.2 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %38.6 ve %32.7 oranlarında daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 9. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki hava kuru birim hacim ağırlık verileri

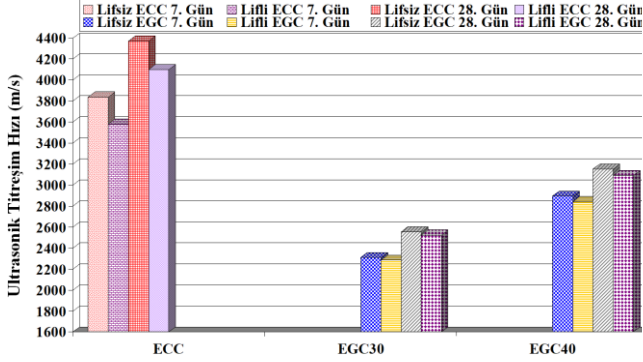


Şekil 10. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki yapısal verimlilik verileri

Öyle ki, Tablo 5'te verilen Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı kriterlerine [57] göre, lifsiz/lifli ECC'nin 7 ve 28 gündeki UTH verileri sırasıyla, 3500-4500m/sn aralığında olduğundan dolayı "iyi" kaliteli kompozit olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, lifsiz/lifli EGC40 karışımı sadece 28 gün için "orta" kalite olarak sınıflandırılmıştır. Bu karışımın diğer test yaşı ve lifsiz/lifli EGC30 karışımı 7 ve 28 gün için "zayıf" kaliteli kompozit olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, artan YFC içeriğinin bir sonucu olarak gelişen basınç dayanımı ve elastisite modülünün yanı sıra UTH verileri de artmıştır. EGC40 karışımının lifsiz ve lifli UTH verileri EGC30 karışımından 7. günde sırasıyla, %25.3 ve %24.3 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %23.4 ve %22.4 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde, Omer vd. [78] UPV ölçümlerinin basınç dayanımı ile benzer davranış gösterdiğini ve UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin üstel olduğunu belirtmiştir.

3.2.6 Kırılma tokluğu

Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri sırasıyla, Şekil 12 ve Şekil 13'te grafiksel olarak sunulmuştur. Kırılma tokluğunun hesaplanmasında kullanılan çentik derinliği değerleri ise Tablo 7'de parantez içerisinde verilmiştir.



Şekil 11. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. günde UTH verileri

Tablo 7'de sunulan kırılma tokluğu verilerine göre M6_0.33_1720C karışımının kırılma tokluğu değeri ECC'den 7. ve 28. günde sırasıyla, %40.4 ve %35.7 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Kırılma tokluğu değeri 7. ve 28. günde EGC30 karışımının yaklaşık 2.6 katı olan EGC40 karışımının kırılma tokluğu verileri 7. ve 28. günde ECC'den sırasıyla, %55.9 ve %69.6 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. YFC içeriğindeki artış ile, UK+YFC esaslı EGC numuneleri için üstün kırılma performansı sergilemiştir. Başka bir çalışmada, Nath ve Sarker [79] genel olarak, geopolimer betonların kırılma enerjisinin, karışımdaki YFC içeriğinin artmasıyla artma eğiliminde olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, daha yüksek kırılma enerjisi sonuçlarının bir başka nedeni, Şekil 7'de gösterildiği gibi %30 ve %40 YFC içeren karışımlar için basınç dayanımındaki artışa bağlanabilir [80]. Öyle ki, araştırmacılar [80] UK+C esaslı kendiliğinden yerleşen geopolimer beton numunelerinde kırılma enerjisinin değişimini incelemişler ve numunelerin basınç dayanımı arttıkça kırılma enerjisinin arttığı sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, artan YFC içeriğiyle sağlanan yüksek kırılma tokluğu değeri, YFC içeriğindeki yüksek CaO içeriğinin sağladığı önemli dayanım gelişiminin önemli bir sonucu olarak yorumlanabilir. Böylece, ECC'den kırılma tokluğu çok daha yüksek bir UK+YFC esaslı EGC karışımı geliştirilmiştir. EGC40 karışımının lifsiz ve lifli UTH verileri EGC30 karışımından 7. günde sırasıyla, %25.3 ve %24.3 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %23.4 ve %22.4 oranlarında daha yüksek çıkmıştır.

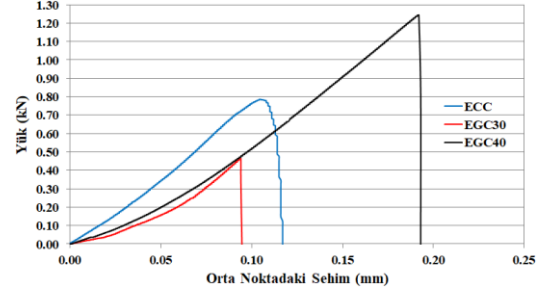
Tablo 7. ECC matrisi ile UK+YFC esaslı EGC matrislerinin kırılma tokluğu (MPa.m^{1/2}) test sonuçları

Mix ID	7. Gün	28. Gün
ECC	0.465(30.14)	0.552(30.31)
EGC30	0.277(30.28)	0.355(29.88)
EGC40	0.725(29.75)	0.936(29.95)

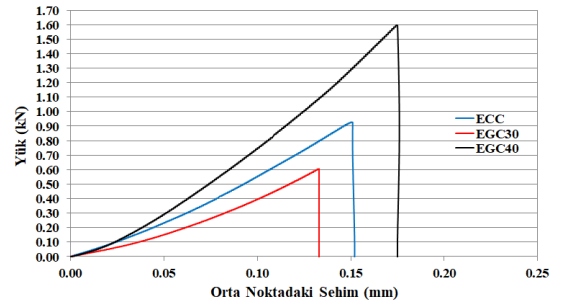
Parantez içerisindeki sayılar çentik derinliğini (mm) göstermektedir.

3.2.7 Eğilme performansı

ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarına ait maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Ayrıca, bu karışımların 7. ve 28. günde maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim eğrileri sırasıyla, Şekil 14 ve Şekil 15'de sunulmuştur.



Şekil 12. Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri



Şekil 13. Kırılma tokluğu deneyi yapılan ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 28. günde tipik yük-orta noktadaki sehim eğrileri

Hem 7. hem de 28. günde en yüksek eğilme yükü değerleri ECC karışımından elde edilmiştir. Basınç dayanımı, elastisite modülü ve kırılma tokluğu açısından ECC'den önemli ölçüde yüksek performans sergileyen EGC40 karışımının taşıdığı maksimum eğilme yükü hem 7 hem de 28. günde ECC karışımından daha düşük çıkmıştır. Benzer şekilde, Sitarz vd. [81] UK+YFC esaslı geopolimerde YFC içeriği %30'dan %50'ye yükseltildiğinde basınç dayanımında önemli bir artış olduğunu bildirmiştir. Ancak, yoğunluk ve eğilme dayanımı %50 cürufta önemli ölçüde artmamıştır. Dolayısıyla, ECC karışımının eğilme yükü 7. ve 28. günde EGC30 karışımından sırasıyla, %36.1 ve %36.3 oranlarında, EGC40 karışımından ise sırasıyla, %13.1 ve %8.2 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, daha fazla YFC içeriğiyle tasarlanan EGC40 karışımının maksimum eğilme yükü EGC30 karışımından sırasıyla, %20.4 ve %26.0 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, artan YFC içeriğinin bir sonucu olarak arttığı düşünülen C-S-H jellerinin bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, cürufun aktivasyonu ile ilave C-S-H jel oluşumu nedeniyle gözeneklilik ve gözenek çapının da küçüldüğü düşünülebilir [82-84]. Böylece, daha yüksek YFC içeriği, daha kompakt bir mikro yapı ve daha yüksek

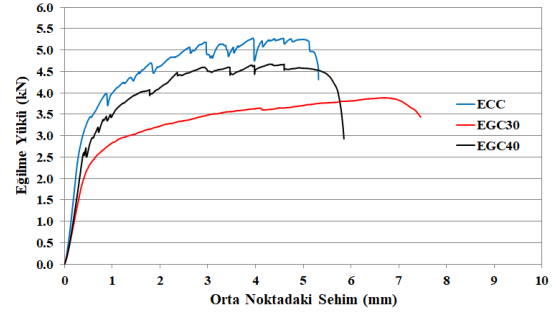
yoğunluk sağlayarak maksimum eğilme yükünü artırmıştır [85].

Maksimum eğilme yükü açısından UK+YFC esaslı EGC karışımlarından daha yüksek performans sergileyen ECC karışımı süneklik açısından bu iki karışımdan daha düşük performans sergilemiştir. Özellikle, EGC30 karışımı 7. ve 28. günde ECC'den sırasıyla, %37.8 ve %44.1 oranlarında daha yüksek deformasyon kapasitesine ulaşmıştır. EGC40 karışımı için ise bu gelişim %9.2 ve %11.0 olarak gerçekleşmiştir. EGC40 karışımından daha fazla UK ve daha az YFC içeriğine sahip olan EGC30 karışımı ise 7. ve 28. günde EGC40 karışımından %26.2 ve %29.8 oranlarında daha yüksek süneklik performansı sergilemiştir. UK+YFC esaslı EGC karışımlarının dayanım gelişimi ve çekme sünekliği arasındaki önemli ilişkiden deformasyon kapasitesindeki azalma beklenmektedir [86]. Artan maksimum eğilme yükü ve azalan süneklik, geopolimerizasyon nedeniyle daha yüksek mekanik özelliklere sahip C-(Na, Al)-S-H'ye daha yakın yeni bir C-S-H bileşiminin oluşumuyla birlikte artan yoğunluğu ve artan lift matris kimyasal bağı gösterir. Lif ve çevreleyen matris arasındaki bağı özelliklerinin, ECC/EGC sünekliğini yöneten anahtar parametrelerdir [87]. Ayrıca, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının deformasyon kapasiteleri, özellikle UK parçacıklarının pürüzsüz küresel şekli ile yüksek hacimde UK içeren ECC karışımının artırılmış sünekliği arasında bildirilen yakın ilişki ile, FA ikamesi olarak kullanılan YFC parçacıklarının pürüzlü ve köşeli parçacık morfolojisinden de olumsuz etkilenmiş olabilir [88].

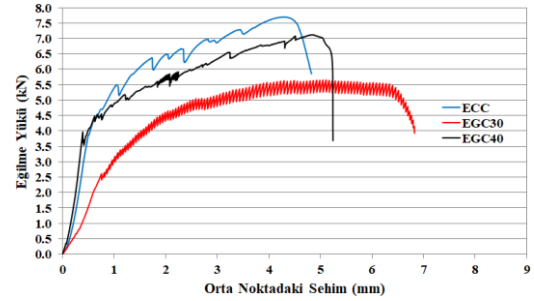
ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının ortalama çatlak sayıları ve ortalama çatlak genişliği değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Her numune için ölçülen en yüksek çatlak genişliği hariç diğer bütün çatlak genişliklerinin ortalaması alınarak ortalama çatlak genişliği hesaplanmış ve üç numunenin ortalaması ilgili karışıma ait ortalama çatlak genişliği elde edilmiştir. Her numune için ölçülen en yüksek çatlak genişliği hariç diğer tüm çatlak genişlikleri hesaba katılarak standart sapma değerleri ayrıca belirlenmiştir. Üç numunenin elde edilen standart sapma değerlerinin ortalaması alınarak, Tablo 9'da karışımların çatlak genişliğine ait standart sapma değerleri parantez içerisinde sunulmuştur. Elde edilen maksimum standart sapma değeri 1.97 olarak belirlenmiş ve bu da verilerin çok az dağılım gösterdiğini ve tartışmaların güçlü bir temele dayandığını göstermiştir.

Eğilme-çekme deneyi sonucunda elde edilen çatlak dağılımları süneklik performansları daha belirgin olan 7 günlük numuneler yardımıyla Şekil 16 ile incelenmiş ve numuneler üzerinde oluşan çoklu mikro-çatlakların dağılımı değerlendirilmiştir. Şekil 16'dan görüldüğü üzere EGC30 ve EGC40 karışımlarındaki çoklu mikro çatlak yapısının M45-ECC'den daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Karışımların çatlak sayısının sünekliğe paralel olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çatlak genişlikleri süneklik arttıkça azalmıştır. Karışımların çoklu mikro çatlak oluşumu sağladığı belirlenmiştir. Özellikle, ECC'den daha yüksek basınç dayanımına, elastisite modülüne, kırılma tokluğuna

ve deformasyon kapasitesine sahip olan EGC40 karışımının daha düşük çatlak genişliğine ulaşarak ECC'den daha çok çoklu mikro çatlak oluşumu sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 14. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. günde tipik eğilme yükü ve orta noktadaki sehimi eğrileri



Şekil 15. ECC karışımı ve UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 28. günde tipik eğilme yükü ve orta noktadaki sehimi eğrileri

3.3 Mikroyapısal özellikler

3.3.1 UK+YFC esaslı EGC'lerin XRD analizi

Şekil 17, UK+YFC esaslı EGC karışımlarında meydana gelen kimyasal bileşim varyasyonlarını (artış/azaltma) göstermektedir. UK+YFC esaslı EGC karışımları için Kuvars ($\text{SiO}_2\text{-K}$), Mullit ($\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2\text{-M}$), Kalsit ($\text{CaCO}_3\text{-CC}$), Hatrurit ($\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O-Ht}$), Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-A}$), Nefelin ($\text{AlNaSiO}_4\text{-N}$) ve Hematit ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}$) pikleri ve bu piklerdeki değişim Şekil 17'den ayrıca gözlemlenebilir. UK ve C'nin bireysel difraktogramlarının K ve M'nin varlığını gösterdiği bilinmektedir. Ancak CC sadece C'de kalsiyum varlığını göstermektedir [89]. Bu nedenle, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının XRD spektrumundaki tepe yoğunlukları, UK'de K, M ve H'nin varlığından, C'de K, M, CC ve H'nin varlığından, silis kumu ve Na_2SiO_3 'te ise K'nin varlığından kaynaklanmıştır [89-91]. Ayrıca, XRD spektrumlarındaki A ve N pikleri, UK'nin AA ile reaksiyona girdiğini, XRD spektrumlarındaki Ht pikleri ise C'nin AL ile reaksiyona girdiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 17; Ht, A ve N tepe noktalarının kimyasal reaksiyon sonucu oluştuğunu ve diğer bileşenlerin tepe noktaları ile birlikte var olduğunu göstermektedir. İlk büyük ve bağımsız tepe noktası, tüm UK+YFC esaslı EGC karışımlarında K için $26.8^\circ 2\theta$ 'da tanımlanmıştır.

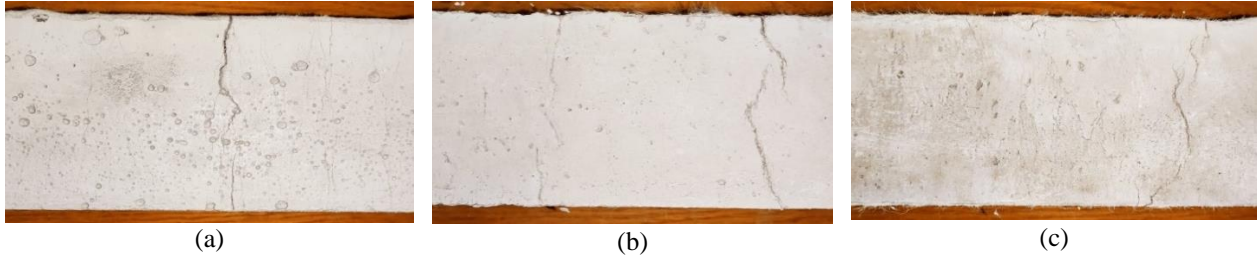
Tablo 8. ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki maksimum eğilme yükü ve orta noktadaki sehim değerleri

Karışım İsmi	7. Gün		28. Gün	
	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Maksimum Eğilme Yükü (kN)	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Maksimum Eğilme Yükü (kN)
ECC	5.32	5.28	4.72	7.70
EGC30	7.33	3.88	6.80	5.65
EGC40	5.81	4.67	5.24	7.12

Tablo 9. ECC karışımı ile UK+YFC esaslı EGC karışımlarının 7. ve 28. gündeki çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri

Karışım İsmi	Çatlak Sayısı		Ortalama Çatlak Genişliği (µm)	
	7. Gün	28. Gün	7. Gün	28. Gün
ECC	19	12	52(1.52)	75(1.39)
EGC30	51	46	36(1.49)	50(1.79)
EGC40	27	19	48(1.17)	66(1.97)

Parantez içerisindeki sayılar standart sapma değerlerini göstermektedir.



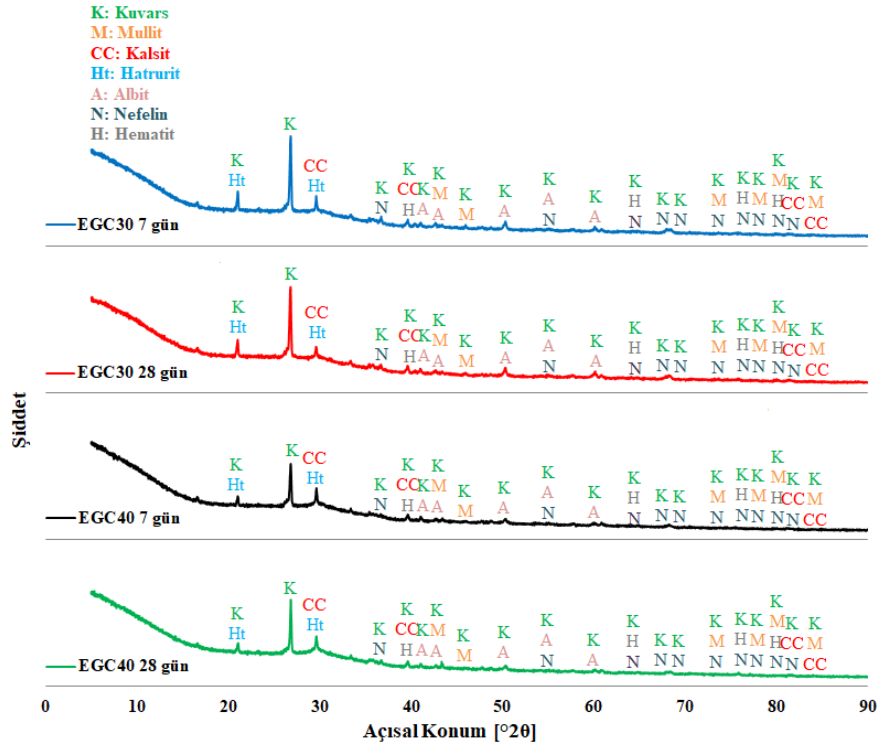
Şekil 16. (a) ECC, (b) EGC30 ve (c) EGC40'ın 7. gündeki çatlak görselleri

Bu nedenle, 26.8° 20'da tek başına gözlenen K piklerindeki değişiklikler tartışılmıştır. Ayrıca, UK+YFC esaslı EGC'lerdeki YFC içeriğinden kaynaklanan 29.5° 20'da gözlemlenen CC ve Ht piklerindeki ortak değişimler de incelenmiştir. EGC30 karışımında 26.8° 20'da gözlemlenen K piklerinin 7 ve 28 gün için benzer pik şiddetlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EGC40 karışımının 7 ve 28 günlük numuneleri için de aynı şekilde benzer K pik zirveleri ile sonuçlanmıştır. Ancak, EGC40 karışımının 26.8° 20'daki 7 ve 28 günlük K pik şiddeti, EGC30 karışımından daha düşük zirvelere ulaşmıştır. Bu sonuç, Tablo 4'te verilen karışım oranlarını doğrular niteliktedir. Öyle ki, EGC40'ın UK içeriği EGC30 karışımından daha düşük, ancak YFC içeriği daha yüksektir. Tablo 1'den görülebileceği üzere, UK'nin kimyasal bileşiminde %61.25 oranındaki SiO₂ içeriği varken, C'nin SiO₂ içeriği %36.82 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, EGC40'ın K pik şiddeti hem 7 hem de 28 gün için EGC30'dan daha düşük çıkmıştır. 29.5° 20'daki CC ve Ht pik şiddetleri değerlendirildiğinde, EGC30'nin 28 gündeki pik şiddetinin 7 güne göre daha az olduğu söylenebilir. Aynı bulgu, EGC40 için de tespit edilmiştir. Bu durum 28. günde azalan karbonatlaşmanın kimyasal reaksiyondan daha etkili olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca, EGC40'ın 29.5° 20'daki pik şiddetinin her iki test yaşı için de EGC30'dan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EGC40'ın daha yüksek YFC içeriği sayesinde artan kimyasal

reaksiyonların ve kalsiyum miktarının bir etkisi olarak değerlendirilmiştir.

3.3.2 UK+YFC esaslı EGC'lerin TGA/DTA analizi

UK+YFC esaslı EGC karışımlarının TGA ve DTA eğrileri sırasıyla, Şekil 18 ve Şekil 19'da verilmiştir. UK esaslı geopolimer kompozitler için, kütledeki keskin düşüşün bir sonucu olarak 50-150 °C aralığında bir tepe noktası, UK esaslı EGC'lerin N-A-S-H jelindeki suyun azalmasıyla görülebilir [91,92]. TGA/DTA, UK esaslı geopolimer kompozitler için 400-800 °C'de karbonatların ve sodyum karbonatların faz oluşumunu gösterir [93,94]. Ayrıca, alkali ile aktive edilen YFC esaslı geopolimer kompozitler için, 50-200 °C'deki ilk ağırlık kaybı, pastadaki dehidrasyonu ve C-S-H benzeri katının (C-A-S-H ve/veya C-(N)-A-S-H) varlığını göstermektedir. 200 °C ve 400 °C'deki ağırlık kaybı ise, hidrotalsit benzeri katı fazların ağırlık kaybıyla tutarlıdır [95-98]. Hem C-S-H hem de hidrotalsit genellikle hidratlı alkali ile aktifleştirilmiş YFC esaslı geopolimerlerde gözlemlenir [95,99]. Bununla birlikte, hidrotalsit benzeri faz ile ilişkili 200 ve 400 °C'de TGA'daki omuzlar, daha yüksek MgO içeriği ile daha belirgindir. Bu nedenle, 200 ve 400 °C aralığındaki TGA/DTA değişiklikleri incelenmemiştir. 520-750 °C sıcaklık aralığı arasındaki pikler, alkali ile aktifleştirilmiş YFC esaslı geopolimerlerdeki CC'nin karbondan arınması ile açıklanmaktadır [100, 101].



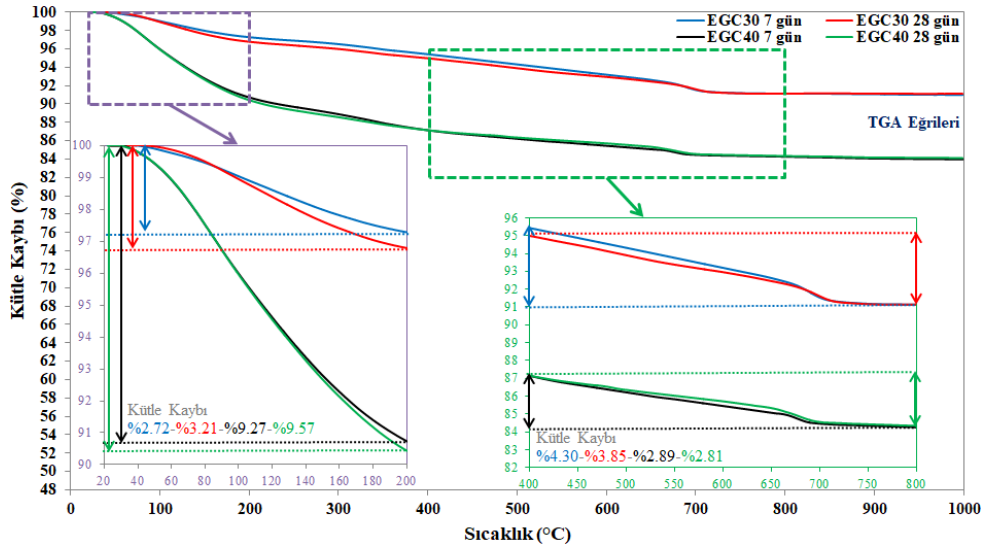
Şekil 17. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının XRD analizi

UK+YFC ile geliştirilen geopolimer kompozitler için daha önceki çalışmalarda belirlenen pik aralıkları dikkate alınarak bu çalışmadaki pik aralıkları DTA eğrilerinden elde edilmiş ve pik şiddetlerindeki farklılıklar tartışılmıştır. Bu çalışmada, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının toplam C-S-H ve N-A-S-H miktarı, DTA grafiklerinde 20-200 °C (ilk-nihai) arasındaki TGA eğrileri tepe sıcaklıkları ile hesaplanan ağırlık kayıpları ile belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük EGC30 için ağırlık kayıpları sırasıyla, %2.72 ve 3.21 olarak elde edilmiştir 7 ve 28 günlük EGC40 için bu değerler sırasıyla, %9.27 ve 9.57 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının C-S-H ve N-A-S-H miktarının basınç dayanımına paralel olarak değiştiğini göstermiştir [91,92,95,100]. Ayrıca, bu sonuçlardan basınç dayanımı EGC30'dan her iki test yaşı için de çok daha yüksek olan EGC40'ın jel miktarının da çok daha yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Artan test yaşının her iki EGC karışımında da basınç dayanımında olduğu gibi jel içeriğinin artışı sağladığı sonucuna varılmıştır. UK+YFC esaslı EGC karışımlarının sodyum karbonat ve karbonat içerikleri, DTA eğrilerinde 400 °C (ilk) ve 800 °C (son) pik aralıklarındaki TGA grafiklerinden elde edilen ağırlık kayıplarından belirlenmiştir. 7 ve 28 günlük EGC30 için ağırlık kayıpları sırasıyla, %4.30 ve 3.85 olarak elde edilmiştir 7 ve 28 günlük EGC40 için bu değerler sırasıyla, %2.89 ve 2.81 olarak belirlenmiştir. Böylece, EGC40'ın her iki test yaşı için de CC içeriğinin EGC30'dan daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artan test yaşının CC içeriğini azalttığı her iki EGC karışımının da ortak bulgusu olarak elde edilmiştir. Bu nedenle, artan test yaşı ile birlikte N-A-

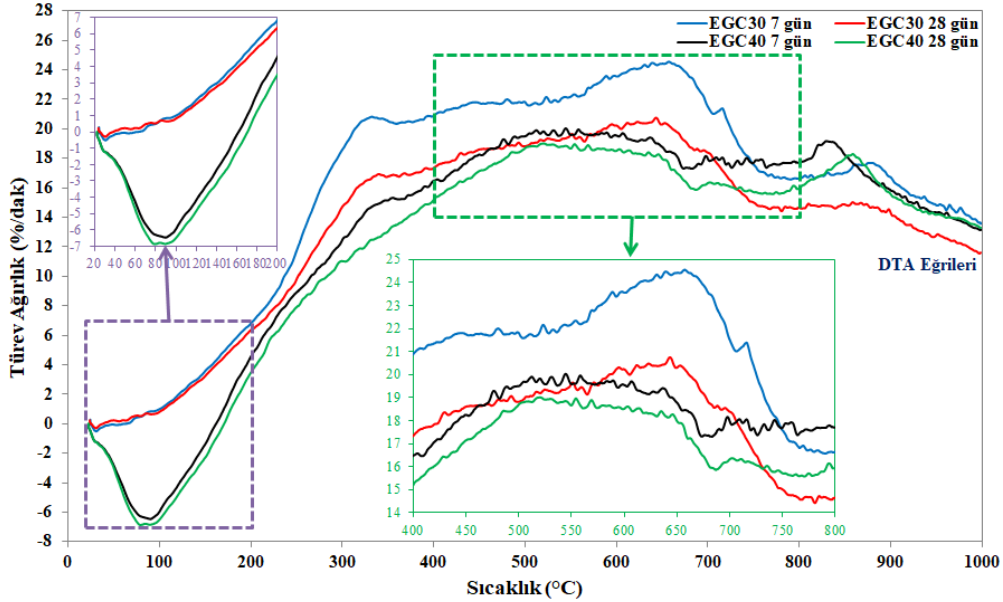
S-H ve C-S-H jel içeriği artarken, CC içeriğinin azaldığı söylenebilir.

3.3.3 UK+YFC esaslı EGC'lerin FTIR analizi

UK+YFC esaslı EGC karışımlarının FTIR spektrumları Şekil 20'de gösterilmiştir. Geopolimerin yapısı yaygın olarak Si-O-Si ve Si-O-Al olarak belirtilen alümino silikat ağlarının tetrahedral bağlarından oluşmaktadır [92,102-105]. Bu nedenle, geopolimerlerde yaklaşık 900-1200 cm⁻¹'de gözlemlenen Si-O-T'nin (T: Si veya Al) asimetrik gerilme titreşim bandı, geopolimerizasyon ile oluşturulan alkalin alüminosilikat jele bağlanmıştır [106-108]. Öyle ki, geopolimerin karakteristik FTIR titreşim bantlarından biri olan 980-1030 cm⁻¹'deki bant, N-A-S-H jelin (Si-O-Si ve Al-O-Si) asimetrik gerilmesini göstermektedir [109]. Na₂SiO₃ ile aktive olan cüruf spektrumlarına göre 974 ile 1033 cm⁻¹ arasındaki bant ise, C-S-H jelinin önemli dekalsifikasyonunun bir sonucu olarak Si-O titreşim bandını ifade etmektedir [110]. Ayrıca, önceki bir çalışmaya göre [108], geniş Si-O-T bandının cürufta 960 cm⁻¹'deki merkezi konumunun geopolimer malzemede daha yüksek bir frekansa kaydığı bilinmektedir. Yukarıdaki bilgilere göre, bu çalışmada, yaklaşık 993 cm⁻¹ ana bantta alt pik yapan uydu bantları, alümino silikat camlara ait spektral omuz olmalıdır [92]. Ayrıca, yaklaşık 993 cm⁻¹'deki alt tepe, C(N)-A-S-H globülleri içindeki kristallik derecesi ile ilişkili olabilir [108,111]. 779 cm⁻¹'de gözlemlenen diğer önemli bant, UK esaslı geopolimer kompozitler için Si-O-Si/Si-O-Al gerilmesine atfedilebilir [92]. Ayrıca, C(N)-A-S-H için 600 ile 800 cm⁻¹ arasındaki bant Si-O-T'nin simetrik gerilme titreşimlerinden dolayıdır [103,108,112].



Şekil 18. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının TGA eğrileri

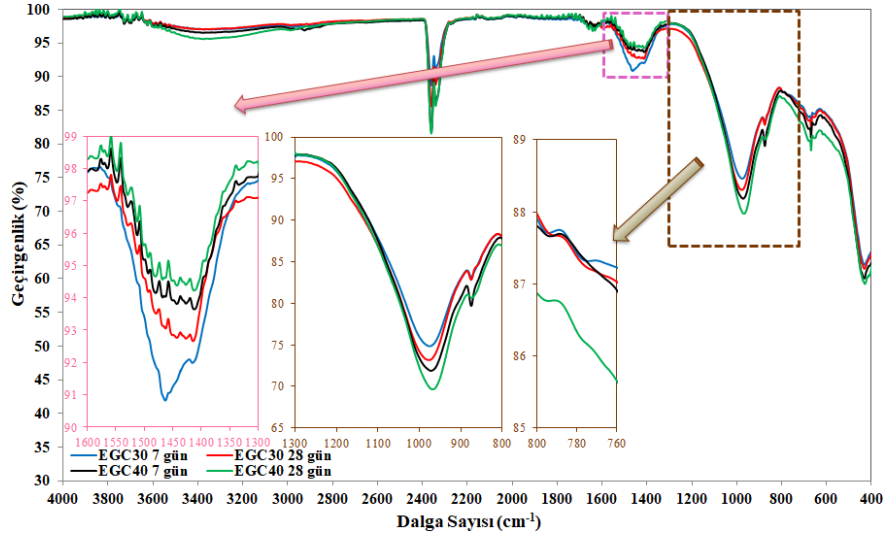


Şekil 19. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının DTA eğrileri

Bu nedenle, C-S-H ve N-A-S-H jel oluşumu, UK+YFC esaslı EGC'ler için 993 ve 777 cm^{-1} tepe yoğunluğunun yükselmesine katkı sağlamaktadır [90,113]. UK+YFC esaslı EGC'ler için bu iki dalga sayısı karakteristiğine ilişkin derin geçirgenlik tepe noktasına göre FTIR spektrumlarının TGA/DTA ile benzer sonuçlar gösterdiği ve basınç dayanımı test sonuçlarını desteklediği söylenebilir. Böylece, Şekil 20'de gösterildiği gibi, 993 ve 777 cm^{-1} 'deki derin geçirgenlik değeri ve tepe yoğunluğu incelendiğinde; en yüksekten en düşüğe N-A-S-H ve C-S-H jel içeriklerinin 28 günlük EGC40>7 günlük EGC40>28 günlük EGC30>7 günlük EGC30 olduğu görülebilir.

UK esaslı geopolimerlerde gözlemlenen 1440-1470 cm^{-1} ve 840-860 cm^{-1} 'deki bantlar, sırasıyla, O-C-O bağının gerilmesiyle ve bükülmesiyle açıklanabilir, bu da sodyum karbonatın varlığını gösterir ve 800 $^{\circ}\text{C}$ 'den sonra kaybolan

karbonatlardan gelen CO_2 'ye atfedilebilir [90,114]. Ayrıca, Mozgawa ve Deja [115], alkali ile aktifleştirilmiş cüruf geopolimerlerinden kalsite karşılık gelen absorpsiyon piklerinin 1480 cm^{-1} ve 875 cm^{-1} olduğunu bildirmiştir. Önceki bir araştırmaya göre [116], 875 cm^{-1} 'deki bant CO_3^{2-} 'nin düzlem dışı bükülmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, alkali ile aktive edilen cüruf harçları için 875 cm^{-1} 'deki bant, kalsitin karakteristik bir zirvesidir [117]. Yukarıda belirtilen bilgilere göre, bu çalışmada özellikle 1417-1485 cm^{-1} ve 879 cm^{-1} 'deki pik yoğunlukları ve geçirgenlik derinlikleri CaCO_3 içeriklerindeki değişimi göstermiştir. Böylece TGA/DTA'da elde edilen bulgular FTIR spektrumu ile desteklenmiştir. Dolayısıyla, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının CC içeriklerinin 28 günlük EGC40<7 günlük EGC40<28 günlük EGC30<7 günlük EGC30 şeklinde sıralandığı Şekil 20'den görülebilir.



Şekil 20. 7 ve 28 günlük UK+YFC esaslı EGC karışımlarının FTIR spektrumları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, UK+YFC esaslı EGC karışımlarının taze ve reolojik özellikleri ECC'ye benzer olacak şekilde geliştirilmiştir. Bunu sağlayabilmek için daha fazla YFC ve daha az UK içeriğine sahip olan EGC karışımının su içeriği artırılmıştır. Böylece, mikroyapıdaki küresel tanecik yapısıyla UK'nin C'den daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu belirlenmiştir.

Hava kuru birim hacim ağırlığa EGC30'dan daha yüksek ve ECC'den düşük olmasına rağmen oldukça yakın olan EGC40 karışımının yapısal verimliliği bu iki karışımdan çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EGC40 karışımının basınç dayanımı, elastisite modülü ve kırılma tokluğu EGC30 ve ECC'den hem 7. hem de 28. günde çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. %40 YFC ile üretilen EGC40'ın, gelişen dayanımının artan C-S-H jelinin bir sonucu olduğu TGA/DTA ve FTIR analizleriyle ispatlanmıştır. UK yerine kullanılan YFC yüzdesinin artması ile artan jel içeriğinin tersine CC içeriği azalmıştır. Ayrıca, bu analizler ile artan test yaşı ile birlikte C-S-H ve N-A-S-H jel içeriğinin arttığı ve CC içeriğinin azaldığı belirlenmiştir. XRD analizi ise, YFC içeriğinin artması ve UK içeriğinin azalmasının bir sonucu olarak kuvars pik şiddetinin azaldığını, kalsit ve hatrurit pik şiddetinin arttığını göstermiştir. EGC40'ın UTH verileri ve maksimum eğilme yükü %30 YFC içeren EGC karışımından daha yüksek, ancak ECC'den daha düşük çıkmıştır. Ayrıca, EGC40'ın EGC30'a göre deformasyon kapasitesi daha düşük seviyelerde kalmasına rağmen, ECC'den daha yüksek çıkmıştır. Böylece, ECC'den çok daha yüksek basınç dayanımına, daha yüksek deformasyon kapasitesine ve daha düşük maksimum eğilme yükü taşıma kapasitesine sahip olan UK+YFC esaslı bir EGC karışımı geliştirilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından MMT 2021/2-BAGEP no'lu ve "Sentetik Vollaonit İçeren Tasarlanmış Geopolimer Kompozitlerin

Taze, Mekanik, Durabilite ve Boyutsal Stabilite Özellikleri" başlıklı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Y. Ling, K. Wang, W. Li, G. Shi and P. Lu, Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 747–757, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>.
- [2] J. Cai, J. Pan, J. Han, Y. Lin and Z. Sheng, Low-energy impact behavior of ambient cured engineered geopolymer composites. *Ceramics International*, 48, 9378–9389, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.12.133>.
- [3] V.C. Li and T. Kanda, Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10 (2), 66–69. 1998.
- [4] H.J. Kong, S.G. Bike and V.C. Li, Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 301–309, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00057-4).
- [5] B. Nematollahi, J. Sanjayan and F.U.A. Shaikh, Tensile strain hardening behavior of PVA fiber-reinforced engineered geopolymer composite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (10), 04015001, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001242](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001242).
- [6] J. Pan, J. Cai, H. Ma and C.K. Leung, Development of multiscale fiber-reinforced engineered cementitious composites with PVA Fiber and CaCO₃ whisker. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 04018106, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002305](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002305).

- [7] V.C. Li, D.K. Mishra and H.C. Wu, Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. *Materials and Structures*, 28, 586–595, 1995.
- [8] S. Wang and V.C. Li, Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal* 104 (3), 233–241, 2007. <https://doi.org/10.1201/b15883-8>
- [9] C. Shi and A. Palomo, New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 750–763, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.
- [10] M. Juenger, F. Winnefeld, J. Provis and J. Ideker, Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research* 41 (12), 1232–1243, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.012>.
- [11] J. Cai, J. Pan, J. Han, Y. Lin, and Z. Sheng, Impact behaviours of engineered geopolymer composite exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 312, 125421, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125421>.
- [12] B.-C. Lyu, C. Ding, L.-P. Guo, B.O. Chen, and A.-G. Wang, Basic performances and potential research problems of strain hardening geopolymer composites: A critical review. *Construction and Building Materials*, 287, 123030, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123030>.
- [13] Y. Wang, Y. Wang, and M. Zhang, Effect of sand content on engineering properties of fly ash-slag based strain hardening geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 34, 101951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101951>.
- [14] J. Davidovits, Environmentally driven geopolymer cement applications. in: *Proceedings of 2002 Geopolymer Conference*, Melbourne, Australia, 2002.
- [15] K. Chen, D. Wu, L. Xia, Q. Cai and Z. Zhang, Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments—A review of influence factors and comparison with ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 279, 122496, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>.
- [16] P. Zhang, Y. Zheng, K. Wang, and J. Zhang, A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Composites Part B: Engineering*, 152, 79–95, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>.
- [17] M. Zahid, N. Shafiq, S.N.A. Razak and R.F. Tufail, Investigating the effects of NaOH molarity and the geometry of PVA fibers on the post-cracking and the fracture behavior of engineered geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 265, 120295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120295>.
- [18] H.H. Nguyen, Q.H. Luong, J.I. Choi, R. Ranade, V.C. Li and B.Y. Lee, Ultra-ductile behavior of fly ash-based engineered geopolymer composites with a tensile strain capacity up to 13.7%. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104133, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104133>.
- [19] A.C.C. Trindade, I. Curosu, M. Liebscher, V. Mechtcherine and F.A. Silva, On the mechanical performance of K- and Na-based strain-hardening geopolymer composites (SHGC) reinforced with PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 248, 118558, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125649>.
- [20] M. Ohno, and V.C. Li, An integrated design method of engineered geopolymer composite. *Cement and Concrete Composites*, 88, 73–85, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.02.001>.
- [21] Y. Alrefaei and J.G. Dai, Tensile behavior and microstructure of hybrid fiber ambient cured one-part engineered geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 184, 419–431, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.012>.
- [22] L.L. Kan, W.S. Wang, W.D. Liu, M. Wu, Development and characterization of fly ash based PVA fiber reinforced Engineered Geopolymer Composites incorporating metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103521, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103521>.
- [23] A.C.C. Trindade, A.A. Heravi, I. Curosu, M. Liebscher, F. de Andrade Silva and V. Mechtcherine, Tensile behavior of strain-hardening geopolymer composites (SHGC) under impact loading. *Cement and Concrete Composites*, 113, 103703, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103703>.
- [24] M. Ohno and V.C. Li, A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 57, 163–168, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005>.
- [25] S.K. Nath, S. Maitra, S. Mukherjee and S. Kumar, Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 758–765, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.106>.
- [26] Z. Li and S. Liu, Influence of slag as additive on compressive strength of fly-ash-based geopolymers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (6), 470–474, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(470\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(470)).
- [27] J. Chang, A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 1005–1011, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01096-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01096-7).
- [28] S.K. Nath and S. Kumar, Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymers. *Construction and Building Materials*, 38, 924–930, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.070>.
- [29] P. Deb, P. Nath and P. Sarker, The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient

- temperature. *Materials and Design*, 62, 32–39, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.05.001>.
- [30] S.K. Nath, Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends. *Construction and Building Materials*, 181, 487–494, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.070>.
- [31] S.K. Nath and S. Kumar, Influence of granulated silico-manganese slag on compressive strength and microstructure of ambient cured alkali-activated fly ash binder. *Waste and Biomass Valorization*, 10 (7), 2045–2055, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0213-1>.
- [32] TS EN 197-1, Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [33] D. Hardjito, S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw and B.V. Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101, 467–472, 2004. <https://doi.org/10.14359/13485>.
- [34] M.D.J. Sumajouw and B.V. Rangan, Low-calcium fly-ash-based geopolymer concrete. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology. Perth, Australia, 2006.
- [35] P. Pavithra, M.S. Reddy, P. Dinakar, B.H. Rao, B.K. Satpathy and A.N. Mohanty, Effect of the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and NaOH molarity on the synthesis of fly ash-based geopolymer mortar. *Geo-Chicago 2016*. DOI: 10.1061/9780784480151.034.
- [36] A. Patra, M. Chowdhry and B. Prusty, Effect of synthesis parameters on the compressive strength of fly ash based geopolymer concrete. *International Journal of Environment and Pollution*, 3, 79–88, 2012.
- [37] V.C. Li, S. Wang and C. Wu, Tensile strain-hardening behavior of PVA-ECC. *ACI Materials Journal*, 98(6), 483–492, 2001. <https://hdl.handle.net/2027.42/84671>.
- [38] H.J. Kong, S. Bike and V.C. Li, Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. *Cement and Concrete Composites*, 25, 301–309, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00057-4).
- [39] S. Kumar, R. Kumar and S.P. Mehrotra, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymers. *Journal of Materials Science*, 45(3), 607–615, 2010. DOI 10.1007/s10853-009-3934-5.
- [40] J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer and G.C. Lukey, The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89, 63–73, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6).
- [41] J. Cai, X. Li, J. Tan and B. Vandevyvere, Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymers. *Journal of Building Engineering*, 30, 101307, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101307>.
- [42] L. Coppola, D. Coffetti, E. Crotti, R.D., Aversano and G. Gazzaniga, The influence of heat and steam curing on the properties of one-part fly ash/slag alkali activated materials: Preliminary results. *AIP Conf. Pro.* 2196, 020038, 2019.
- [43] M. Şahmaran, Z. Bilici, E. Özbay, T.K. Erdem, H.E. Yücel and M. Lachemi, Improving the workability and rheological properties of Engineered Cementitious Composites using factorial experimental design. *Composites Part B: Engineering*, 45, 356–368, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.015>.
- [44] H.E. Yücel, H.Ö. Öz, M. Güneş and Y. Kaya, Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios. *Construction and Building Materials* 306, 124921, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124921>.
- [45] C.F. Ferraris, K. Obla and R. Hill, The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research* 31 (2), 245–255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00454-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00454-3).
- [46] M. Lachemi, K.M.A. Hossain, R. Patel, M. Shehata and N. Bouzoubaa, Influence of paste/ mortar rheology on the flow characteristics of high-volume fly ash self-consolidating concrete. *Magazine and Concrete Research*, 59 (7), 517–528, 2007. <https://doi.org/10.1680/macr.2007.59.7.517>.
- [47] E.H. Yang, M. Şahmaran, Y. Yang and V.C. Li, Rheological control in production of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106 (4), 357–366, 2009. <https://doi.org/10.14359/56656>
- [48] ASTM C109, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens). American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, United States, 2016.
- [49] ASTM C469, Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2014.
- [50] J.R. Del Viso, J.R. Carmona and G. Ruiz, Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 38 (3), 386–395, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.020>.
- [51] S. Sinaie, A. Heidarpour, X.L. Zhao and J.G. Sanjayan, Effect of size on the response of cylindrical concrete samples under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 84, 399–408, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.076>.
- [52] F. Stochino, M. Valdesa, F. Mistretta and M. Sassu, Assessment of lightweight concrete properties under cryogenic temperatures: influence on the modulus of elasticity. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1467–1472, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.120>
- [53] B. Wu, C.H. Liu and Y. Yang, Size effect on compressive behaviors of normal strength concrete cubes made from demolished concrete blocks and fresh

- concrete. Magazine of Concrete Research, 65 (19), 1155–1167, 2013. <https://doi.org/10.1680/macrcr.13.00053>.
- [54] B. Wu, Y. Yu, Z. Chen and X. Zhao, Shape effect on compressive mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps. Construction and Building Materials, 187, 50–64, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.086>.
- [55] H. Yang, L. Lv, Z. Deng, et al., Residual compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete after exposure to high temperatures. Structural Concrete, 18 (3), 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1002/suco.201500153>.
- [56] ASTM C597, Standard test method for pulse velocity through concrete. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2016.
- [57] IAEA, Guide book on non-destructive testing of concrete structures. Training Courses Series no. 17, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002.
- [58] ASTM E399, Test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2003.
- [59] V.C. Li and Wu, H.C., Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites. Applied Mechanics Review (ASME), 45 (8), 390–398, 1992. <https://hdl.handle.net/2027.42/84708>.
- [60] S. Wang, and V.C. Li, High-early-strength engineered cementitious composites. ACI Material Journal, 103 (2), 97–105, 2006.
- [61] M.D. Lepech, V.C. Li, R.E. Robertson and G.A. Keoleian, Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability. ACI Materials Journal, 105 (6), 567-575, 2008. <https://hdl.handle.net/2027.42/84660>.
- [62] M.D. Stults, R. Ranade, V.C. Li and T.S. Rushing, Mechanical effects of rice hush ash in ultra-high performance concretes: a matrix study. in Advances in Cement-Based Materials, Proc., International Conference on Advanced Concrete Materials, sayfa 21–28, Stellenbosch, South Africa, November 2009.
- [63] V.C. Li, ECC tailored composites through micromechanical modeling. fiber reinforced concrete: Present and the future edited by Banthia, N., Bentur, A. and Mufti, A. (Eds.)', CSCE, Montreal, 64-97, 1998.
- [64] M.H. Al-Majidi, A. Lampropoulos, A. Cundy and S. Meikle, Development of geopolymers mortar under ambient temperature for in situ applications. Construction and Building Materials, 120, 198–211. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.085>.
- [65] S.Y. Oderji, B. Chen, M.R. Ahmad and S.F.A. Shah, Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based Geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators. Journal of Cleaner Production, 225, 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.290>.
- [66] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel, Rice hush ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. Construction and Building Materials, 22 (8), 1675–1683, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>.
- [67] G.A. Rao, Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. Cement and Concrete Research, 33 (11), 1765–1770, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00171-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00171-6).
- [68] H. Temiz, M.M. Kose and S. Koksak, Effects of portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete. Construction and Building Materials, 21 (6), 1170–1176, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.011>.
- [69] F. Škvára, T. Jílek and L. Kopecký', Geopolymer materials based on fly ash. Ceramics Silikaty, 49 (3), 195–204, 2005.
- [70] A.M. Rashad, A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. Materials Design 53, 1005–1025, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>.
- [71] S. Saha and C. Rajasekaran, Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag. Construction and Building Materials, 146, 615–620. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.139>.
- [72] J. Shang, J.G. Dai, T.J. Zhao, S.Y. Guo, P. Zhang and B. Mu, Alternation of traditional cement mortars using fly ash-based geopolymer mortars modified by slag. Journal of Cleaner Production 203, 746–756, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.255>.
- [73] N.K. Lee and H.K. Lee, Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. Construction and Building Materials, 47, 1201–1209, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107>.
- [74] J. Temuujin, A. van Riessen and R. Williams, Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. Journal of Hazardous Materials, 167 (1–3), 82–88, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.12.121>.
- [75] I. Perna and T. Hanzlíček, The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method. Journal of Cleaner Production, 112, 1150–1155, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.069>.
- [76] R. Gopalakrishnan and K. Chinnaraju, Durability of ambient cured alumina silicate concrete based on slag/fly ash blends against sulfate environment. Construction and Building Materials, 204, 70–83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.153>.

- [77] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, T. Özturan, H.Ö. Öz and D.S. Asaad, Permeation characteristics of self compacting concrete made with partially substitution of natural aggregates with rounded lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 59, 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.031>.
- [78] S.A. Omer, R. Demirboga, W.H. Khushefati, Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, 189–195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.006>.
- [79] P. Nath and P.K. Sarker, Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymers concrete cured in ambient temperature. *Materials and Structures*, 50 (32), 2016. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/15620>.
- [80] M.E. Gülşan, R. Alzebaree, A.A. Rasheed, A. Niş and A.E. Kurtoğlu, Development of fly ash/slag based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica and steel fiber. *Construction and Building Materials*, 211, 271–283, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.228>.
- [81] M. Sitarz, I. Hager and M. Choinska, Evolution of mechanical properties with time of fly-ash-based geopolymer mortars under the effect of granulated ground blast furnace slag addition. *Energies*, 13(1135), 2020. <https://doi.org/10.3390/en13051135>
- [82] H. Alanazi, J. Hu and Y.R. Kim, Effect of slag, silica fume, and metakaolin on properties and performance of alkali-activated fly ash cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 197, 747–756, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.172>.
- [83] X. Guo and X. Pan, Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633–664, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.198>.
- [84] N. Ismail, H. El-hassan and M. Asce, Development and characterization of fly ash – slag blended geopolymer mortar and lightweight concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30, 1–14, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002209](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002209).
- [85] M. Sitarz, M. Urban and I. Hager, Rheology and mechanical properties of fly ashbased geopolymer mortars with ground granulated blast furnace slag addition. *Energies*, 13 (10), 2639, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13102639>.
- [86] N.M. Altwair, M.M. Johari and S.S. Hashim, Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 37, 518–525, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.003>.
- [87] M. Şahmaran, H.E. Yücel, S. Demirhan, M.T. Arik and V.C. Li, Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109 (6), 627–638, 2012.
- [88] M. Şahmaran, M. Lachemi, K.M. Hossain, R. Ranade and V.C. Li, Influence of aggregate type and size on ductility and mechanical properties of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 106 (3), 308–316, 2009. <https://aperta.ulakbim.gov.tr/record/42333>.
- [89] S.M. Mustakim, S.K. Das, J. Mishra, A. Aftab, T.S. Alomayri, H.S. Assaedi and C.R. Kaze, Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash- blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica. *Silicon*, 13, 2415–2428, 2021.
- [90] S. Luhar, S. Chaudhary and I. Luhar, Thermal resistance of fly ash based rubberized geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 19, 420–428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.025>.
- [91] H.Ö. Öz, H.E. Yücel, M. Güneş and T.Ş. Köker, Fly-ash-based geopolymer composites incorporating cold-bonded lightweight fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 272, 121963, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121963>.
- [92] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N.P. Rajamane and R. Jose, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 499, 117–130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>
- [93] V.K.J. Bohra, R. Nerella, S.R.C. Madduru and P. Rohith, Microstructural characterization of fly ash based geopolymers. *Materials Transactions*, 2020.
- [94] G.M. Kim, et al., Heavy metal leaching, CO₂ uptake & mechanical characteristics of carbonated porous concrete with alkali-activated slag & bottom ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9 (3), 283–294, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40069-015-0111-x>.
- [95] M. Ben Haha, B. Lothenbach, G. Le Saout and F. Winnefeld, Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag – Part I: Effect of MgO. *Cement and Concrete Research*, 41, 955–963, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.002>.
- [96] A. Gruskovnjak, B. Lothenbach, F. Winnefeld, B. Münch, R. Figi, S. Ko, M. Adler and U. Mäder, Quantification of hydration phases in supersulphated cements : review and new approaches. *Advances in Cement Research*, 23 (6), 265–275, 2011. <https://doi.org/10.1680/adcr.2011.23.6.265>.
- [97] E. Kanazaki, Thermal behavior of the hydrotalcite-like layered structure of Mg and Al-layered double hydroxides with interlayer carbonate by means of in situ powder HTXRD and DTA/TG. *Solid State Ionics*, 106 (3–4), 279–284, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00494-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00494-3).
- [98] K. Rozov, U. Berner, C. Taviot-Gueho, F. Leroux, G. Renaudin, D. Kulik and L.W. Diamond, Synthesis and characterization of the LDH hydrotalcite–pyroaurite solid-solution series. *Cement and Concrete Research*,

- 40, 1248–1254, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.031>.
- [99] B. Lothenbach and A. Gruskovnjak, Hydration of alkali-activated slag: thermodynamic modelling. *Advances in Cement Research*, 19, 81–92, 2007. <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.19.2.81>.
- [100] E. Adesanya, K. Ohenoja, A. Di Maria, P. Kinnunen and M. Illikainen, Alternative alkali-activator from steel making waste for one-part alkali-activated slag. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123020>.
- [101] P. Zhang and Q.-F. Li, Durability of high performance concrete composites containing silica fume. *Proceedings of the IMechE*, 227, 343–349, 2013. <https://doi.org/10.1177/1464420712460617>.
- [102] R.B. Barnes, Infrared spectra and organic chemistry. *Review of Scientific Instruments*, 7, 265–271, 1936. <https://doi.org/10.1063/1.1752148>.
- [103] W.K.W. Lee and J.S.J. van Deventer, Use of infrared spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *American Chemical Society*, 19 (21), 8726–8734, 2003. <https://doi.org/10.1021/la026127e>.
- [104] P.I.K. Onorato, M.N. Alexander, C.W. Struck, G.W. Tasker and D.R. Uhlmann, Bridging and non bridging oxygen-atoms in alkali aluminosilicate glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 68, 148–150, 1985. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15223.x>.
- [105] T. Takei, K. Kato, A. Meguro and M. Chikazawa, Infrared spectra of geminal and novel triple hydroxyl groups on silica surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 150, 77–84, 1999.
- [106] A. Palomo, M.W. Grutzeck and M.T., Blanco Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1323–1329, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9).
- [107] D. Ren, C. Yan, P. Duan, Z. Zhang, L. Li and Z. Yan, Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*, 134, 56–66, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.103>.
- [108] J. Xiang, L. Liu, Y. He, N. Zhang and X. Cui, Early mechanical properties and microstructural evolution of slag/metakaolin-based geopolymers exposed to karst water. *Cement and Concrete Composites*, 99, 140–150, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.009>.
- [109] C.A. Rosas-Casarez, S.P. Arredondo-Rea, A. Cruz-Enríquez, R. Corral-Higuera, M.J. Pellegrini-Cervantes, J.M. Gómez-Soberón and T.J. Medina-Serna, Influence of size reduction of fly ash particles by grinding on the chemical properties of geopolymers. *Applied Sciences*, 8 (365), 2018.
- [110] F. Puartes, M. Palacios and T. Vazquez, Carbonation process of alkali-activated slag mortars. *Journal Material Science*, 41, 3071–3082, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-005-1821-2>.
- [111] E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, A. Różycka and Ł. Gołek, Incorporation of Al in C-A-S-H gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis. *Construction and Building Materials*, 155, 643–653, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.091>.
- [112] Y.Y. Ge, X.M. Cui, Y. Kong, Z.L. Li, He, Y. and Q.Q. Zhou, Porous geopolymeric spheres for removal of Cu(II) from aqueous solution: synthesis and evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 283, 244–251, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.038>.
- [113] M. Palacios and F. Puartes, Effect of carbonation on alkali-activated slag paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 89 (10), 3211–3221, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01214.x>.
- [114] V.F. Barbosa, K.J. MacKenzie and C. Thaumaturgo, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. *International Journal of Inorganic Materials*, 2 (4), 309–317, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6).
- [115] W. Mozgawa and J. Deja, Spectroscopic studies of alkaline activated slag geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 924–926 (30), 434–441, 2009.
- [116] P. Yu, R.J. Kirkpatrick, B. Poe, P.F. McMillan and X.D. Cong, Structure of calcium silicate hydrate (C-S-H): near-, mid-, and far-infrared spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, 82 (3), 742–748, 1999.
- [117] N. Li, N. Farzadnia and C.J. Shi, Microstructural changes in alkali-activated slag mortars induced by accelerated carbonation. *Cement and Concrete Research*, 100 (9), 214–226, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.008>.





Farklı performans metriklerinin buharlaşma modellenmesi üzerindeki etkisinin incelenmesi

Investigation of the effect of different performance metrics on evaporation modeling

Volkan Yılmaz* 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya Türkiye +905327881182

Öz

Bu çalışmada Yapay Arı Kolonisi (YAK) optimizasyon algoritması ile Anamur meteoroloji istasyonu verileri kullanarak aylık toplam açık yüzey buharlaşması modellenmiştir. Çalışmalarda Determinasyon Katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe Etkinlik katsayısı (NSE), Ortalama Kareysel Hata (Mean Squared Error, MSE) ve Yanlılık Yüzdesi (Percent Bias, PBIAS) metrikleri kullanılarak; R^2 ve NSE maksimizasyonu ile MSE, MSE/ R^2 , MSE/+NSE ve PBIAS minimizasyonu uygulanarak seçilen performans metriklerinin sonucu ne derecede etkilediği araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda öncelikle YAK algoritmasıyla başarılı buharlaşma modellerinin oluşturulabileceği görülmüş olup, seçilen performans metriklerinin sonucu önemli derecede etkilediği çıktısı elde edilmiştir. Kullanılan amaç fonksiyonları içerisinde R^2 maksimizasyonu ile elde edilen modellerde düşük tahmin/yüksek tahmin probleminin meydana geldiği ve PBIAS minimizasyonunun ise oldukça başarısız modeller ürettiği görülmüş olup en başarılı modellerin MSE/+NSE amaç fonksiyonu ile elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu alanda literatürde daha önce uygulanmamış olan MSE/+NSE metriğinin başarılı sonuçlar elde ettiğinin gösterilmiş olması mevcut çalışmanın ana çıktısı olarak kabul edilmekte ve bu durumun çalışmanın yenilikçi kısmını oluşturduğu düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Buharlaşma, Optimizasyon, Performans metrikleri, Yapay arı kolonisi

1 Giriş

Temel anlamda sıvı halde bulunan su moleküllerinin enerjisinin artmasıyla birlikte gaz fazına geçmeleri buharlaşma olarak tanımlanmaktadır. Biriktirme haznelerinin kapasitelerinin belirlenmesinde, havza verimlilik hesaplamalarında ve tarımsal su tüketiminde dikkate alınan en önemli fenomenlerden birisi olan buharlaşma aynı zamanda zemin ile atmosfer arasındaki ısı akışını sağlayan ana parametredir [1]. Zemin özellikleri, meteorolojik değişkenler, bitki deseni ve benzeri ana değişkenlerin yanında birçok farklı parametre tarafından yüksek derecede etkilenen buharlaşma olgusunun, su çevrimi içerisindeki diğer parametrelere kıyasla tahmin

Abstract

In this study, monthly total open surface evaporation was modeled using Anamur meteorological station data with Artificial Bee Colony (ABC) optimization algorithm. Coefficient of Determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient, Mean Squared Error (MSE) and Percent Bias (PBIAS) metrics were used in the studies. With the help of these metrics, R^2 and NSE maximization and MSE MSE/ R^2 MSE/+NSE and PBIAS minimization were applied and how the selected performance metrics affected the result was investigated. Among the objective functions used, it has been seen that the models obtained by R^2 maximization have underestimation/overestimation problem and PBIAS minimization produces very unsuccessful models, and it has been concluded that the most successful models are obtained with MSE/+NSE objective function. The fact that the MSE/+NSE metric, which has not been applied before in the literature in this field, has been shown to achieve successful results is accepted as the main output of the current study and it is thought that this situation constitutes the innovative part of the study.

Keywords: Artificial bee colony, Evaporation, Optimization, Performance metrics

edilmesi en zor ve en karmaşık değişken olduğu ifade edilmiştir [2].

Su kaynaklarının korunması alanında yapılan hesaplamalar büyük oranda buharlaşma olgusunu da içinde barındırmaktadır. Büyük biriktirme haznelerinden her yıl milyonlarca metreküp temiz su buharlaşma yoluyla atmosfere karışmakta [3] ve yüksek maliyetler harcanarak derlenen bu suların etkin bir şekilde yararlanma imkânı giderek azalmaktadır. Diğer taraftan su kaynaklarının büyük bir kısmının harcandığı tarımsal sulama alanında buharlaşma fenomeni oldukça önemli bir değişken olarak denkleme girmektedir, toplam buharlaşma miktarının bir göstergesi olan evapotranspirasyon kayıpları sulama suyu ihtiyacını belirleyen en temel parametrelere birisidir. Sınırlı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, vyilmaz@ktun.edu.tr (V. Yılmaz)

Geliş / Received: 17.11.2022 Kabul / Accepted: 03.02.2023 Yayımlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1206278

durumda bulunan su kaynaklarımız giderek artan nüfus ile birlikte incelendiğinde su kaynaklarının korunması başlığının her geçen gün daha da önemli hale geldiği görülebilir. Bu yüzden buharlaşma gibi olguların daha detaylı incelenmesi ile daha başarılı modelleme ve tahminler yapılarak temiz suya erişimin sürdürülebilir bir şekilde devamlılığı sağlanabilir.

Doğada gerçekleşen buharlaşmanın tam olarak ölçümü için temelde dolaylı ve direkt yöntemler olmak üzere iki farklı yaklaşım uygulanır [4]. Direkt yöntemlerde buharlaşma tavaşı adı verilen serbest yüzeyli kaplarda meydana gelen buharlaşma miktarları ölçülür, bunların arasında en bilindik olanı A sınıfı buharlaşma tavaşıdır [3]. Dolaylı yöntemlerde ise buharlaşmayı etkileyen parametreler kullanılarak Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Blaney–Criddle eşitlikleri gibi matematiksel modeller kullanılır [5]. Fakat buharlaşma olgusunun çok farklı parametre tarafından etkileniyor olması ve karmaşıklığının yanında modern modelleme ve tahmin yöntemlerinde meydana gelen gelişmelere paralel olarak araştırmacıların zaman içerisinde başta yapay zekâ yöntemleri olmak üzere zaman serileri ve optimizasyon algoritmaları gibi gelişmiş uygulamalara yönelmiş oldukları görülmektedir.

Literatürde bu alanda yapılmış olan çalışmalara bakıldığında ilk zamanlarda Lineer/Nonlineer regresyon yöntemlerinin [6] ve devamında başta Yapay Sinir Ağları [7,8] olmak üzere Destek Vektör Makinaları [4,9] ve Bulanık Mantık [10,11] gibi yapay zekâ yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda optimizasyon algoritmalarının farklı problemlerde başarılı çözümlere ulaşabilmiş olmaları sebebiyle başta doğadaki canlıların davranışlarından esinlenerek ortaya atılan Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları olmak üzere farklı optimizasyon tekniklerinin de buharlaşma olgusunun modellenmesi ve tahmininde kullanılmış olduğu görülmektedir [12-16].

Mevcut çalışma ise bu noktada literatüre bir katkı sağlamak amacıyla kurgulanmıştır. Optimizasyon algoritmalarıyla buharlaşma modellenmesi yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde genel olarak yöntemlerin başarılarının birbirleriyle ya da diğer yapay zekâ teknikleriyle kıyaslandığı görülmektedir. Bu noktada optimizasyon algoritmalarının başarısını yüksek düzeyde etkileyen performans metrikleri üzerine yapılmış bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Zira optimizasyon algoritmaları genel olarak kullandıkları amaç fonksiyonu doğrultusunda en iyiyi bulmaya yönelik olarak tasarlanan tekniklerdir ve amaç fonksiyonunun tercihi model başarısını doğrudan ilgilendirmektedir. Bu açıdan mevcut çalışmada R^2 , NSE, MSE ve PBIAS metrikleri kullanılarak sırasıyla R^2 ve NSE maksimizasyonu ve MSE, MSE/R^2 , $MSE/+NSE$ ve PBIAS minimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda son zamanlarda birçok problemde başarılı sonuçlara ulaşan YAK optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Elde edilen veriler istatistiksel göstergeler yardımıyla sayısal olarak, zaman serisi grafikleri ve Taylor diyagramlarıyla da görsel olarak incelenmiştir. Ulaşılan sonuçlardan yola çıkarak

kullanılan amaç fonksiyonlarının buharlaşma modellemesini ne derecede etkilediği araştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Çalışma için kullanılan veriler Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne bağlı 17320 numaralı Anamur meteoroloji gözlem istasyonundan ($37^{\circ}04'K$ $32^{\circ}05'1'D$) alınmıştır. İlgili meteoroloji istasyonunun Türkiye üzerindeki konumu aşağıda Şekil 1'de gösterilmiştir. Buharlaşma ile ilgili yapılan çalışmalarda özellikle sert karasal iklimin hâkim olduğu bölgelerde kış mevsimlerinde buharlaşma kabındaki suyun donması sebebiyle ölçüm yapılamadığı ifade edilmektedir [3]. Bu sebeple daha ılıman olan Akdeniz ikliminin hâkim olduğu bu bölge çalışma için tercih edilmiştir. Çalışmada 2004-2019 yılları arasında ait aylık veriler kullanılmıştır. Kullanılan meteorolojik parametrelere ait tanımlayıcı ve istatistiksel bilgiler Tablo 1'de ve çalışma bölgesinde ölçülmüş buharlaşma değerlerine ait zaman serisi grafiği ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1'de gösterilen bilgiler incelendiğinde öncelikle TS ve S parametrelerinin B ile yüksek düzeyde ilişki içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 2'deki zaman serisi grafiğinde de B değerlerinin sıcaklık değişimine benzer bir dağılım sergilediği ve daha çok mevsimsel etkilerin etkisi altında olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan 16 yıllık zaman diliminde ölçülen minimum B değerinin 42mm olması daha önce ifade edilen buharlaşma kabındaki suyun donmasından dolayı ölçüm yapılamaması probleminin meydana gelmemiş olduğunu göstermektedir. Çarpıklık ve Basıklık değerleri için Bulmer [17]'in ± 1 aralığını, Tabachnick ve Fidell [18]'in ise ± 1.5 aralığını normal dağılım bölgesi olarak önerdiği dikkate alınacak olursa özellikle Y parametresinin yüksek değerler üreterek diğer parametrelere kıyasla normal dağılımdan daha uzak bir davranış sergilediği de görülmüştür.

2.2 YAK optimizasyon algoritması

İlk kez Karaboğa [19] tarafından literatüre kazandırılmış olan YAK optimizasyon algoritması arıların doğadaki yiyecek arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş olan bir Metasezgisel Optimizasyon Algoritmasıdır. Nümerik problemlerde başarılı sonuçlar üreten YAK optimizasyon algoritması [20] daha sonraları birçok mühendislik problemlerine de uyarlanmış ve başarılı sonuçların elde edildiği görülmüştür [21-23].

YAK yöntemi temelde İşçi arı, Gözcü arı ve Kâşif arı fazı olmak üzere üç ayrı faz şeklinde çalışmaktadır. Algoritmada çözüme başlanırken öncelikle rastgele başlangıç noktaları Denklem (1) yardımıyla belirlenir. Burada FN (FoodNumber) besin kaynağı sayısı, D ise optimize edilecek parametre sayısıdır. x_j^{min} ve x_j^{max} ise arama uzayının alt ve üst limitini ifade eder.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (1)$$

$i = 1, \dots, FN; j = 1, \dots, D$

Tablo 1. Çalışmada kullanılan meteorolojik verilere ait tanımlayıcı ve istatistiki bilgiler

Parametre	Kısaltma	Minimum	Ortalama	Maksimum	Std. Sapma	Çarpıklık	Basıklık	B ile Korelasyon
Ortalama 10 cm Toprak Sıcaklığı (°C)	TS	8.80	22.88	36.60	8.52	0.03	-1.44	0.91
Ortalama Nispi Nem (%)	NV	42.70	65.95	86.00	8.42	0.09	-0.24	0.04
Ortalama Rüzgâr Hızı (m/sn)	RH	1.20	2.15	3.00	0.38	0.06	-0.66	-0.06
Ortalama Sıcaklık (°C)	S	10.40	20.21	30.70	6.17	0.10	-1.38	0.87
Toplam Yağış (mm)	Y	0.00	76.75	545.20	100.62	1.85	3.78	-0.68
Toplam Açık Yüzeysel Buharlaşması (mm)	B	42.00	128.11	253.30	55.14	0.44	-0.91	1.00

Probleme ait rastgele çözüm noktalarını ifade eden başlangıç noktalarına ait Z amaç fonksiyonu (Denklem (6-11)) ve fitness (uygunluk) değerleri (Denklem (2)) hesaplanır ve en başarılı sonucu veren kaynak ve bu kaynağa ait sonuç değeri ortak hafızaya kaydedilir. Denklem (2)'de görülen f_i değerleri amaç fonksiyonu ile üretilen sonuçlardır. Bu aşamadan sonra kovandan ayrılarak rastgele besin yeri arayan arılar artık işçi arı haline gelmiş olurlar, bu aşamadan sonra artık işçi arı fazi başlar. Bu fazda işçi arılar daha önce rastgele bir şekilde elde edilen besin yerlerinin komşuluğunda Denklem (3)'ü kullanarak daha kaliteli besin yerleri yani çözüm kümeleri aramaya başlarlar.

$$fitness_i = \begin{cases} 1/(1 + f_i) & f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3)$$

Bu fazda işçi arılar x_{ij} komşuluğunda v_{ij} kaynağını aramaya başlarlar. Denklem (3)'de j , $[1,D]$ aralığında üretilmiş bir tamsayıdır, ϕ_{ij} ise $[-1,+1]$ aralığında rastgele değerler alır. Yine Denklem (3)'deki k ifadesi rastgele belirlenen komşu çözümü ifade etmektedir. İşçi arı fazının sonunda Denklem (3) yardımıyla yapılan konum güncellemeleri tamamlandıktan sonra elde edilen yeni besin noktalarına ait amaç fonksiyonu ve fitness değerleri hesaplanır, daha iyi çözüm noktaları elde edildiyse bu noktalar eskisinin yerine kaydedilir. Herhangi bir kaynak için daha kaliteli yeni bir kaynak bulunamadıysa ilgili besin kaynağının yani çözüm kümesinin sayaç değeri bir arttırılır. Bu aşamadan sonra Gözcü arı fazi başlar

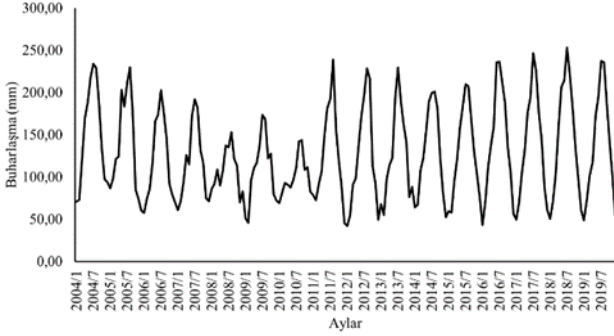
Gözcü arı fazında her bir kaynak için Denklem (4) yardımıyla olasılık değerleri hesaplanır ve $[0,1]$ aralığında rastgele bir sayı üretilir. Herhangi bir kaynak için hesaplanan olasılık (p_i) değeri, üretilen bu sayıdan büyükse gözcü arı Denklem (3)'ü kullanarak bu kaynak bölgesi etrafında yeni bir çözüm üretir. İşçi arı fazının sonunda olduğu gibi bu fazdan sonra da sayaç mekanizması çalışır ve elde edilen daha kaliteli besin yerleri eskisinin yerine kaydedilir.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{FN} fitness_i} \quad (4)$$



Şekil 1. MGM 17320 numaralı Anamur meteoroloji gözlem istasyonunun konumu

Daha önce açıklanan sayaç mekanizması eğer önceden belirlenen bir limit değerini aşarsa Kâşif arı fazi başlar ve ilgili noktadaki besinin tükenmiş olduğu anlaşılır, bu durumda yeni bir kâşif arı kovandan ayrılarak Denklem (1) doğrultusunda yeni bir kaynak arayışına başlar. Kâşif arıların kullanımında gerekli olan limit değeri için genel olarak FNxD değeri önerilmektedir [20]. Belirli bir sonuç değerine ulaşıldığından ya da belirli bir iterasyon sayısı tamamlandığında işlemler durdurulur.



Şekil 2. Çalışma bölgesi için B'ye ait aylık zaman serisi grafiği

2.3 Model yapısı

Mevcut çalışmada gözlenen B değerleri y_g ve YAK optimizasyon algoritması ile üretilmiş modeller ile elde edilen B değerleri y_m ile ifade edilecek olursa, model yapısı aşağıda Denklem (5)'te gösterildiği şekilde kurulmuştur.

$$y_m = \beta_1 x_{TS} + \beta_2 x_{NN} + \beta_3 x_{RH} + \beta_4 x_S + \beta_5 x_Y \quad (5)$$

Denklem (5)'te gösterilen y_m modelleri için YAK optimizasyon algoritması yardımıyla en uygun β değerlerinin $[x_j^{\min}, x_j^{\max}]$ aralığında bulunması amaçlanmaktadır. Arama işleminde YAK yönteminin ihtiyaç duyduğu Z amaç fonksiyonu aşağıda gösterildiği gibi 6 farklı şekilde oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan ilk amaç fonksiyonu (Z_1) literatürde yaygın bir şekilde kullanılan Determinasyon Katsayısıdır (R^2), Denklem (6)'da gösterilen R^2 değeri model sonucu üretilmiş olan değerler ile gözlenen değerler arasındaki ilişkinin incelenmesini sağlayan bir metrik olup $[0;1]$ aralığında değerler alır. R^2 değerinin 1'e yaklaşması her iki veri seti arasındaki ilişkinin kuvvetlendiğini gösterirken genel olarak bu değer 0.5 'in üzerine çıkması kabul edilebilir bir çözüm için yeterli görülmüştür [24]. Denklem (6-8)'deki k değerleri veri sayıdır.

$$Z_1 = R^2(y_g, y_m) = \frac{[\sum(y_g y_m) - (\sum y_g)(\sum y_m)/k]^2}{(\sum y_g^2 - \frac{(\sum y_g)^2}{k}) \cdot (\sum y_m^2 - \frac{(\sum y_m)^2}{k})} \quad (6)$$

Çalışmada kullanılan ikinci amaç fonksiyonu (Z_2) Nash-Sutcliffe Etkinlik (NSE) Katsayısıdır [25]. Denklem (7)'de gösterilen NSE metriği $[-\infty; 1]$ aralığında değerler alır. Burada NSE için 0 ve 1 aralığındaki değerler genellikle kabul edilebilir bir performans göstergesi olarak görülürken [26] NSE'nin 1 olması mükemmel uyum olduğu anlamına gelir.

$$Z_2 = NSE(y_g, y_m) = 1 - \frac{\sum(y_g - y_m)^2}{[\sum(y_g - \frac{\sum y_g}{k})^2]} \quad (7)$$

Çalışmada kullanılan bir diğer amaç fonksiyonu (Z_3) Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error, MSE)

metriğidir. Denklem (8)'de gösterilen MSE metriği gözlenen verilerle model sonucu elde edilen veriler arasındaki hataların karelerinin ortalamasıdır. Verilerin özelliğine göre değişebilen MSE metriği küçüldükçe hata değerlerinin azaldığı, büyüldükçe ise arttığı kabul edilir.

$$Z_3 = MSE(y_g, y_m) = \frac{1}{k} \cdot \sum (y_g - y_m)^2 \quad (8)$$

Çalışmada kullanılan bir sonraki amaç fonksiyonu (Z_4), Denklem (9)'da gösterilen MSE/ R^2 metriğidir. Burada Z_4 amaç fonksiyonunun minimize edilmesiyle düşük MSE ve yüksek R^2 değerlerinin elde edilebilmesi amaçlanır. Bu sayede daha az hata değeri ile daha yüksek ilişki yapısı gösteren modellerin üretilmesi hedeflenmektedir.

$$Z_4 = \frac{MSE(y_g, y_m)}{R^2(y_g, y_m)} \quad (9)$$

Çalışmada kullanılan 5. amaç fonksiyonu (Z_5) MSE/+NSE'dir. Burada Denklem (10)'da gösterildiği şekilde NSE değerinin pozitif çıkması durumunda elde edilen NSE değeri kullanılır. $NSE \leq 0$ durumu meydana gelmişse NSE değeri 1×10^{-11} gibi oldukça düşük bir değer olarak kabul edilir. Bu sayede MSE/+NSE değeri şiddetli bir şekilde artırılmış olur. Optimizasyon algoritması minimizasyon yapacak şekilde tasarlandığında bu yolla NSE'nin negatif değer ürettiği çözümler elimine edilmiş olmaktadır.

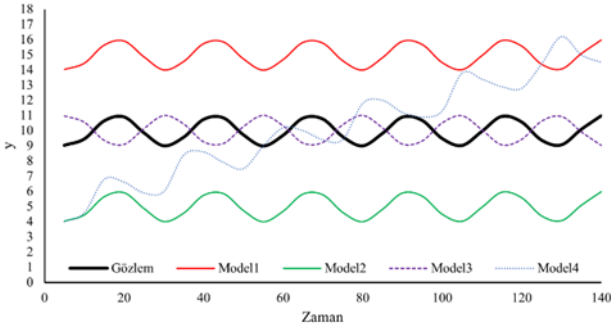
$$Z_5 = \frac{MSE(y_g, y_m)}{+NSE(y_g, y_m)} \begin{cases} +NSE = NSE & NSE > 0 \\ +NSE = 1 \times 10^{-11} & NSE \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Çalışmada kullanılan son amaç fonksiyonu (Z_6) Yanlılık Yüzdesi (PBIAS)'dir [27]. Denklem (11)'de gösterilen PBIAS değerinin mutlak değerce 0'a yakın olması amaçlanır. Bu değer negatif çıkması model sonucu elde edilen değerlerin gözlenmiş değerlerden yüksek olduğu, tersi ise düşük olduğunu gösterir.

$$Z_6 = PBIAS(y_g, y_m) = \left[\frac{\sum(y_g - y_m) \cdot 100}{\sum y_g} \right] \quad (11)$$

Bütün optimizasyon algoritmaları gibi YAK yöntemi de amaç fonksiyonlarını kullanarak bulduğu sonuçları iyileştirmeye çalışır. Dolayısıyla mevcut çalışmada kullanılan Z_1 (R^2) ve Z_2 (NSE) amaç fonksiyonları maksimize edildiğinde; Z_3 (MSE), Z_4 (MSE/ R^2), Z_5 (MSE/+NSE) ve Z_6 (PBIAS) amaç fonksiyonları ise minimize edildiğinde daha başarılı sonuçların elde edilmesi beklenir. Fakat, bazı durumlarda performans metrikleri kullanıcıları yanıltıcı yorumlara götürebilir. Örnek olarak aşağıda Şekil 3'te rastgele değerlerle oluşturulmuş gözlem verilerine karşılık yine rastgele üretilmiş 4 farklı modele ait zaman serisi grafiği gösterilmiştir. Şekil 3'te verilen modellere ait hesaplanan performans metrikleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 3 ve Tablo 2 birlikte incelendiğinde en

dikkat çekici sonuç Model3'te gözlemlenmiştir. Bütün performans metriklerine göre en başarılı sonuca her ne kadar Model3 ulaşmış olsa da Şekil 3'teki zaman serisi grafiğinde görüldüğü gibi Model3 gözlenen verileri yakalamada başarılı olamamıştır. Diğer taraftan her ne kadar Model1 ve Model2'ye ait R^2 değerleri 1 olarak elde edilmiş olsa da Model1'de yüksek tahmin (overestimation) ve Model2'de ise düşük tahmin (underestimation) meydana gelmiş ve gözlenen verilere kıyasla yüksek hata değerleri elde edilmiştir. PBIAS değerlerinden de bu durum açıkça anlaşılmaktadır. Model4 ise Model1 ve Model2'ye kıyasla oldukça başarılı bir PBIAS değeri elde etmiş olsa da çok düşük bir R^2 değeri ile oldukça başarısız bir modelleme gerçekleştirmiştir.



Şekil 3. Farklı modellere ait zaman serisi grafikleri

Optimizasyon algoritmaları her ne kadar farklı şekillerde tasarlanıyor olsalar da kullanıcının gösterdiği hedef doğrultusunda en iyiyi bulmaya yönelik çalışan yöntemlerdir. Dolayısıyla performans metriklerinin doğru seçimi verilen örnekte olduğu gibi yüksek derecede önem arz etmektedir.

Tablo 2. Şekil 3'te gösterilen modellere ait performans metrikleri

Model	R^2	NSE	MSE	PBIAS
1	1,0000	-47,45	25,00	-50,06
2	1,0000	-47,45	25,00	50,06
3	1,0000	-3,00	2,06	-0,22
4	0,0022	-19,88	10,77	-1,73

3 Bulgular ve tartışma

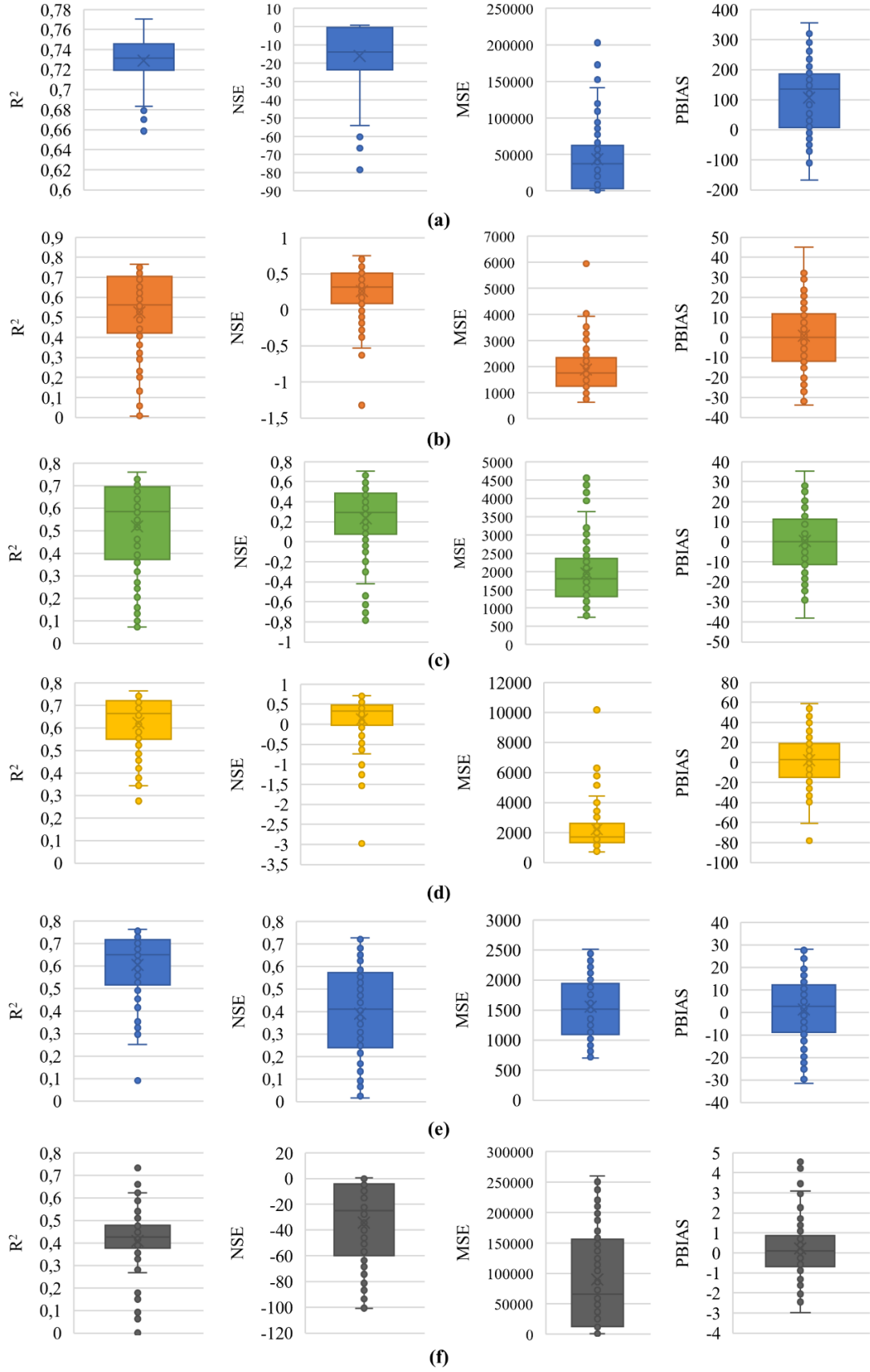
Farklı performans metriklerinin B modellemesindeki başarısının araştırıldığı bu çalışmada, YAK optimizasyon algoritması yardımıyla Anamur'da bulunan 17320 numaralı meteoroloji gözlem istasyonundan elde edilen veriler kullanılarak B modellemesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda Denklem (5)'te gösterildiği şekilde B modelleri lineer bir biçimde kurulmuştur. Verilerin eğitime ve test gruplarına ayrılmasıyla ilgili literatürde kesin bir kural mevcut olmamakla birlikte genellikle verilerin %70-90'lık kısmı eğitime için kullanılmaktadır [28]. Bu doğrultuda eğitime-test grubu olarak %70-%30 ağırlığının yıl sayısı

bakımından sağlanması amacıyla toplam 16 yıllık veri setinin 2004-2015 yılları arasını kapsayan 11 yıllık kısmı eğitime aşamasında, kalan kısmı ise test aşamasında kullanılmıştır. Bu doğrultuda toplamda 192 adet aylık verinin ilk 132 aylık kısmı (%68) eğitime grubunu kalan 60 aylık kısmı (%32) ise test grubunu oluşturmaktadır.

YAK optimizasyon algoritmasında arı sayısı 8 olarak belirlenerek problem 5 boyutlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Arama uzayının alt ve üst limiti $[x_j^{\min}; x_j^{\max}] [-5; +5]$ olarak seçilmiştir. Denklem (6-11)'de gösterilen amaç fonksiyonlarının performansı ne derecede etkilediğinin daha açık bir şekilde gözlemlenebilmesi amacıyla her bir amaç fonksiyonu için YAK yöntemi 100 kere çalıştırılmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Çalışmalardan her biri 2000 iterasyondan oluşmaktadır. Denklem (6) ve Denklem (7)'de gösterilen R^2 ve NSE değerleri için maksimizasyon, Denklem (8), Denklem (9), Denklem (10) ve Denklem (11)'de gösterilen MSE, MSE/R^2 , $MSE/+NSE$ ve $|PBIAS|$ değerleri için ise minimizasyon uygulanmıştır. Her bir amaç fonksiyonu için üretilmiş 100'er adet modele ait eğitime grubu performans değerleri kutu grafiği şeklinde Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te verilen bütün kutu grafikler için minimum değer (M), 1. Çeyreklik değeri (1Ç), Medyan değeri (Med), Ortalama değeri (Ort), 3. Çeyreklik değeri (3Ç) ve Maksimum değeri (Mak); R^2 , NSE, MSE ve PBIAS metriklerine göre belirlenerek her bir metriğe göre en başarılı sonucun elde edildiği toplamda 24 adet gösterge değeri oluşturulmuştur. Bu gösterge değerlerinin 10 adedinin (M NSE, 1Ç NSE, Med NSE, Ort NSE, 3Ç NSE, 1Ç MSE, Med NSE, Ort MSE, 3Ç MSE, Mak MSE) Z_5 ile, 8 adedinin (M R^2 , 1Ç R^2 , Med R^2 , Ort R^2 , 3Ç R^2 , Mak R^2 , Mak NSE, M MSE) Z_1 ile, 5 adedinin (M PBIAS, 1Ç PBIAS, Ort PBIAS, 3Ç PBIAS, Mak PBIAS) Z_6 ile ve sadece 1 adedinin (Med PBIAS) Z_3 ile elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Mevcut sonuçlardan yola çıkıldığında en başarılı çözümlerin genel olarak $MSE/+NSE$ minimizasyonu ile elde edildiği görülmektedir. $MSE/+NSE$ minimizasyonu (Z_5) ile elde edilen çözümlerin gerek MSE minimizasyonu (Z_3) ile gerekse de NSE maksimizasyonu (Z_2) ile elde edilen çözümlerden daha başarılı olduğu görülmüştür. Z_1 ve Z_6 amaç fonksiyonları ise kendi kriterlerine göre en başarılı çözümleri elde ederken diğer kriterlerde önemli derecede bir başarıya ulaşamamıştır, Z_1 'de en yüksek R^2 değerleri elde edilirken, Z_6 'da en başarılı PBIAS değerlerine ulaşılmıştır. Z_2 , Z_3 ve Z_4 amaç fonksiyonlarının ise genel olarak kayda değer bir başarıya ulaşamadıkları söylenebilir. Sonuç olarak genel bir performans değerlendirmesi yapılacak olursa; en başarılı çözümlerinin Z_5 ile elde edildiği, devamında Z_1 ve Z_6 'nın daha başarılı olduğu, Z_2 , Z_3 ve Z_4 'ün ise diğerlerine kıyasla daha başarısız olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

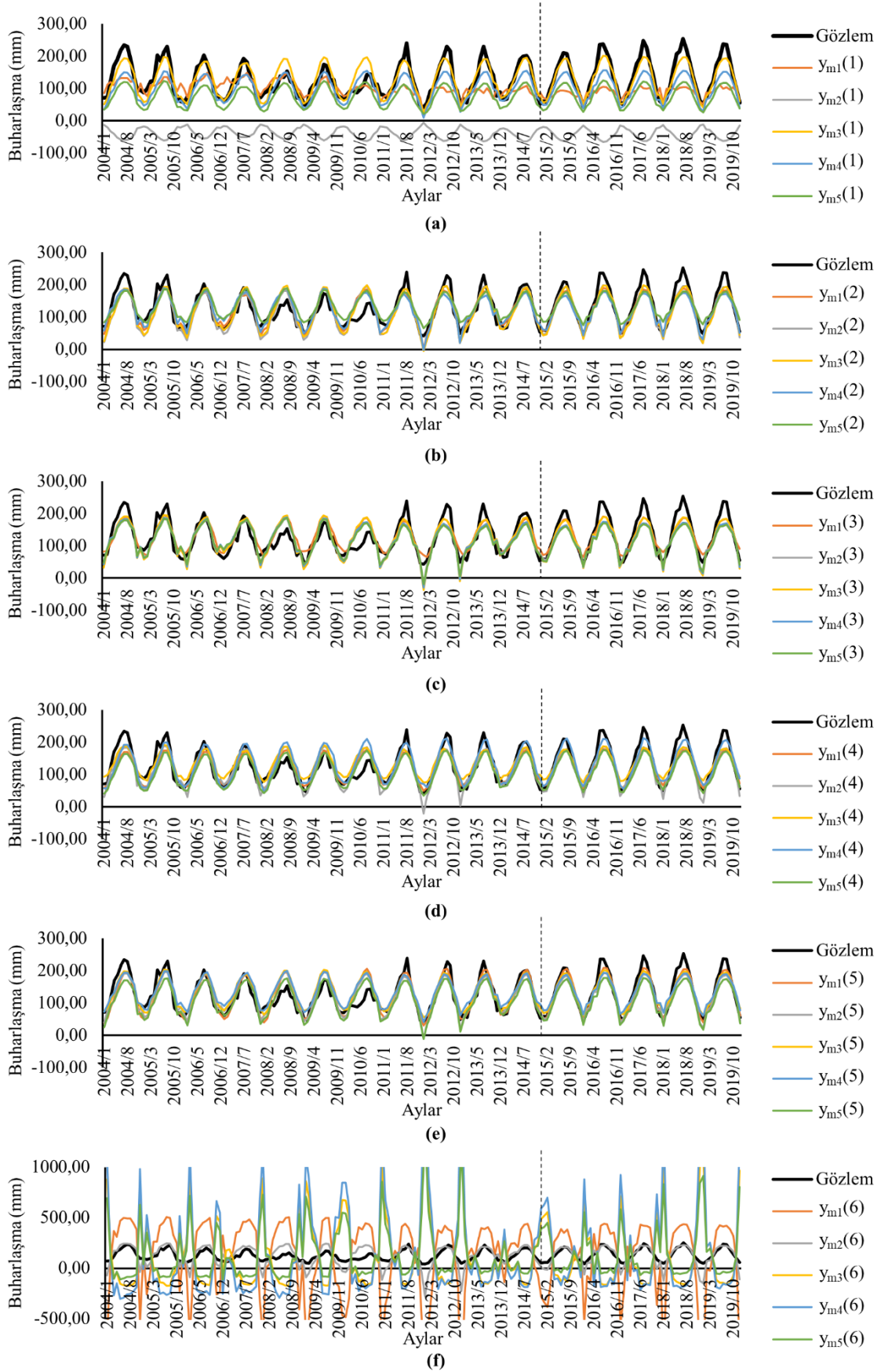
Bu aşamadan sonra sonuçların daha detaylı bir şekilde incelenmesi amacıyla her bir amaç fonksiyonu ile üretilen 100'er adet model en başarılıdan en başarısızına göre sıralanmış ve en başarılı olan ilk 5 model belirlenerek değerleri kaydedilmiştir. Her bir amaç fonksiyonu ile üretilmiş en başarılı ilk 5 modele ait performans bilgileri Tablo 3'te, zaman serisi grafikleri Şekil 5'te ve Taylor grafikleri ise Şekil 6'da gösterilmiştir.



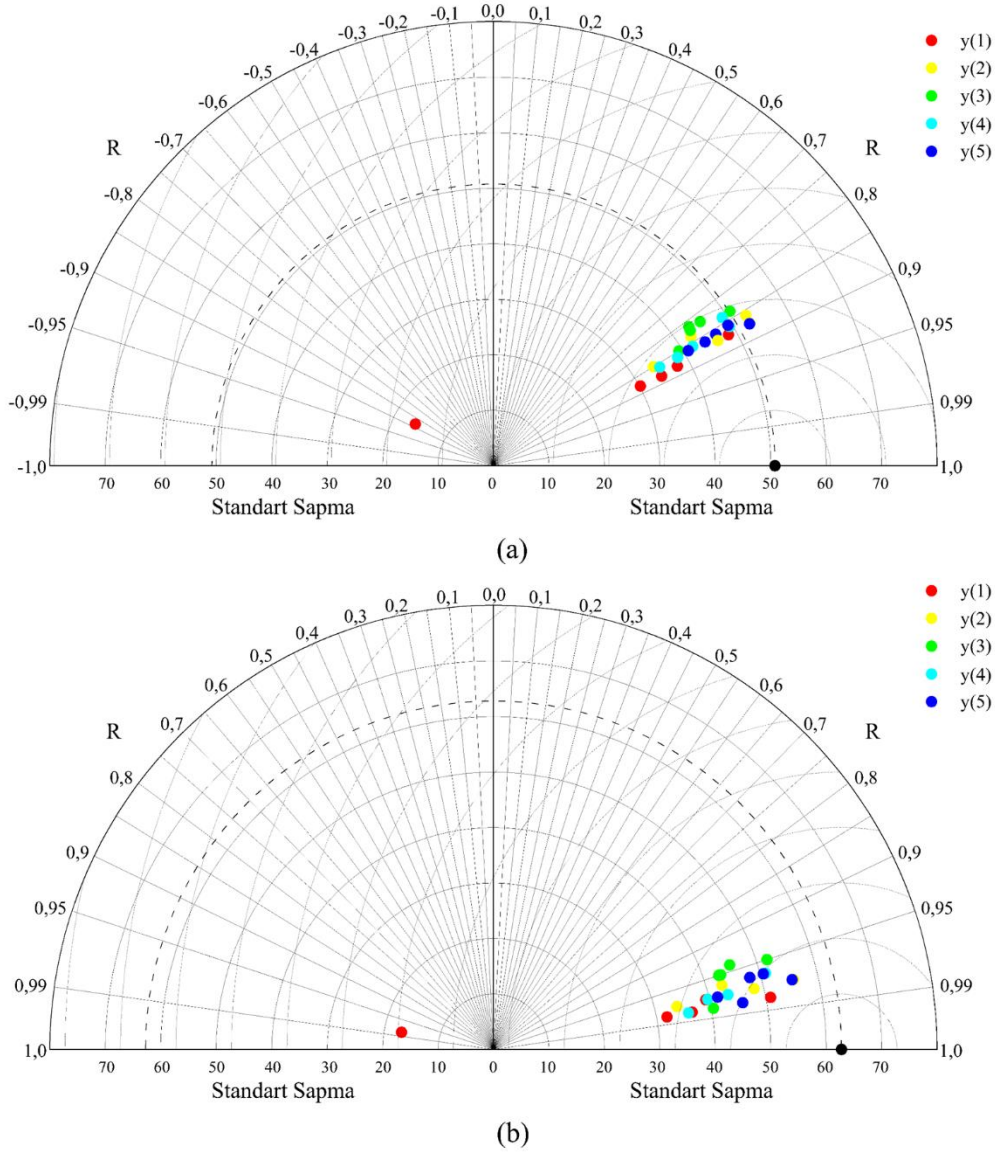
Şekil 4. Z₁ (a), Z₂ (b), Z₃ (c), Z₄ (d), Z₅ (e) ve Z₆ (f) ile üretilen modellerin eğitim performanslarına ait kutu grafikleri

Tablo 3. Çalışma sonucunda her bir amaç fonksiyon ile üretilen en başarılı ilk 5 modele ait performans bilgileri

	Eğitime				Test				
	R ²	NSE	MSE	PBIAS	R ²	NSE	MSE	PBIAS	
Z ₁	y _{m1} (1)	0.771	-0.348	3447.211	42.682	0.955	-0.181	4572.293	44.198
	y _{m2} (1)	0.769	-10.864	30339.118	131.354	0.956	-9.053	38928.866	129.928
	y _{m3} (1)	0.764	0.757	621.617	-0.652	0.956	0.900	385.423	7.376
	y _{m4} (1)	0.762	0.499	1281.131	20.383	0.944	0.462	2084.493	26.918
	y _{m5} (1)	0.761	-0.238	3165.976	39.453	0.962	-0.235	4781.669	44.061
	Ortalama	0.765	-2.039	7771.011	46.644	0.954	-1.621	10150.549	50.496
Z ₂	y _{m1} (2)	0.754	0.749	641.590	2.037	0.940	0.837	629.803	11.156
	y _{m2} (2)	0.765	0.708	746.099	6.983	0.942	0.866	520.658	11.759
	y _{m3} (2)	0.744	0.703	760.559	3.741	0.929	0.853	567.362	11.593
	y _{m4} (2)	0.702	0.702	762.949	0.212	0.918	0.746	983.445	13.797
	y _{m5} (2)	0.722	0.658	875.728	-7.282	0.936	0.739	1009.294	5.506
	Ortalama	0.737	0.704	757.385	1.138	0.933	0.808	742.112	10.762
Z ₃	y _{m1} (3)	0.726	0.706	751.481	-4.821	0.951	0.821	691.631	6.231
	y _{m2} (3)	0.696	0.690	792.418	3.157	0.897	0.701	1157.905	16.009
	y _{m3} (3)	0.712	0.687	801.663	0.501	0.900	0.813	726.029	12.049
	y _{m4} (3)	0.677	0.666	854.433	3.128	0.886	0.694	1183.053	16.883
	y _{m5} (3)	0.675	0.663	861.528	4.276	0.894	0.655	1334.091	18.371
	Ortalama	0.697	0.682	812.305	1.248	0.906	0.737	1018.542	13.909
Z ₄	y _{m1} (4)	0.744	0.720	715.212	4.708	0.944	0.742	998.742	13.134
	y _{m2} (4)	0.738	0.707	749.704	5.486	0.923	0.787	824.975	15.051
	y _{m3} (4)	0.741	0.675	831.929	-7.804	0.962	0.784	835.316	4.300
	y _{m4} (4)	0.713	0.683	810.785	-4.940	0.924	0.899	390.269	1.393
	y _{m5} (4)	0.745	0.652	889.321	12.414	0.940	0.691	1196.894	18.535
	Ortalama	0.736	0.687	799.390	1.973	0.939	0.781	849.239	10.482
Z ₅	y _{m1} (5)	0.755	0.726	700.441	0.251	0.948	0.922	300.183	5.753
	y _{m2} (5)	0.733	0.720	715.766	0.109	0.927	0.840	619.651	11.163
	y _{m3} (5)	0.742	0.704	757.864	-8.083	0.956	0.890	426.957	2.860
	y _{m4} (5)	0.741	0.681	815.584	-9.746	0.945	0.844	603.347	2.903
	y _{m5} (5)	0.743	0.674	832.848	10.573	0.923	0.713	1112.133	18.551
	Ortalama	0.743	0.701	764.500	-1.379	0.940	0.842	612.454	8.246
Z ₆	y _{m1} (6)	0.486	-45.037	117724.380	0.003	0.655	-25.052	100880.821	24.003
	y _{m2} (6)	0.587	-0.989	5085.065	0.006	0.772	0.116	3422.185	13.479
	y _{m3} (6)	0.467	-54.129	140974.110	-0.022	0.620	-36.834	146502.163	14.686
	y _{m4} (6)	0.390	-92.688	239578.005	-0.077	0.543	-58.153	229058.780	-7.610
	y _{m5} (6)	0.374	-33.893	89227.331	0.084	0.520	-21.913	88725.489	2.570
	Ortalama	0.461	-45.347	118517.778	-0.001	0.622	-28.367	113717.888	9.426



Şekil 5. Z_1 (a), Z_2 (b), Z_3 (c), Z_4 (d), Z_5 (e) ve Z_6 (f) ile üretilen en başarılı ilk 5 modele ait aylık zaman serisi grafikleri



Şekil 6. Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 ve Z_5 ile üretilen en başarılı ilk 5 modele ait eğitime (a) ve test (b) gruplarına ait Taylor grafikleri

Tablo 3'te gösterilen değerlerin birbirleri arasında kıyaslanabilmesi amacıyla ortalamaları alınarak bu değerlere göre yorumlamalara gidilmiştir. Ortalama değerlere bakıldığında eğitime grubunda Z_2 ve test grubunda ise Z_5 'in daha ön plana çıktığı görülmektedir. Eğitime grubunda Z_2 hem NSE hem de MSE metriklerinde daha başarılı sonuçlara ulaşırken test grubunda Z_5 NSE, MSE ve PBIAS metriklerinde daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Burada dikkat çeken başka bir durum ise Z_6 'nın belirgin bir şekilde başarısız olduğudur. PBIAS minimizasyonu ile gerçekleştirilen çözümlerinde en başarılı olarak kabul edilen ilk 5 model metrikleri bile oldukça düşük seviyede olarak çok zayıf bir performans sergilemiştir. Bu durum Şekil 5'te gösterilen zaman serisi grafiklerinde de açıkça görülmektedir. Z_6 ile elde edilen modeller her ne kadar çok düşük PBIAS değerleri üretmiş olsalar da gözlenmiş olan

değerlere kıyasla çok yüksek hata değerleri oluşturarak çok düşük seviyede ilişki yapısı sergilemişlerdir.

Şekil 5'teki zaman serisi grafikleri incelendiğinde ilk etapta Z_6 'nın başarısız olduğu ve Z_1 'in düşük tahmin değerleri ürettiği görülmektedir. Z_1 ile üretilen modellerin oluşturduğu tahmin değerlerinin çok büyük bir kısmı gözlenmiş verilerin altında kalmaktadır. Zaman serisi grafikleri Z_2 , Z_3 , Z_4 ve Z_5 için incelendiğinde genel olarak bir trendin yakalanmış olduğu ve gözlenmiş olan verilere tatmin edici bir şekilde yakın sonuçlar üretildiği söylenebilir. Elde edilen sonuçların yine farklı bir yolla incelenebilmesi için Şekil 6'da eğitime ve test gruplarına ait Taylor grafikleri verilmiştir. Bu aşamada özellikle Z_6 'nın gerek Tablo 3 gerekse de Şekil 5'te görüldüğü gibi oldukça başarısız modeller üretmesi sebebiyle Şekil 6'daki Taylor grafiklerinde kullanılmasına gerek duyulmamıştır.

Taylor grafikleri model sonucu elde edilen noktalar ile gözlenmiş noktalar arasındaki korelasyonun ve dağılım benzerliğinin görsel bir şekilde incelenmesine imkân sağlayan diyagramlardır. Şekil (6a)'da verilen Taylor grafiği incelendiğinde, genel olarak Z_1 'in düşük tahmin değerleri üretirken diğer amaç fonksiyonlarına kıyasla standart sapma çizgisinin daha altında gruplaştığı görülmektedir. Buna karşılık en başarılı çözümlerin genel anlamda Z_5 ile üretilmiş olduğu ifade edilebilir. Z_5 ile elde edilen modeller diğer amaç fonksiyonlarına benzer bir korelasyon davranışı sergilemesine karşılık daha belirgin bir şekilde standart sapma eğrisine daha yakın bölgelerde gruplaşarak orijinal verilere daha yakın bir dağılım sergilemiştir. Z_3 ise ortalama olarak Z_5 e benzer bir standart sapma dağılımı göstermiş olsa da korelasyon değerleri Z_5 'e kıyasla daha düşük seviyede kalmıştır. Bunların yanında Z_2 ve Z_4 amaç fonksiyonlarının birbirine benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Test grubu veriler için elde edilen ve Şekil (6b)'de gösterilen Taylor grafiği incelendiğinde de eğitime grubuna benzer şekilde özellikle Z_1 'in düşük tahmin değerleri ürettiği ve Z_5 'in diğerlerine kıyasla gözlenmiş verilere daha yakın bir dağılım sergilediği görülmektedir. Mevcut sonuçlardan yola çıkarak farklı amaç fonksiyonları ile üretilen en başarılı ilk 5 model incelendiğinde en yüksek performansın Z_5 ile en düşük performansın ise Z_6 ile elde edildiği, bunun yanında Z_1 ile üretilen modellerin düşük tahmin değerleri elde ettiği ve son olarak kullanılan diğer amaç fonksiyonlarının birbirlerine benzer bir davranış yapısı sergiledikleri sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmanın son kısmında her bir amaç fonksiyonu ile elde edilen en başarılı modeller birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bunun için öncelikle en başarılı modeller Şekil 7'de zaman serisi ve Şekil 8'de ise Taylor grafiği şeklinde sunulmuştur. Yapılan çalışmada Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 , Z_5 ve Z_6 ile üretilen en başarılı modeller sırasıyla Denklem (12), Denklem (13), Denklem (14), Denklem (15), Denklem (16) ve Denklem (17)'de gösterilmiştir.

$$y_{m1}(1) = 4.584xTS - 0.181xNN + 3.780xRH - 1.217xS - 0.048xY \quad (12)$$

$$y_{m1}(2) = 4.465xTS + 0.483xNN + 4.771xRH - 0.543xS - 0.153xY \quad (13)$$

$$y_{m1}(3) = 3.522xTS + 0.421xNN - 4.227xRH + 1.482xS + 0.004xY \quad (14)$$

$$y_{m1}(4) = 2.201xTS + 0.096xNN + 1.553xRH + 2.990xS + 0.027xY \quad (15)$$

$$y_{m1}(5) = 4.786xTS - 0.253xNN - 0.773xRH + 1.802xS - 0.028xY \quad (16)$$

$$y_{m1}(6) = 1.285xTS + 4.097xNN - 3.765xRH + 4.491xS - 3.447xY \quad (17)$$

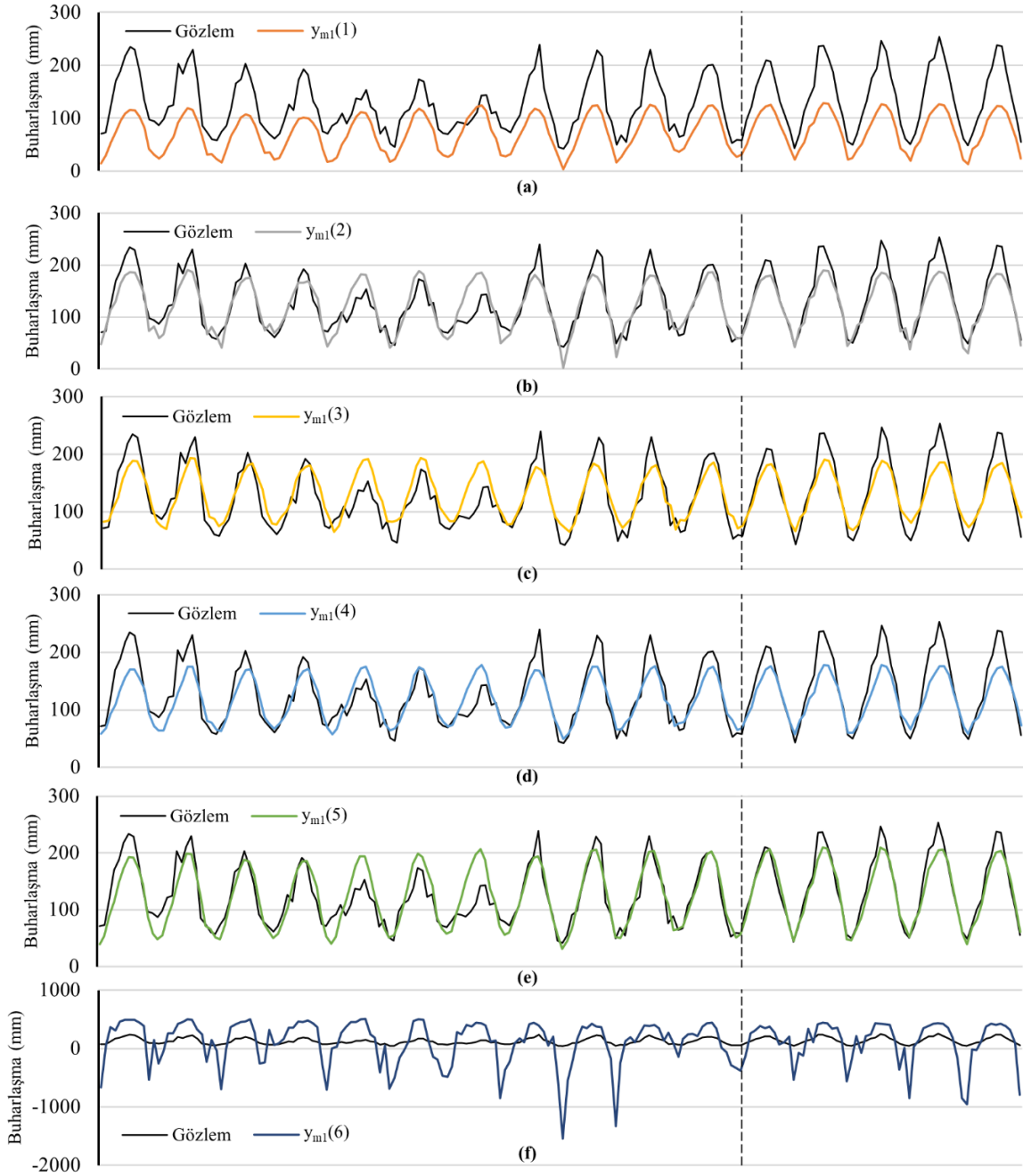
Yapılan çalışma sonucunda her bir amaç fonksiyonu ile elde edilen ve Denklem (12-17)'de gösterilen modellerin eğitime ve test performansları Tablo 3 doğrultusunda

incelendiğinde öncelikle daha önce elde edilen sonuçlara paralel olarak Z_6 'ya ait en başarılı modelin bile oldukça başarısız sonuçlar elde ettiği görülmektedir. $y_{m1}(6)$ modelinin eğitime PBIAS değeri her ne kadar 0.003 gibi oldukça düşük bir değer olarak elde edilmiş olsa da eğitime NSE değeri -45.037 olarak elde edilmiş olup MSE değeri de oldukça yüksektir. Bu durum Şekil (7f)'de verilen zaman serisi grafiğinde de açıkça görülmektedir.

Diğer taraftan Z_1 ile yapılan R^2 maksimizasyonundan elde edilen en başarılı model olan $y_{m1}(1)$ 'de düşük tahmin problemi meydana gelmiştir. Bu durum gerek Şekil (7a)'daki zaman serisi grafiğinde, gerekse de Şekil 8'deki Taylor diyagramlarında gözükmemektedir. $y_{m1}(6)$ modelinin eğitim (42.682) ve test (44.198) PBIAS değerlerinin de yüksek çıkmış olması bu sonucu destekler niteliktedir. Diğer amaç fonksiyonları ile elde edilen en başarılı çözümler incelendiğinde özellikle Z_5 'in ön plana çıktığı görülmüştür. Z_2 , Z_3 , Z_4 ve Z_5 'in Tablo 3'te gösterilen eğitim performans değerleri arasında çok fazla bir fark olmadığı fakat test değerlerinde Z_5 'in diğerlerine kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 8'deki Taylor grafiklerinde de $y_{m1}(5)$ modelinin diğer modellere kıyasla gözlenmiş verilere daha yakın bir dağılımla sonuç ürettiği söylenebilir.

Mevcut sonuçlardan yola çıkarak 6 farklı amaç fonksiyonu içerisinde en başarılı çözümün Z_5 ile yapılan MSE/+NSE minimizasyonu ile elde edilen $y_{m1}(5)$ modeliyle elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. MSE/+NSE minimizasyonu gerek grup başarısında gerek en başarılı ilk 5 model incelemesinde, gerekse de en başarılı model incelemelerinde başarısını belirgin bir şekilde göstererek mevcut veriler için en uygun amaç fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan Z_1 amaç fonksiyonu ile gerçekleştirilen R^2 maksimizasyonunda genel olarak yüksek tahmin/düşük tahmin problemleri meydana gelmiştir. Bu bakımdan her ne kadar Z_1 ile elde edilen modellerde ilişki seviyesi yüksek olarak elde edilmiş olsa da bu amaç fonksiyonunun gerçeğe yakın sonuçlar vermediği görülmüştür. Çalışmadan elde edilen bir başka sonuç ise Z_6 ile gerçekleştirilen PBIAS minimizasyonunun oldukça kötü bir performans sergilemesi olmuştur. Z_6 ile elde edilen modellerde her ne kadar çok düşük (<0.01) PBIAS değerleri elde edilmiş olsa da bu modeller gerek ilişki göstergeleri bakımından gerekse de hata metrikleri bakımından kayda değer bir sonuç elde edememişlerdir. Kullanılan diğer amaç fonksiyonları (Z_2 , Z_3 ve Z_4) ise Z_5 kadar olmasa da ortalama olarak başarılı modeller üretebileceklerini göstermişlerdir.

Son olarak YAK optimizasyon algoritmasının çözümünü iyileştirme durumunun incelenmesi amacıyla he bir amaç fonksiyonu ile elde edilen en başarılı modellerin yakınsama grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Yakınsama grafikleri iterasyonlar boyunca amaç fonksiyonu ile elde edilen değerlerin değişimini gösteren grafiklerdir. Şekil 9 incelendiğinde bütün amaç fonksiyonları için YAK optimizasyon algoritmasının başlangıçta ürettiği çözümü iyileştirdiği görülmektedir.

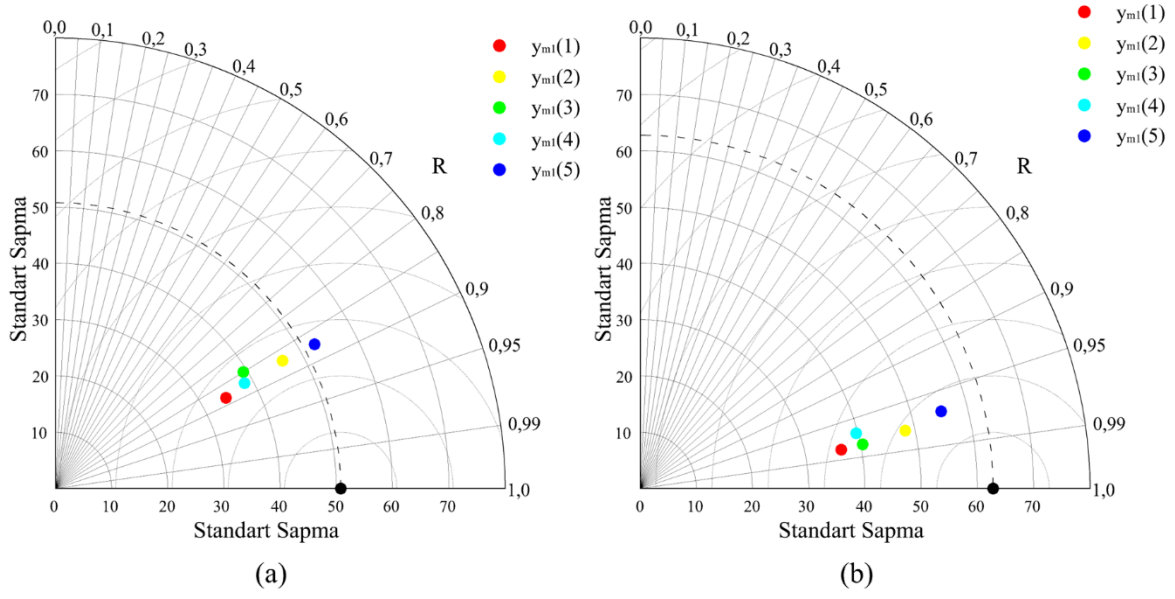


Şekil 7. Z_1 (a), Z_2 (b), Z_3 (c), Z_4 (d), Z_5 (e) ve Z_6 (f) ile üretilen en başarılı modellere ait aylık zaman serisi grafikleri

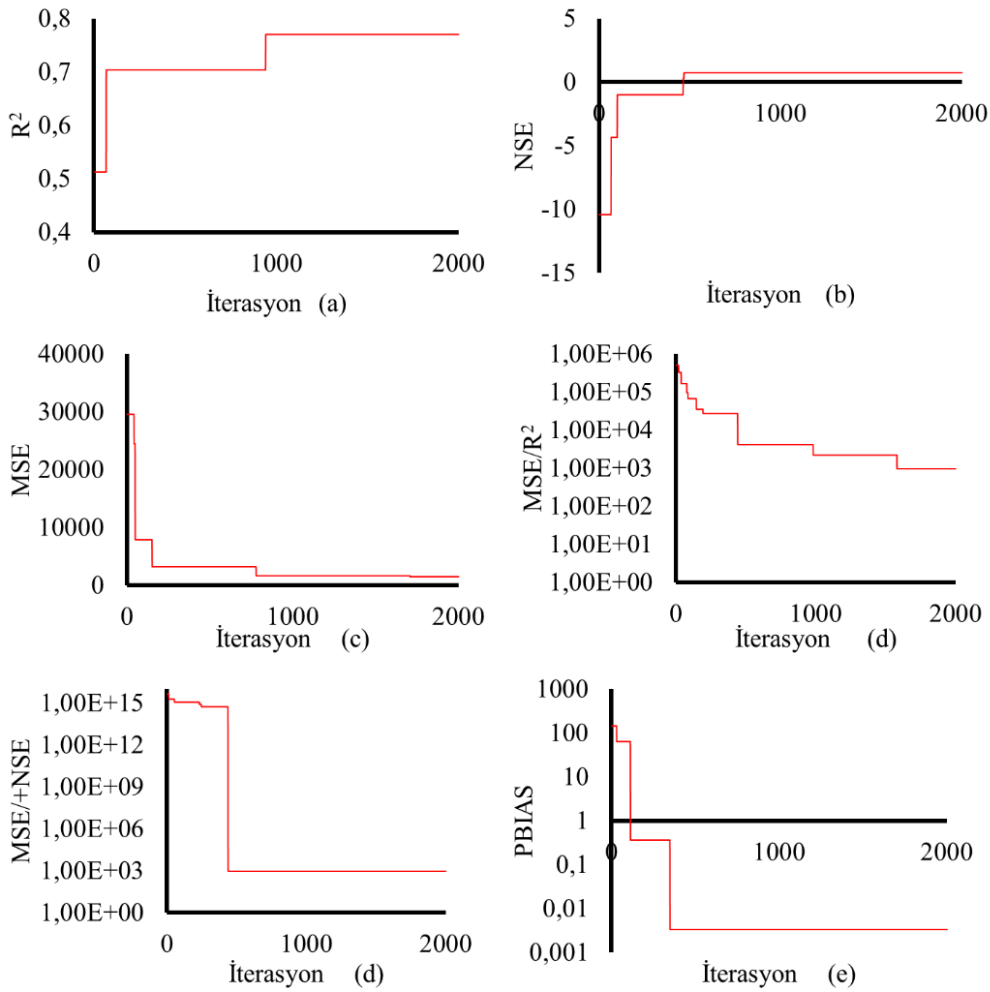
Mevcut çalışmada 6 farklı amaç fonksiyonu kullanılarak B modellemesi gerçekleştirilmiş olup bu amaç fonksiyonları arasında literatürde bu konuda daha önce uygulanmamış olan MSE/+NSE amaç fonksiyonu ile en başarılı çözümlerin elde edildiği görülmüştür. Bu sonucun mevcut çalışmanın ana çıktısını teşkil ettiği ve çalışmanın yenilikçi kısmını oluşturduğu düşünülmektedir. Bu aşamada literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların genellikle performans metriklerini sonuçların yorumlanmasında kullanmış oldukları görülmektedir. B konusunda mevcut çalışmanın paralelinde performans metriklerinin birbirleri arasında kıyaslamalı bir şekilde incelendiği bir çalışma

literatürde bulunmamaktadır. Bu bakımdan mevcut çalışmanın literatüre farklı bir yönden katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

B konusunda literatürdeki farklı çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların ağırlıklı olarak Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error, RMSE) [3,4,29-36] ve Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) [3,4,31,35,36] gibi hata bazlı metrikleri tercih ettikleri görülmektedir, diğer taraftan NSE [3,30-32,34,36], R^2 [31,33,36] ve Korelasyon Katsayısı (R) [3,29,30,34,36] gibi ilişki bazlı performans metriklerinin de B modellemesinde literatürde yaygın bir biçimde kullanıldığı görülmüştür.



Şekil 8. Z_1 [$y_{m1}(1)$], Z_2 [$y_{m1}(2)$], Z_3 [$y_{m1}(3)$], Z_4 [$y_{m1}(4)$] ve Z_5 [$y_{m1}(5)$] ile üretilen en başarılı modellerin eğitim (a) ve test (b) grupları için Taylor diyagramları



Şekil 9. $y_{m1}(1)$ [a], $y_{m1}(2)$ [b], $y_{m1}(3)$ [c], $y_{m1}(4)$ [d], $y_{m1}(5)$ [e] ve $y_{m1}(6)$ [f] modellerine ait yakınsama grafikleri

Mevcut çalışmanın sonuçları incelendiğinde performans metriklerinin optimizasyon algoritmalarından elde edilecek sonucu önemli derecede etkileyebileceği ve tek başına kullanımının oldukça yanıltıcı sonuçlar doğurabileceği çıktısı elde edilmiştir. Herhangi bir amaç fonksiyonu ile üretilen modeller kendi kriterlerine göre başarılı sonuçlar elde etseler de diğer kriterlerde daha kötü sonuçlara ulaşarak başarısız bir modellemeye meydan verebilmektedirler. Bu bakımdan özellikle performans metriklerinin zayıf yönleri göz önünde bulundurularak yorumlama yapılması sağlıklı bir modelleme için yüksek derecede önem arz etmektedir. Bu bağlamda özellikle PBIAS ve R^2 metriklerinin mevcut çalışma özelinde güvensiz birer metrik olduğu görülmüştür.

4 Sonuçlar

Mevcut çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde öncelikte YAK optimizasyon algoritmasının başarılı B modelleri üretebildiği görülmüştür. Farklı amaç fonksiyonlarıyla üretilen modeller arasında en başarılı olarak kabul edilen $y_{m1}(5)$ modelinde eğitim için $0.755 R^2$, 0.726 NSE ve 0.251 PBIAS değerleri üretilirken test grubunda bu başarı R^2 , NSE ve PBIAS için sırasıyla 0.948 , 0.922 ve 5.753 olarak elde edilmiştir. Özellikle test performansının oldukça başarılı olması YAK optimizasyon algoritmasının B modellemesinde başarılı sonuçlar üretebilecek bir yöntem olduğunu kanıtlamaktadır. Diğer taraftan yakınsama grafiklerinde bütün amaç fonksiyonları için YAK yönteminin çözümü giderek iyileştirmiş olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak YAK yöntemi gibi farklı optimizasyon algoritmalarıyla daha başarılı sonuçların üretilen ihtimalinin her zaman için geçerli olduğu söylenebilir.

Özellikle PBIAS minimizasyonu ile elde edilen modellerde çok düşük PBIAS değerleri elde edilmiş olsa da ulaşılan modeller oldukça başarısız seviyede kalmıştır. Diğer taraftan R^2 maksimizasyonu ile elde edilen modellerde gözlenmiş olan verilerle model verileri arasında bir uyum yakalanmış olsa da genel olarak düşük tahmin/yüksek tahmin problemi oluşmuş ve tam anlamıyla başarılı modeller kurulamamıştır. Bu sebeplerden dolayı farklı metriklerin bir arada kullanımının modelleme sonuçlarını daha hassas ve gerçekçi bir şekilde yapılmasına yüksek seviyede fayda sağlayacağı söylenebilir. Bunlara ilave olarak özellikle Zaman serileri ve Taylor grafikleri aracılığıyla model sonuçlarının görsel bir şekilde sunulmasının da sonuçların yorumlanmasında oldukça verimli olduğu görülmüştür.

Literatürde yapılan çalışmaların büyük bir kısmında NSE metriği kullanılmış ve geçerliliğini ispatlamış bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Mevcut çalışmada ise başta MSE/+NSE olmak üzere farklı amaç fonksiyonlarıyla da NSE maksimizasyonundan daha başarılı modellerin oluşturulabileceği görülmektedir. Bu bakımdan önerilecek daha farklı metriklerin kullanılmasıyla modelleme başarısının artırılma ihtimalinin her zaman için geçerli olduğu düşünülmektedir.

Giderek artan dünya nüfusuna karşılık sınırlı durumda bulunan su kaynaklarının daha da fazla savunmaya muhtaç hale geldiği günümüzde artık kabul edilmiş bir gerçektir. Dolayısıyla su kaynaklarının korunması ve geliştirilmesi

amacıyla buharlaşma gibi fenomenlerin yapılarının daha iyi anlaşılıp daha başarılı modellerin kurulmasıyla geleceğe yönelik daha keskin tahminlerin yapılması sağlanabilir. Bu açıdan mevcut çalışmayla birlikte bu konuda yapılan diğer çalışmaların su kaynakları mühendisliği bakımından önemli çıktılar içerdiği düşünülmektedir.

Teşekkür

Meteorolojik verilerin ölçme ve teminindeki emeklerinden ötürü MGM personeline teşekkürlerimi sunarım

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] F. Ellsäßer, A. Röhl, C. Stiegler, Hendrayanto and D. Hölscher, Introducing QWaterModel, a QGIS plugin for predicting evapotranspiration from land surface temperatures. *Environmental Modelling & Software*, 130,2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104739>.
- [2] V. P. Singh and C.-Y. Xu, Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrol Process*, 11, 311–323, 1997. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19970315\)11:3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3).
- [3] S. N. Qasem, S. Samadianfard, S. Kheshtgar, S. Jarhan, O. Kisi, S. Shamshirband and K. W. Chau, Modeling Monthly Pan Evaporation Using Wavelet Support Vector Regression and Wavelet Artificial Neural Networks in Arid and Humid Climates. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13, 177–187, 2019. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1564702>.
- [4] G. Tezel and M. Buyukyildiz, Monthly Evaporation Forecasting Using Artificial Neural Networks and Support Vector Machines. *Theor Appl Climatol*, 124, 69–80, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1392-3>.
- [5] Ö. Terzi, Daily Pan Evaporation Estimation Using Gene Expression Programming and Adaptive Neural-Based Fuzzy Inference System. *Neural Comput Appl*, 23, 1035–1044, 2013. <https://doi.org/10.1007/S00521-012-1027-X/FIGURES/9>.
- [6] J. E. Cahoon, T. A. Costello and J. A. Ferguson, Estimating Pan Evaporation Using Limited Meteorological Observations. *Agric For Meteorol*, 55, 191–190, 1991. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90061-T](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90061-T).
- [7] S. Kim, J. Shiri, O. Kisi and V. P. Singh, Estimating Daily Pan Evaporation Using Different Data-Driven Methods and Lag-Time Patterns. *Water Resources Management*, 27, 2267–2286, 2013. <https://doi.org/10.1007/S11269-013-0287-2>.
- [8] P. B. Shirsath and A. K. Singh, A Comparative Study of Daily Pan Evaporation Estimation Using ANN, Regression and Climate Based Models. *Water*

- Resources Management, 24:8, 1571–1581, 2009. <https://doi.org/10.1007/S11269-009-9514-2>.
- [9] G. F. Lin, H. Y. Lin and M. C. Wu, Development of a Support-Vector-Machine-Based Model for Daily Pan Evaporation Estimation. *Hydrol Process*, 27, 3115–3127, 2013. <https://doi.org/10.1002/HYP.9428>.
- [10] R. M. Adnan, A. Malik, A. Kumar, K. S. Parmar and O. Kisi, Pan Evaporation Modeling by Three Different Neuro-Fuzzy Intelligent Systems Using Climatic Inputs. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-14, 2019. <https://doi.org/10.1007/S12517-019-4781-6/TABLES/7>.
- [11] A. D. Kulkarni and G. S. Anaokar, Prediction of Evaporation Loss in Reservoir with Fuzzy Logic Approach. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 3, 39-42, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24931.96804>.
- [12] A. Ashrafzadeh, M. A. Ghorbani, S. M. Biazar and Z. M. Yaseen, Evaporation Process Modelling over Northern Iran: Application of an Integrative Data-Intelligence Model with the Krill Herd Optimization Algorithm. *Hydrological Sciences Journal*, 64, 1843-1856, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1676428>.
- [13] M. A. Ghorbani, R. Kazempour, K. W. Chau, S. Shamshirband and P. T. Ghazvinei, Forecasting Pan Evaporation with an Integrated Artificial Neural Network Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Model: A Case Study in Talesh, Northern Iran. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 724-737, 2018. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1517052>.
- [14] A. R. Ghumman, Y. M. Ghazaw, A. Alodah, A. ur Rauf, M. Shafiquzzaman and H. Haider, Identification of Parameters of Evaporation Equations Using an Optimization Technique Based on Pan Evaporation. *Water*, 12, 2020. <https://doi.org/10.3390/W12010228>.
- [15] S. Kim and H. S. Kim, Neural Networks and Genetic Algorithm Approach for Nonlinear Evaporation and Evapotranspiration Modeling. *J Hydrol (Amst)*, 351, 299–317, 2008. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2007.12.014>.
- [16] L. Wang, O. Kisi, M. Zounemat-Kermani and H. Li, Pan Evaporation Modeling Using Six Different Heuristic Computing Methods in Different Climates of China. *J Hydrol (Amst)*, 544, 407–427, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2016.11.059>.
- [17] M. Bulmer, *Principles of Statistics*. Courier Corporation, 1979.
- [18] B. G. Tabachnick, L. S. Fidell and J. B. Ullman, *Using multivariate statistics (Seventh)*, 2019.
- [19] D. Karaboga, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department. Technical report-tr06, 2005.
- [20] D. Karaboga and B. Akay, A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm. *Appl Math Comput*, 213, 108-132, 2009. <https://doi.org/10.1016/J.AMC.2009.03.090>.
- [21] A. L. Bolaji, A. F. Bamigbola, L. B. Adewole, P. B. Shola, A. Afolunso, A. A. Obayomi, D. R. Aremu and A. A. A. Almazroi, A Room-Oriented Artificial Bee Colony Algorithm for Optimizing the Patient Admission Scheduling Problem. *Comput Biol Med*, 148, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2022.105850>.
- [22] Y. Cui, W. Hu and A. Rahmani, A Reinforcement Learning Based Artificial Bee Colony Algorithm with Application in Robot Path Planning. *Expert Syst Appl*, 203, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2022.117389>.
- [23] V. Yılmaz, The Use of Band Similarity in Urban Water Demand Forecasting as a New Method. *Water Supply*, 22, 1004-1019, 2022. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.221>.
- [24] M. W. Van Liew, T. L. Veith, D. D. Bosch and J. G. Arnold, Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS experimental watersheds, *J. Hydrol. Eng.*, 12 (2), 173-189, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173)).
- [25] J. E. Nash and J. v. Sutcliffe, River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles. *J Hydrol (Amst)*, 10, 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- [26] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans ASABE*, 50, 885-900, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- [27] H. V. Gupta, S. Sorooshian and P. O. Yapo, Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, 4(2), 135-143, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)10840699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)10840699(1999)4:2(135)).
- [28] M. Buyukyildiz and S. Y. Kumcu, An Estimation of the Suspended Sediment Load Using Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, Support Vector Machine and Artificial Neural Network Models. *Water Resources Management*, 31, 1343-1359, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1581-1>.
- [29] M. K. Goyal, B. Bharti, J. Quilty, J. Adamowski and A. Pandey, Modeling of daily pan evaporation in sub tropical climates using ANN, LS-SVR, Fuzzy Logic, and ANFIS, *Expert Systems with Applications*, 41, 5267-5276, 2014. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2014.02.047>.
- [30] A. Ashrafzadeh, A. Malik, V. Jothiprakash, M. A. Ghorbani and S. M. Biazar, Estimation of daily pan evaporation using neural networks and meta-heuristic approaches, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 26:4, 421-429, 2020. <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1498754>.

- [31] Z. M. Yaseen, A. M. Al-Juboori, U. Beyaztas, N. Al-Ansari, K. W. Chau, C. Qi, M. Ali, S. Q. Salih and S. Shahid, Prediction of evaporation in arid and semi-arid regions: a comparative study using different machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 70-89, 2020. <https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1680576>.
- [32] A. Malik, A. Kumar, S. Kim, M. H. Kashani, V. Karimi, A. Sharafati, M. A. Ghorbani, N. Al-Ansari, S. Q. Salih, Z. M. Yaseen and K. W. Chau, Modeling monthly pan evaporation process over the Indian central Himalayas: application of multiple learning artificial intelligence model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 323-338, 2020. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1715845>.
- [33] R. Moazenzadeh, B. Mohammadi, S. Shamshirband and K. W. Chau, Coupling a firefly algorithm with support vector regression to predict evaporation in northern Iran, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 584-597, 2018. <https://doi.org/10.1080/19942060.2018.1482476>.
- [34] M. Shimi, M. Najjarchi, K. Khalili, E. Hezavei and S. M. Mirhoseyni, Investigation of the accuracy of linear and nonlinear time series models in modeling and forecasting of pan evaporation in IRAN. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-5031-7>.
- [35] S. Yang, S. Liu, X. Li, Y. Zhong, X. He and C. Wu, The short-term forecasting of evaporation duct height (EDH) based on ARIMA model. *Multimedia Tools and Applications*, 76, 24903-24916, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4143-2>.
- [36] L. Wu, G. Huang, J. Fan, X. Ma, H. Zhou and W. Zeng, Hybrid extreme learning machine with meta-heuristic algorithms for monthly pan evaporation prediction. *Computers and electronics in agriculture*, 168, 105-115, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105115>.





Karayolu - demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığını etkileme seviyeleri

Human health impact levels of vibration exposure at highway - railroad level crossings

Ufuk Kırbas^{1,*} , Mustafa Karaşahin² 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

Öz

Çalışmada yolcu otomobili türü bir taşıtla karayolu - demiryolu hemzemin geçidi (DHG) geçişlerinde maruz kalınan ve insan sağlığını olumsuz etkileyen Tüm Vücut Titreşimi (TVT) seviyeleri araştırılmıştır. Öncelikle çalışmada geometrileri bilinen bazı yol profillerinde farklı hızlarda titreşim ölçümleri yapılmış ve bu veriler yardımıyla sayısal ortamda taşıtın tepkilerini verebilecek bir dinamik model kalibre edilmiştir. Ardından farklı sürüş hızlarında Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) şiddet düzeylerinde DHG geçişlerinde maruz kalınan titreşim verileri yardımıyla raylar arasında ve ray dışında kalan bölümler ISO 8608 standardında tanımlanan yol profillerine benzetilmiştir. TVT'ni betimleyen taşıt dinamik modeli kullanılarak D, O ve Y şiddet seviyelerinde tek hatlı ve çift hatlı DHG'de insan vücudunun maruz kaldığı titreşim verileri üretilmiştir. Simülasyonda taşıt hızları 10 ila 50 km/sa aralığında onar birim değiştirilerek sürüş hızının etkileri de değerlendirilmiştir. ISO 2631 standardında tanımlanan titreşim parametrelerinden titreşim doz değeri (VDV) ile titreşimin insan sağlığı üzerindeki genel rahatsızlık oluşumunun seviyeleri, eşdeğer statik basınç gerilimi (Se) parametresi ile taşıyıcı iskelet sisteminin (lomber omurga) etkilenme seviyeleri araştırılmıştır. Üç farklı bozulma şiddetinde, tek ve çift demiryolu hattı geçişlerinde bu olumsuzlukların oluşumuna sebebiyet verebilecek geçiş sayıları tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürüş konforu, Tüm vücut titreşimi, Demiryolu geçidi

1 Giriş

Günümüz modern şehirlerinde toplu taşımanın vazgeçilmez bir unsuru demiryolu taşımacılığıdır. Gelişen şehirleşmenin sonucu olarak ulaşım ağları her geçen gün daha fazla büyümektedir. Ayrıca kentsel yapılaşmanın içerisinde karayolu ve demiryolu ağlarının kesişmelerinin artışı kaçınılmaz bir durum olmaktadır. Bir karayolu üstyapısının hizmet düzeyi pürüzsüz, konforlu ve güvenli olma prensiplerinin her biri ayrı ayrı dikkate alınarak ifade edilmektedir. Sürüş kalitesi ise yapılan bir yolculukta sürücü ve yolcular tarafından hissedilen hareketlilik ortamı ve diğer

Abstract

The Whole Body Vibration (WBV) levels, which are exposed at the Highway - Railroad Level Crossing (RLC) passes with a passenger car type vehicle and adversely affect human health, were investigated in the study. First of all, vibration measurements were made at different speeds on some road profiles with known geometries, and a dynamic model that could give the vehicle's responses in the digital environment was calibrated with the help of these data. Then, with the help of vibration data exposed in RLC transitions at Low (L), Medium (M) and High (H) severity levels at various ride speeds, the sections between and outside the rails are compared to the road profiles defined in the ISO 8608 standard. Using the vehicle dynamic model describing the WBV, vibration data that the human body is exposed to were produced in single-track and double-track RLC at L, M and H severity levels. In the simulation, the effects of the ride speed were also evaluated by changing the vehicle speeds in the range of 10 to 50 km/h by ten units. Vibration dose value (VDV), which is the vibration parameter defined in the ISO 2631 standard, the levels of general nuisance caused by vibration on human health, the equivalent static pressure stress (Se) parameter and the level of influence of the supporting skeleton system (lumbar spine) were investigated. The number of transitions that may cause the formation of these negativities in single and double railroad crossings with three different distress severities have been determined.

Keywords: Ride comfort, Whole body vibration, Railroad level crossing

faktörler de dikkate alınarak ortaya çıkan toplam tecrübenin bir derecesi olarak tanımlanmaktadır [1, 2]. Sürüş sırasında insan vücudunu olumsuz etkileyen yol kaynaklı en önemli sebep yol yüzeyinde görülen üstyapı bozulmalarıdır. ASTM D 6433 standardına göre [3] yirmi farklı üstyapı bozulma türünden biri olan karayolu - demiryolu hemzemin geçidi (DHG) geçişi, özellikle kentsel karayolu ulaşım ağlarında sürüş kalitesini azaltan bir bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yol üstyapılarının mevcut performansını sayısal olarak ifade edebilmek amacıyla çok sayıda indeks geliştirilmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ufuk.kirbas@omu.edu.tr (U. Kırbas)

Geliş / Received: 03.12.2022 Kabul / Accepted: 09.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1214112

Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi (International Roughness Index, IRI), Üstyapı Durum İndeksi (Pavement Condition Index, PCI), Üstyapı Hizmet Düzeyi İndeksi (Pavement Serviceability Index, PSI), Sürüş Sayısı (Ride Number, RN) bunların başlıcaları arasında yer almakla birlikte çok daha fazla sayıda indeks olduğu bilinmektedir [4]. Sürüş kalitesini sayısal olarak ifade edebilmek için ISO 2631 standardında bahsedilen frekans ağırlıklandırılmış titreşim değerlendirme sıklıkla (a_w) kullanılmaktadır [1, 2, 5-7]. Literatürde, taşıt içerisinde maruz kalınan titreşimle üstyapı performans indeksleri arasındaki ilişkileri araştıran çok sayıda çalışmanın olduğu dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalarda makro pürüzlülüğü temsil eden sinyal yığımlarına diğer bir değişle yol yüzeyini sayısal olarak ifade edebilen profil girdilerine göre tepki üreten dinamik taşıt modelleri yardımıyla sürüş konforu analiz edilmektedir. Cantisani ve Loprencipe oluşturdukları bir dinamik taşıt modelini profilini belirleyebildikleri yol ivme ölçümleri ile kalibre etmişlerdir [5]. Kalibre dinamik modeli kullanarak Uzun Dönemli Üstyapı Performansı (Long-Term Pavement Performance, LTPP) verileri yardımıyla IRI ve düşey doğrultudaki a_w değerlerini analiz etmişler, sürüş konforuna ilişkin IRI eşik değerlerini önermişlerdir. Zhang vd. benzer şekilde yol yüzeyini ve profilini bir taşıt sürüş simülöründe benzetim yaparak IRI ve a_w arasında değerlendirme yapmışlardır [8]. Farklı yaş ve eğitim düzeyine sahip sürücü deneklerin de değerlendirmeye alındığı çalışmada IRI konfor eşik değerleri önerilmiştir. Hou vd. çalışmalarında bir dinamik taşıt modeli aracılığıyla ürettikleri a_w değerleri ile IRI arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir [9]. Çalışmalarda özellikle kentsel hız limitlerinde farklı boyutlardaki yolcu otomobili türü taşıtlarda kaydedilen titreşimlerin taşıtın marka ve modeline göre önemli miktarda değişiklik göstermediği vurgulanmaktadır [7, 10, 11].

Bununla beraber, literatürde ISO 8608 standardında [12, 13] teknik tanımları belirlenen yol sınıflarına göre yapay yol profil girdileri ile sürüş kalitesini değerlendiren çalışmalar da dikkat çekmektedir. Nguyen vd. kentsel yolcu otobüsünü temsil eden bir dinamik model ile ürettiği sürüş konforu ile IRI arasında benzerlikleri araştırmış ve otobüs türü taşıtlar için IRI konfor eşikleri geliştirmiştir [14]. Saha ölçümleri ile kalibre ettiği dinamik taşıt modelinde girdi olarak ISO 8608'de önerilen yol sınıfı kategorilerine karşılık gelen IRI değerleri belirlenmiştir. Múčka çalışmasında rijit yol üstyapılarında ISO 8608'e göre ürettiği yol profillerine çatlak benzeri sinyal de ilave ederek sürüş konforu üzerindeki etkilerini analiz etmiştir [15].

Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda taşıt içerisinde maruz kalınan üstyapı yüzeyinden kaynaklı titreşimlerin sürüş konforuna ve insan sağlığına olan olumsuz etkilerinin, sıklıkla, üstyapının mevcut durumunu ifade eden performans indeksi bileşenleri (IRI, PCI vb.) aracılığıyla değerlendirildiği görülmektedir. Literatürde, özellikle kentsel yol ağlarında, sürücülerin karşısına çıkan yol bozulmalarının seyahat eden kişiler üzerine olan olumsuz etkilerini tekil olarak ortaya koyabilen çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Bununla beraber titreşimin insan vücudu üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmalarda, araştırmacıların sıklıkla konforsuzluk algısını

değerlendirdikleri dikkat çekmektedir. Diğer bir değişle literatür incelendiğinde, sürüş sırasında titreşimin insan vücudu üzerinde geçici ya da kalıcı olabilecek sağlık kaybı ihtimallerine sebep olacak maruziyet seviyelerinin neredeyse araştırılmadığı açıkça görülmektedir. Oysaki seyahat esnasında geçici dahi olsa yaşanan bir sağlık sorununun (baş dönmesi, mide bulantısı vb.) sürüş güvenliğini olumsuz etkilediği çok açıktır.

Çalışmanın konusu ile yakından ilgili olarak Kırbaş ve Kardeşahin [16] yaptıkları çalışmada yolcu otomobili türü taşıtlarda seyahat eden kişilerin demiryolu hemzemin geçitlerinden geçişlerde maruz kaldığı konforsuzluğun düzeylerini belirlenmişlerdir. Çalışma kapsamında gerçek titreşim ölçüm verileri ile kalibre edilmiş bir çeyrek taşıt simülasyon modeli ile demiryolu geçişini betimleyen yapay yol profilinden farklı sürüş hızlarında geçişlerde sürücü ve yolcuların maruz kaldığı titreşimler üretilmiştir. Bu titreşimlerin sebep olduğu konforsuzluk seviyeleri tüm değişkenleriyle ifade edilmiştir. Yazarlar çalışmalarında ISO 2631 standardında konforu ifade ettiği varsayılan frekans ağırlıklı karesel ortalamalı ivme (a_w) parametresini kullanılmışlardır. Bu çalışmada ise kentsel karayolu trafiğinde en sık görülen yolcu otomobili türü taşıtlarda seyahat eden sürücü ve yolcuların farklı hızlarda demiryolu hemzemin geçişlerinde maruz kaldıkları insan sağlığını olumsuz etkileyen Tüm Vücut Titreşimi (TVT) seviyeleri analiz edilmiştir. Diğer bir değişle çalışma kapsamında titreşimin insan sağlığını olumsuz etkilediği maruziyet seviyeleri (DHG geçiş sayıları) analiz edilmiştir. Analizleri yapabilmek amacıyla Simulink (MATLAB®) ortamında bir çeyrek taşıt dinamik taşıt modeli oluşturulmuştur. Taşıt modelini kalibre edebilmek amacıyla yolcu otomobili türü bir taşıtla iki farklı yükseklikte tümseğin bulunduğu yol kesimlerinde 20-50 km/sa aralığında titreşim ölçümleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında kaydedilen titreşim verileri ISO 2631 standardında tanımlanan kalibrasyon amacıyla yol yüzeyinin bütünü sayısal olarak değerlendirebilen frekans ağırlıklı karesel ortalamalı ivme (a_w) parametresi yardımıyla karakterize edilerek değerlendirilmiştir. ISO 8608 standardında kabul edilen yol sınıflandırmalarına uygun parametrelerle oluşturulan yol profilleri dinamik taşıt modeline girdi olarak kullanılmıştır. Yapılan gerçek titreşim ölçümleri ve dinamik simülasyon sonuçları arasındaki farklar kalibre edilerek taşıtın belirlenen bir yol profiline olan tepkileri sayısal hale getirilmiştir. Diğer bir değişle dinamik taşıt modeli kalibre edilmiştir. Sonrasında ASTM D 6433 standardında belirtilen Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) olmak üzere üç değişik bozulma şiddetindeki demiryolu hemzemin geçitlerinden titreşim verileri kaydedilmiştir. Farklı bozulma şiddetlerindeki demiryolu hemzemin geçitlerinin raylar arasında ve ray dışında kalan bölümlerinin ISO 8608 standardına göre hangi parametreler ile ifade edilebileceği araştırılmıştır. Yapılan tüm bu kalibrasyonlar neticesinde simulink ortamında çalıştırılan ve gerçek taşıt tepkilerini verebilen dinamik taşıt modeli simülasyonu yardımıyla yolcu otomobilinde seyahat eden bir kişinin şehir içinde farklı sürüş hızlarında tek hatlı ve çift hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kaldığı TVT'nin seviyeleri belirlenmiştir. Analizler D, O ve Y şiddet seviyelerinde tek

hatlı ve çift hatlı demiryolu hemzemin geçitlerini temsil edebilecek sayısal olarak oluşturulan yol profilleri aracılığıyla yapılmıştır. Tek ve çift hatlı demiryolu geçişini temsil eden en kesitlerde her bir şiddet seviyesi için ayrı ayrı oluşturulan yol profilleri 10 - 50 km/sa aralığındaki sürüş hızlarında tekrarlanarak dinamik simülasyon koşuturulmuştur. Böylece sürüş hızlarının TVT üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında dinamik model ile üretilen titreşim verileri ISO 2631 standardında tanımlanan ve titreşimin insan sağlığı üzerindeki olumsuzluk seviyelerini ifade etmek amacıyla geliştirilmiş olan titreşim doz değeri (VDV) ve eşdeğer statik basınç gerilimi (S_e) titreşim parametreleri yardımıyla karakterize edilerek değerlendirilmiştir. ISO standardında, tanımlanan titreşim parametrelerinden VDV ile titreşimin insan sağlığı üzerindeki genel rahatsızlık oluşumunun seviyelerinin, S_e parametresi ile taşıyıcı iskelet sisteminin etkilenme seviyelerinin araştırılması önerilmektedir. Çalışmada karayolu-demiryolu hemzemin geçitlerinde, tek ve çift demiryolu hattı geçişlerinde sağlık açısından bu olumsuzlukların oluşumuna sebebiyet verebilecek geçiş sayıları tespit edilmiştir. Sonuçlar açıklamalı grafiklerle görselleştirilerek yorumlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 ISO 2631-1 standardı

Çalışmalar taşıt içerisinde maruz kalınan ve üstüya yüzeyinden kaynaklanan titreşimlerin, TVT değerlendirmesi ile analiz edilebileceğini göstermektedir [7, 17]. İnsan vücudu ile temas edilerek yapılan düşey doğrultudaki titreşim ölçümlerinin ISO 2631 standardında belirtilen TVT analiz yaklaşımı ile değerlendirildiği analizlere ilişkin örnekler mevcuttur [6]. Standardın birinci bölümünde (ISO 2631-1) titreşim ölçüm ve analiz metodolojileri açıklamaktadır. Titreşimlerin insan vücudu üzerine olan etkilerinin değerlendirilmesinde 0.5 ile 80 Hz frekans aralığında konfor, sağlık ve algılama analizleri, 0.1 ile 0.5 Hz aralığında ise hareket kaynaklı hastalıkların analizleri yapılmaktadır [18].

İnsan vücudunun tepkisine göre titreşim ölçümlerini değerlendirebilmek için maruz kalınan titreşimin niceliklerinin (frekans, yön vb.) görelî öneminin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple, titreşimlerin belirli aralıktaki frekanslarının, insan vücudu üzerinde kabul edilen etkilerine göre ağırlıklandırma kavramı geliştirilmiştir. Diğer bir deyişle, insan vücudunun farklı frekans aralıklarındaki titreşimlere tepkilerini belirgin hale getirebilmek için standardın önerdiği ağırlık değeri kadar büyütülmektedir [2].

ISO 2631 standardına göre titreşim ölçümleri koltuk arkası (sırt), koltuk üzeri, ayaklar olmak üzere üç farklı noktadan üç farklı eksende yapılabileceği tavsiye edilmektedir. Yapılan çalışmalardan TVT'nin belirlenmesinde en etkili olan ölçüm noktasının koltuk üzeri olduğu bilinmektedir [2]. Titreşim ölçümlerinde, ISO 2631-1, EN ISO 8041 ve ISO 10326-1 standartlarında açıklanan talimatlar izlenerek insan vücudunda en doğru kantitatif TVT'lerinin oluşmasını sağlamak için ivmeölçerlerin bir kauçuk muhafaza disk içinde, kalça kemiği (ischial tuberosity) [7] altına yerleştirilmesi önerilmektedir [6, 19,

20].

Ayrıca, arazi ölçümleri yol yüzeyinden kaynaklı bozulmaların insan vücudu üzerindeki etkilerinin araştırılması konusunda en etkili titreşim yönünün düşey doğrultuda (z) etkiyen titreşimler olduğunu göstermektedir [7, 10, 21]. Standartta konfor, sayısal olarak, ölçülen titreşim değerinin ağırlıklandırılmış frekans analizi ile bulunan karesel ortalamalı kökü (a_w) yardımıyla gösterilmektedir. Bu değerlendirme düşey doğrultudaki titreşimler için yapıldığında a_{wz} bileşeni ile ifade edilmektedir. a_w bileşeninin hesabında, öncelikle, zaman tanım alanından frekans tanım alanına dönüştürülen butterworth filtreleme tekniği kullanılarak filtrelenmiş düşey ivmelenme ($a_{i,z}$) değerleri, üçte birlik oktav band aralıklarına karşılık gelen güç spektral yoğunlukları aracılığıyla hesaplanmaktadır. Sonrasında, bu ivme değerleri kendisine ait olan her bir band aralığına karşılık gelen ağırlık faktörü ($w_{k,i}$) ile çarpılmaktadır. Son olarak, filtrelenen her bir band aralığı için bulunan bu çarpımların karelerinin toplamının karekökü alınarak a_w bileşeni hesaplanmaktadır [2, 18]. Söz konusu hesap matematiksel olarak Denklem (1) yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$a_{wz} = \left[\sum_i (w_{k,i} a_{i,z})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ISO 2631-1 standardında, titreşimin insan sağlığı üzerine olan genel olumsuzluğu ifade eden etkisi VDV titreşim değerlendirme parametresi ile açıklanmaktadır. VDV parametresi, titreşim ölçümünün süresini de değerlendirmeye katmaktadır. Aynı zamanda insan vücudu ani ivme değişimlerine (şoklara) çok duyarlı olduğundan, sürücü ve yolcular titreşim ölçümündeki tepe ivme noktalarına çok daha duyarlıdır [2]. VDV değerlendirmesi, belirli bir zaman aralığında ikinci güç yerine ivme ölçümlerinin dördüncü gücü alınarak yapılmaktadır. VDV parametresi Denklem (2) ile hesaplanmaktadır ve birimi $m/s^{1.75}$ 'tir. Bu eşitlikte $a_w(t)$ anlık frekans ağırlıklı ivmeyi ve T ise ölçüm süresini göstermektedir. Titreşim maruziyeti birden fazla zaman aralığında (i) ve farklı büyüklüklerde oluştuğunda, toplam maruziyet için VDV parametresi Denklem (3) ile hesaplanabilmektedir.

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$VDV_{\text{toplam}} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

VDV parametresi ile ifade edilen insan sağlığının olumsuz etkilenebileceği titreşime maruz kalma sınır değerleri Tablo 1'de görülmektedir [22].

Tablo 1. VDV parametresine göre titreşimin insan sağlığını olumsuz etkileme sınırları

VDV ($m/sn^{1.75}$)	Açıklaması
< 8.5	Sağlık risklerinin oluşması çok beklenmez
8.5 - 17	Sağlık risklerinin oluşması konusunda dikkat edilmelidir
> 17	Sağlık risklerinin oluşması muhtemeldir

2.2 ISO 2631-5 standardı

ISO 2631-5 standardında tanımlanan titreşim analizi, insan vücudunun seyahat halinde maruz kaldığı titreşimi taşıt koltuğu üzerinden ölçerek değerlendirme yaklaşımına göre kurgulanmıştır. Mekanik şoklar, insan vücudunun taşıyıcı iskelet sisteminin en çok alt kısmını (lomber omurga) olumsuz etkilemektedir. Bu standartta lomber omurga tepkisini hesaplamak için titreşime maruz kalan kişinin dik oturduğu ve maruz kalma sırasında koltuktan isteyerek kalkmadığı varsayılmıştır [23]. Omurga tepkisinin x ve y yönlerinde yaklaşık olarak doğrusal ve z yönünde (düşey) doğrusal olmayan şekilde davrandığı kabul edilmektedir. Standart düşey doğrultuda doğrusal olmayan davranışın tekrarlayan bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli kullanılarak ifade edilebileceğini vurgulamaktadır. Maruz kalınan ivme değerine karşılık omuriliğin verdiği tepki D_k (k yönünde) **Denklem (4)** ile açıklanmaktadır.

$$D_k = \left[\sum_i A_{ik}^6 \right]^{1/6} \quad (4)$$

Eşitlikte A_{ik} , k yönünün tepki ivmesinin i'nci zirvesini, k ise x, y veya z yönlerini temsil etmektedir. Teoriye göre titreşimlerin zirve değerleri x ve y yönlerinde pozitif ve negatif yönlerde oluşabileceği varsayılabilir ancak, z yönünde yalnızca pozitif yönde oluştuğu kabul edilmektedir. Çünkü omuriliğin sıkışması titreşime maruz kalmanın şiddeti ile yani oluşan basınç kuvveti ile çok daha fazla ilişkilendirilmektedir. Palmgren-Miner yaklaşımı ile oluşturulan biyomekanik modelde, mekanik şoku etkileyen faktörlerin sağlıklı bir kişinin omurgasındaki tepe basıncı sayısı ve büyüklükleri olduğu bulunmuştur [23]. Bu varsayımlarla omurga üzerindeki bu etkiyi, **Denklem (5)**'de gösterilen eşdeğer bir statik basınç gerilimi S_e , ile ifade edebilmek mümkün olmaktadır.

$$S_e = \left[\sum_{k=x,y,z} (m_k D_k)^6 \right]^{1/6} \quad (5)$$

Burada D_k , k doğrultusundaki titreşim seviyesidir. Standart düşey doğrultuda m_k katsayısının değerini $m_z = 0.032 \text{ MPa/(m/s}^2)$ alınmasını tavsiye etmektedir. Eğer D_k değeri günlük titreşime maruz kalma seviyesini yansıtıyorsa, bu değeri kullanarak hesapladığımız günlük eşdeğer statik sıkıştırma dozu değeri (S_{ed}) bulunabilmektedir. S_e parametresi ile ifade edilen titreşimin lomber omurga üzerindeki olumsuz etkilenme seviyeleri **Tablo 2**'de özetlenmektedir [23].

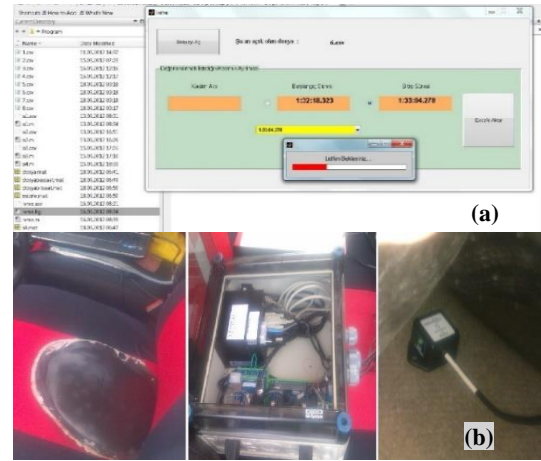
Tablo 2. Titreşimin lomber omurgayı olumsuz etkileme sınırları

S_e (MPa)	Açıklaması
< 0.5	Düşük olasılıklı olumsuz sağlık etkisi
0.5 – 0.8	Orta olasılıklı olumsuz sağlık etkisi
> 0.8	Yüksek olasılıklı olumsuz sağlık etkisi

2.3 Titreşim analizi ve kullanılan ekipmanlar

Dinamik taşıt modelinin kalibrasyonu için kullanılan titreşim verilerinin kaydedilmesinde, iki adet ivmeölçer (açıklık $\pm 4g$, hassasiyet $500 \pm 15 \text{ mV/g}$), bir adet GPS anteni ($< 3 \text{ m}$ hassasiyet) ve bir veri kaydediciden oluşan bir ivme

ölçüm seti kullanılmıştır. Düşey doğrultuda titreşim ölçümleri, Euro Car değerlendirmesinin tavsiye ettiği C segmentine giren bir yolcu taşıtı ile yapılmıştır. Saha ölçümlerinde düşey doğrultudaki ivme verileri saniyede 1000 adet, GPS verileri ise saniyede 1 adet konum ve 1 adet hız olarak toplanmıştır. Ölçülen titreşim değerleri çalışmayı yapan araştırmacılar tarafından MATLAB® ara yüzünde geliştirilen ve ISO 2631 standardında açıklanan analiz yöntemini kullanan yazılım yardımıyla değerlendirilmiştir. Saha araştırmaları için kullanılan titreşim ölçüm seti ve geliştirilen titreşim değerlendirme yazılımı **Şekil 1**'de görülmektedir.



Şekil 1. Analiz yazılımı (a) ve titreşim ölçüm seti (b)

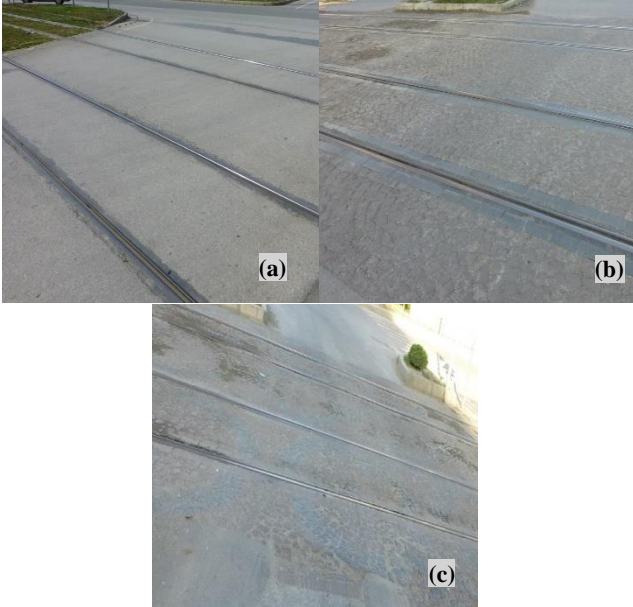
2.4 Demiryolu geçişi türü üstyapı bozulması

ASTM tarafından D 6433 koduyla yayınlanmış olan teknik standartta esnek yol üstyapıları için yirmi farklı türde bozulmanın olduğu belirtilmektedir [3]. Standartta, her bir bozulmayı açıklamak amacıyla kullanılan tanımların daha iyi anlaşılması ve değerlendirme yapan kişilere yardımcı olması için bozulma türleri ve şiddetleri fotoğraflarla da desteklenmiştir. Bu bozulmalar arasında 14 nolu bozulma demiryolu geçişi olarak tanımlanmıştır [3]. Standartta bozulma türlerinin büyük çoğunluğunun Düşük (D), Orta (O) ve Yüksek (Y) olmak üzere üç farklı bozulma şiddetinde değerlendirilmesi tavsiye edilmektedir. Aynı zamanda standartta üstyapıların bozulma nedenleri yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere kategorilere ayrılmıştır. Demiryolu geçişi türü bozulmanın oluşma nedeni olarak diğer nedenler kabul edilmektedir. Diğer nedenler, tasarım aşamalarından bağımsız öngörülemeyen ve kaçınılmaz zorlanan nedenler olarak kabul edilmektedir.

Standartta, demiryolu geçişi türü bozulmalar rayların etrafında, rayların aralarında veya demiryolu hatları aralarında oluşan çökmeler veya kabarmalar gibi bozuk alanlar olarak açıklanmaktadır. Bu alanlar eğer sürüş kalitesinde bir kayba yol açmayacak şekilde ise yani düzgünse bozulma olarak kabul edilmemektedir. Bozulma şiddetleri D ise düşük seviyede sürüş konforu kaybına, O ise orta seviyede sürüş konforu kaybına, Y ise yüksek seviyede sürüş konforu kaybına yol açtıkları kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, çift hatlı demiryolu geçişlerinin bozulma şiddetlerini kategorileştirebilmek için çok sayıda saha

gözlemi ve arazi ölçümü sonucu incelenmiştir. Standartta bozulmaları betimleyen kılavuz fotoğraflarla ölçümü yapılan demiryolu geçişleri kıyaslanmış ve karşılıklı değerlendirilmiştir. İncelemeler sonucu ortalama şehir içi sürüş hızı kabul edilebilecek 30 – 40 km/sa sürüş hızlarında, sürüş konforunu ifade eden a_{wz} değeri 0.8 m/sn²'den daha küçük ise düşük şiddetli, 0.8 ile 1.25 m/sn² aralığında ise orta şiddetli, 1.25 m/sn²'den daha büyük ise yüksek şiddetli bozulma sayılabileceği kabul edilmiştir. Diğer bir değişle, çift hatlı demiryolu geçişlerinde bu hız aralıklarında D şiddetindeki bozulmanın biraz konforsuz veya daha konforlu bir geçişe, O şiddetindeki bozulmanın konforsuz bir geçişe ve Y şiddetindeki bozulmanın çok konforsuz veya daha şiddetli bir konfor seviyesinde geçişe sebep olduğu varsayılmıştır. Yapılan saha gözlemleri ile kabuller ışığında inceleme ve ölçüm yapılan üç farklı şiddetteki demiryolu geçişine ait birer örnek Şekil 2'de görülmektedir.

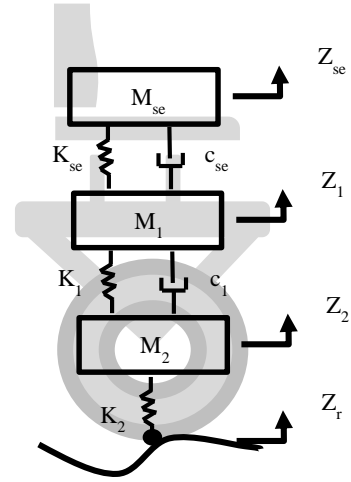


Şekil 2. İnceleme yapılan D (a), O (b) ve Y (c) şiddetindeki demiryolu geçişi örnekleri

2.5 Çeyrek taşıt modeli

Bir aracın davranışını, yol yüzeyine karşı verdiği tepkileri simüle etmek için dinamik taşıt modelleri kullanılmaktadır. Taşıt modelleri tek, iki ya da dört tekerleği betimleyen ayrı kütlelerden, yaylardan, sürtünme elemanlarından ve amortisörlerden oluşur [24]. Üstyapı profil verilerinin analiz edilmesinde uygulanan çeyrek taşıt simülasyon kavramı, Kamu Yolları Bürosu (Bureau of Public Roads)'nun uzun yıllardır devam ettirdiği model çalışmalarına dayanmaktadır. Michigan Üniversitesi'nde yapılan araç simülasyon çalışmalarının ışığında tüm-arac ve yarım-arac simülasyon modellerinin çeyrek-arac simülasyon modellerinin üzerinde bir avantaj sağlamadığı sonucuna varılmıştır [25]. Çok yüksek olmayan sürüş hızlarında çeyrek taşıt modellemesi yapılırken lastik sönümleme etkisinin oldukça küçük seviyede kaldığı dolayısıyla ihmal edilebileceği bilinmektedir [14]. Ağırlıklandırılmış titreşim değerlendirmesinde dinamik taşıt modeline girdi olarak

kullanılan yol profilinin sayısal olarak ifade edilmesinde lastik noktası temas modeli ve hareketli ortalama profil modeli yaklaşımları arasında marjinal bir farkın oluşmadığı bilinmektedir [26]. Ayrıca yapılan analizlerde sürüş hızı arttıkça farkın çok daha azaldığı görülmektedir [26]. Çalışmada kullanılan ve sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşimi ifade ettiği kabul edilen çeyrek taşıt modeli MATLAB® tabanlı bir grafik programlama ortamı olan Simulinkte modellenmiş ve kullanılan simülasyon parametreleri Şekil 3 ve Tablo 3'de görülmektedir.



Şekil 3. Çeyrek taşıt modeli şematik gösterimi [16]

Tablo 3. Simülasyonda kullanılan model parametreleri [16]

Model Parametreleri	Değeri	Birimi
M_{se} Koltuk ve sürücü kütlesi	110	kg
M_1 Aracın dörtte biri yaylı kütlesi	274	kg
M_2 Aracın dörtte biri yaylı olmayan kütlesi	41.1	kg
K_{se} Koltuk süspansiyonu yay sertliği	8000	N/m
K_1 Araç süspansiyon yay sertliği	17344.2	N/m
K_2 Lastik sertliği	178922	N/m
Koltuk süspansiyonunun sönümleme oranı	3000	Ns/m
c_1 Araç süspansiyonunun sönümleme oranı	1644	Ns/m
Z_r Yol profili		

Taşıt modellemesinde kullanılan parametrelerin nümerik değerleri ve oranları IRI kalibrasyonu için kullanılan değerlere uygun olacak şekilde belirlenmiştir [27]. Kullanılan çeyrek taşıt simülasyon modelini matematiksel olarak Denklem (6), Denklem (7) ve Denklem (8)'de tanımlamak mümkündür.

$$M_{se}\ddot{Z}_{se} + K_{se}(Z_{se} - Z_1) + c_{se}(\dot{Z}_{se} - \dot{Z}_1) = 0 \quad (6)$$

$$M_1\ddot{Z}_1 - K_{se}(Z_{se} - Z_1) - c_{se}(\dot{Z}_{se} - \dot{Z}_1) + K_1(Z_1 - Z_2) + c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) = 0 \quad (7)$$

$$M_2\ddot{Z}_2 - K_1(Z_1 - Z_2) - c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + K_2(Z_2 - Z_r) = 0 \quad (8)$$

2.6 Yapay yol profili

Yüzeysel yol yükselteleri (kot farkları), yol boyunca ilerleyen kara araçlarında rasgele titreşimlere neden

olmaktadır. Bu nedenle, bir taşıtın dinamik yanıtını önceden tahmin ederken gerçekçi bir yol modeli kullanmak oldukça önemlidir. Bir yolun profili, yol üzerinde ve yola paralel olarak ölçülen yuvarlanma yüzeydeki kot değişiklikleri olarak tanımlanmaktadır. ISO 8608 standardı yol profili sinyallerinin güç spektral yoğunluğu (Power Spectral Density, PSD) analizlerine göre, konumsal frekans $n_0=0.1$ döngü/m ve açılal konumsal frekans $\Omega_0=1$ rad/m değerlerine karşılık gelen bir sınıflandırma önerisi getirmektedir [12]. Standartta yolun profiline ait PSD değerini kullanarak sekiz ayrı üstyapı kalitesi sınıfı (A, B, C, D, E, F, G, H) önerilmiştir. Burada sürüş kalitesi açısından A sınıfı en iyi yolu H ise en kötü yolu temsil etmektedir.

Standartta, rasgele yer değiştirmelerin fourier dönüşümü ile elde edilen yol profil kotlarının PSD analizi değerlendirilmesi ile bir yapay yol profili üretilmesi mümkün olabilmektedir [13]. Yapılan bazı araştırmalarda eğer düşey yer değiştirmelerin PSD fonksiyonu biliniyorsa, bir A_i genliğinde ve n_i konumsal frekansında basit harmonik bir kosinüs fonksiyonu ifadesini kullanarak ve 0 ile 2π aralığında tekdüze bir olasılık dağılımına rastgele bir faz açısı φ_i ekleyerek yapay bir yol profili oluşturmanın mümkün olduğu görülmektedir [24, 28]. Yapay yol profili sayısal olarak Denklem (9)'da ifade edilebilmektedir.

$$h(x) = \sum_{i=0}^N A_i \cos(2\pi n_i x + \varphi_i) \quad (9)$$

Yapılan stokastik değerlendirme kabulünde modifiye edilmiş yol profil sinyalinin genliği (A_i) yerine düşey yer değiştirmenin PSD'si ifadesi yerleştirilerek ISO 8608 standardına uygun yapay bir yol profili Denklem (10)'la oluşturulabilmektedir [13, 24, 29].

$$h(x) = \sum_{i=0}^N \sqrt{\Delta n} 2^k 10^{-3} \left(\frac{n_0}{\Delta n} \right) \cos(2\pi i \Delta n x + \varphi_i) \quad (10)$$

Bu denklemde x , 0'dan L 'ye (profil toplam uzunluğu) kadar yatay profil uzunluğunu göstermektedir. Δn profilin sinyal aralığını, N profildeki toplam düşey yer değiştirme sinyal (nokta) sayısını, i 0'dan N 'e kadarki sinyalin sırasını ifade etmektedir. k katsayısı standartta tarif edilen yol profili sınıflarına göre A sınıfından H sınıfına kadar (A, B, C, D, E, F, G, H) yol sınıflarına (aslında kastedilen yol üstyapısı) karşılık gelen 3'ten 9'a kadar artan tam sayı değeri alabilen sabit bir değerdir. Ayrıca $n_0=0.1$ döngü/m değerini ve $\varphi_i = 0-2\pi$ aralığında düzgün bir olasılık dağılımını izleyen rastgele faz açısı betimlemektedir.

3 Kalibrasyon ve bulgular

Yol yüzeyinin sürüşe etkisini analiz edebilmek için yapay yol profillerinin kullanıldığı ve bu yöntemin taşıt süspansiyon tasarımında oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Fakat üstyapı bozulmalarının değerlendirilmesinde ve onların kullanıcılar üzerindeki etkisinin tespit edilmesinde tam olarak yeterli olmayabileceği için arazi ölçümleri ile mutlaka kalibre edilmeleri gerekmektedir [14, 30]. Çalışmanın bu aşamasında öncelikli olarak geometrisi bilinen yol kesimlerinde yapılan titreşim ölçümleri ile dinamik taşıt

modeli kalibrasyonu ve sonrasında farklı şiddet seviyelerindeki demiryolu geçişlerinde rayların ve hatların arasındaki yol (üstyapı) profili karakterize edilmiştir.

3.1 Taşıt dinamik modelinin kalibrasyonu

Çalışmada MATLAB® Simulink arayüzünde oluşturulan taşıt modeli kalibre edilmiştir. Bu amaçla, bir yolcu otomobili ile profili bilinen bazı yol kesimlerinde titreşim ölçümleri yapılmıştır. İncelenen kesimler, kesimin tam ortasında geometrisi bilinen bir dar hız kesici tümsek (HKT) olacak şekilde belirlenmiştir. Ölçümlerde yardımcı olması için ölçüm mesafeleri yol yüzeyine işaretlenmiştir. Taşıtın farklı yol profilindeki tepkilerini tam belirlemek için iki farklı geometride HKT'in olduğu test kesimleri tercih edilmiştir. Bunun yanında yüzey profilini daha sağlıklı yaratabilmek için tercih edilen test kesimlerinde HKT'lerin öncesinde ve sonrasında yüzey bozulmalarının olmamasına ve ISO 8608 standardına göre A sınıfına uyan bir yol profili olmasına özen gösterilmiştir. Titreşim ölçümü yapılan test kesimleri üzerinde bulunan HKT'lerin boyutları Tablo 4'de görülmektedir.

Tablo 4. Kalibrasyonda kullanılan HKT'lerin geometrik bilgileri

HKT	Genişlik (cm)	Yükseklik (cm)	Y/G Oranı
HKT1	40	5	0.125
HKT2	75	10	0.133

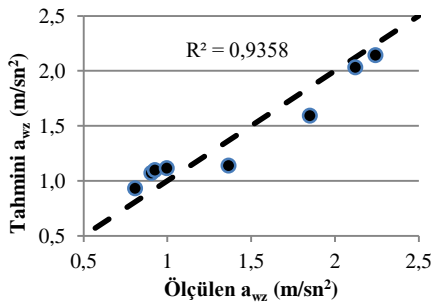
Her bir HKT'nin öncesinde ve sonrasında beş metre mesafe olacak şekilde titreşim ölçümleri yapılmıştır. Yani test kesimlerinde titreşim ölçümleri $5 \text{ m} + \text{HKT genişliği} + 5 \text{ m}$ uzunluklarında ve 20, 30, 40 ve 50 km/sa sürüş hızlarında tekrar edilmiştir. Sürüş esnasında titreşim ölçümlerini etkileyecek ani rüzgar, ani ivme, engele yanaşma açısı vb. çok sayıda etken bulunması sebebiyle ölçümler en az üç defa tekrarlanarak analiz için birbirlerine yakın ve anlamlı olanlardan biri seçilmiştir. En az üç ölçüm yapılmasının sebebi ölçümlerin kendi içinde tutarlılıklarının kontrol edilmek istenmesidir. Titreşim ölçümleri bir süreklilik içerdiğinden dolayı ölçümleri genelleyen bir istatistik gösterim (ortalama vb.) ile ifade etmek kendi içerisinde tutarsızlıklara neden olabilecektir. Bu nedenle çok sayıda ölçümden anlamlı görülen biri analiz değeri olarak kabul edilmiştir. Ölçülen titreşim verileri ISO 2631 standardında belirtilen yöntemle işlenmiş her bir ölçüme ait titreşimin ortalama değerini ifade eden a_{wz} değeri hesaplanmıştır. Çalışmada titreşimin insan sağlığı üzerine olan olumsuz etkileri değerlendirilmiş, VDV ve S_e titreşim parametreleri kullanılmış olmasına rağmen kalibrasyon a_w parametresi aracılığıyla tamamlanmıştır. Bunun sebebi VDV ve S_e parametrelerinin titreşime karşın maruziyetin özel durumlarını açıklamak amacıyla kullanılmasıdır. Bu parametreler titreşimin genel değişimini yansıtmamaktadırlar.

Sonrasında, bu test kesimlerinin profilleri HKT öncesi ve sonrası yapay yol profili (k katsayısı 3 alınarak) yardımıyla ve HKT geometrisi ise bir yay olarak sayısallaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan ivme ölçüm seti anlatılırken saniyede 1000 adet ivme sinyalinin (1000 Hz) okunduğunun altı çizilmiştir. Benzer şekilde dinamik taşıt modelinin

tepkilerinin benzer olabilmesi varsayımıyla, bu sayısallaştırmada tüm düşey profil kot değerleri ölçüm hızına bağlı olarak kesim uzunluğunun süre karşılığı boyunca her bir saniyede 1000 adet kot değeri olacak şekilde profil sinyalleri üretilmiştir. Kalibrasyon ölçümlerinde taşıt hızları tamsayılarla olacak şekilde planlansa da ölçümler sırasında kaydedilen verilerden bu hızların planlanandan biraz farklılaştığı görülmüştür. Bu nedenle kalibrasyon işleminin gerçekliğini kaybetmemesi amacıyla ölçüm hızı olarak sahada kaydedilen hızlarla değerlendirmeler tamamlanmıştır.

Kalibrasyon işleminin daha sağlıklı ve kontrollü yapılması için titreşim ölçümleri sürücü koltuğu üzeri ve taşıt zemininden (ayak hizası) yapılmıştır. Tüm ölçümler ağırlığı 80 kg olan tek bir sürücü ile tamamlanmıştır. Kalibrasyon, belirlenen test kesimlerinde yapılan ölçümlerden sonra kaydedilen titreşimler ve dinamik taşıt modeli aracılığıyla yapılan simülasyonlar ile elde edilen titreşimlerin zaman tanım alanında karşılaştırılmasına dayanmaktadır [5, 31]. MATLAB® Simulink yazılımı ile öncelikle taşıt yer seviyesinde (zeminde) ve sonra sürücü koltuğu üzerinde kaydedilen titreşimleri elde edebilmek için simülasyonu zorlayarak, belirlenen ölçüm hızlarında model parametresine yardımcı sabit değerlerin hesaplaması tamamlanmıştır.

Lokal düzensizlikler olan tümsekler, yaygın düzensizlik durumundan farklı olarak araca bir şok ivme etki ettirmektedir. Bir tümseğin öncesinde ve sonrasında minimum düzeyde kot değişimi olmasına rağmen kısa bir mesafede önemli bir kot değişimi olduğu halde model ve kalibrasyonu oldukça yüksek doğrulukta titreşim değerleri elde edebilmiştir. Sürücü koltuğu üzerinden sahada ölçülen titreşimler ve kalibre dinamik model ile simüle edilen titreşimlerin analizi sonucu bulunan a_{wz} parametreleri arasında regresyon benzerliği 0.9358 olarak bulunmuştur. Bahsedilen bu karşılaştırma Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Ölçüm ve tahmin yoluyla bulunan a_{wz} parametrelerinin karşılaştırılması [16]

3.2 Bozulma şiddetine göre yol profili

Kalibrasyonun ikinci aşamasında D, O ve Y bozulma şiddetindeki demiryolu geçişlerinde raylar arasındaki açıklıklarda ve hatlar dışındaki mesafelerde (hat öncesi ve sonrası ile iki hat arası) kabul edilebilecek yol profilleri tespit edilmiştir. Bu amaçla, çift hatlı bir demiryolunun hemzemin geçitlerinden geçişlerde sürücü koltuğu üzerinden muhtelif sürüş hızlarında titreşimler okunmuş ve a_{wz} parametre değerleri belirlenmiştir. Çift hatlı bir demiryolu geçişi için

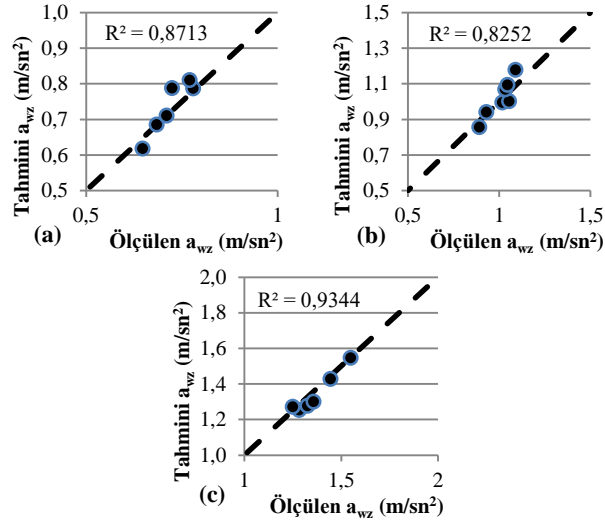
ölçülen kesim uzunluğu belirlenirken demiryolu hatları öncesi ve sonrası 3.5 metre yanaşma ve uzaklaşma uzunlukları kabul edilmiştir. Bu uzunluklar yolcu otomobili türü bir taşıtın iki dingili arası açıklığını gösterir bir değerdedir. Bu değer seçilmesinin sebebi bu çalışmada yalnızca demiryolu geçişi türü bozulma değerlendiriliyor olmasıdır. Eğer daha uzun mesafeler değerlendirilecek olsa, yol üstyapılarında görülen olası başka tür bozulmalarla da karşılaşılabilirdi çok açıktır. Daha kısa mesafelerde yapılan değerlendirilmelerde ise taşıtın bütününe tepkilerinin algılanamayacağı gerçeği ile karşılaşılmaktadır. İki demiryolu hattı arası mesafe ise 3 m olarak kabul edilmiştir. Bu değer titreşim verilerinin toplandığı saha çalışmalarında ölçülerek bulunmuştur. Ölçümü yapılan demiryolu hat genişliği normal hat genişliğinde olup 1.5 m’dir. Ray geçişlerinde karayolu taşıtlarına yuvarlanma kolaylığı sağlamak amacıyla oluk kesitli rayların kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca saha değerlendirmesi yapılan demiryolu hatlarında da aynı ray türü bulunduğundan oluşturulan sayısal yol profilinde yaklaşık 10 cm genişliğinde oluklu ray modellenmiştir. Nedeni yukarıdaki şekilde izah edilen demiryolu hemzemin geçişi bozulma kesiminin toplam uzunluğu 13 m olarak kabul edilmiştir.

Saha ölçümlerinde ASTM D 6433 standardında tanımlanan bozulma açıklamalarına ve bozulma görüntülerine dayanarak seçilen demiryolu geçişlerinde bu uzunluktaki yol kesimlerinde ölçümler ve analizler tamamlanmıştır. Devamında bilgisayar ortamında benzer mesafelerde yol profilleri sayısal olarak oluşturulmuştur. Bu yol profilleri girdi oluşturularak kalibre edilen taşıt dinamik modeli oluşturulmuş ve sürücü koltuğu üzerindeki titreşim değerleri simüle edilmiştir. ISO 8608’e göre oluşturulan yol profilleri rasgelelik prensibi ile oluşturulduğu için her simülasyon sonucu aynı değerler bulunmamaktadır. Bu nedenle simülasyon ile bulunan tahmini a_{wz} değerleri modelin on defa tekrar koşutularak bulunan değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

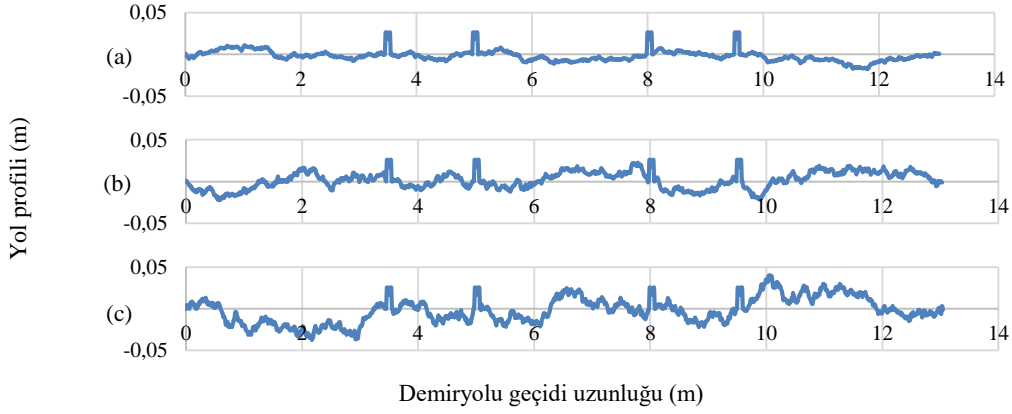
Yapılan titreşim analizleri sonuçlarına göre deneme yanılma yöntemiyle D şiddet seviyesi için k katsayısının 5 (C yol sınıfı), O şiddet seviyesi için k katsayısının 6 (D yol sınıfı) ve Y şiddet seviyesi için k katsayısının 7 (E yol sınıfı) seçilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. İlgili katsayılar seçilerek oluşturulan yol profil girdileriyle yapılan simülasyon sonucu üretilen a_{wz} parametre değerleri ile saha ölçümleri yapılarak hesaplanan a_{wz} parametre değerleri karşılaştırıldığında önemli benzerliklerin yakalanabildiği fark edilmektedir. Üç farklı bozulma şiddeti için değerlendirme sonuçları, regresyon benzerlikleri ve karşılaştırmalar Şekil 5’de görülmektedir.

4 Tartışma

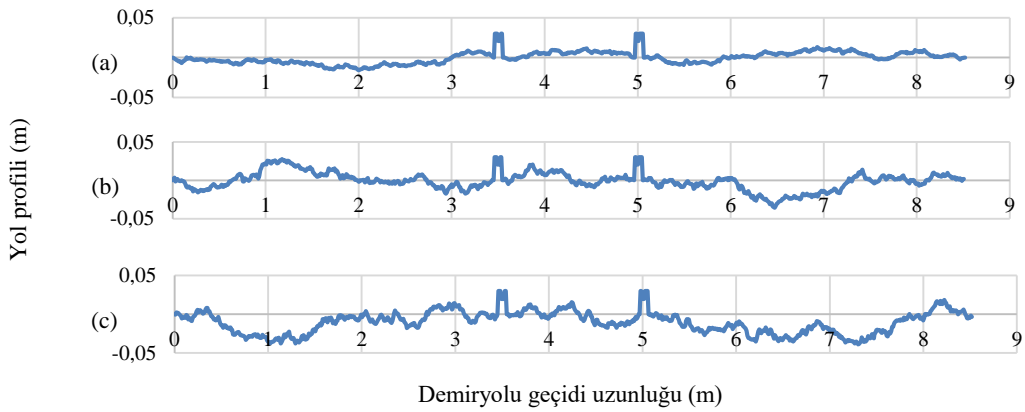
Çalışmanın sonraki bölümünde yolcu otomobili türü bir taşıtla çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT seviyeleri belirlenmiştir. MATLAB® yazılımı üzerinde yapılan kodlama ile önceki bölümde analizler sonucu tespit edilen yol sınıfı katsayılarını (k) dikkate alarak çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitleri için yol profilleri oluşturulmuştur. Okuyuculara yardımcı olmak amacıyla her bir bozulma şiddetinde



Şekil 5. D (a), O (b) ve Y (c) şiddetindeki demiryolu geçişi titreşim parametrelerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Çift Hatlı bir demiryolu geçidi D (a), O (b), Y (c) şiddetindeki yol profili [16]



Şekil 7. Tek Hatlı bir demiryolu geçidi D (a), O (b), Y (c) şiddetindeki yol profili [16]

demiryolu geçitlerinde oluşan yol profillerinin (diğer bir deyişle yol profil sinyallerinin) birer örneği sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7’de görülmektedir. Daha önce vurgulandığı üzere sürüş sırasında yalnızca demiryolu geçişlerinden kaynaklı TTV seviyelerini belirleyebilmek amacıyla çift hatlı

demiryolu geçidinde 13 m, tek hatlı demiryolu geçidinde ise 8.5 m uzunluktaki kesimde titreşimler benzetilmiştir.

Literatür detaylıca incelendiğinde yapılan çalışmalardan saha ölçüm verileri ile yapılan ağırlıklandırılmış titreşim analiz değerlendirmelerinde, aynı üst yapı kesiminde aynı taşıtla ve aynı hızla yapılan ölçümlerde dahi %17’ye varan

farkların oluşabildiği anlaşılmaktadır [7, 11]. Gerçek durumu simüle edebilmek amacıyla bu çalışmada rayların arasında bulunan açıklıklarda yol profil sinyalleri ISO 8608'e göre üretilmiştir. ISO standardının önerdiği üzere yol profil sinyalleri her bir simülasyonda tekrar üretilmekte gerçek arazi koşullarını oldukça gerçekçi yansıtmaktadır. Bu durum önce yol profilinin oluşturulması sonra taşıt dinamik tepkileri ile sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşim sinyallerinin üretilmesi ve en son olarak titreşim parametre değerinin hesaplanması şeklinde çalışan simülasyon yordamının her çalıştırıldığında belli oranda sapmaların olduğu sonuç değerlerin üretilmesi ile sonuçlanmaktadır. Çalışmada çift hatlı ve tek hatlı demiryolu geçitlerinde TVT değerleri kalibre edilen dinamik simülasyon modeli kullanılarak üretilmiştir. Titreşim sinyallerinin üretiminde 10, 20, 30, 40 ve 50 km/sa kentsel hız aralıklarında taşıt sürüş hızları dikkate alınmıştır. Elde edilen titreşim verileri TVT'nin genel olarak insan sağlığına olumsuz etkileri açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla ISO 2631-1 standardında teknik kriterleri açıklanan ve titreşimin sağlığa olumsuz etkilerini ifade etmek amacıyla kullanılabilen VDV parametresi kullanılmıştır. Aynı zamanda maruz kalınan düşey doğrultudaki titreşiminin omurilik üzerinde oluşturduğu baskı sonucu muhtemel olumsuzluklar üzerine de bir değerlendirme yapılmıştır. Bu maksatla ISO 2631-5 standardında izahatı yapılan ve teorik olarak titreşimin omurilik üzerindeki olumsuzluğunu ifade etmede kullanılabilen biyomekanik modelin sonucu olarak kabul edilen S_e parametresi kullanılmıştır. Değerlendirmesi yapılan tüm parametrelerin sayısal değerlerinin standartlarda önerilen eşik değerler açısından kıyaslaması ve yorumlaması yapılmıştır.

4.1 İnsan Sağlığını Olumsuz Etkileme Seviyeleri

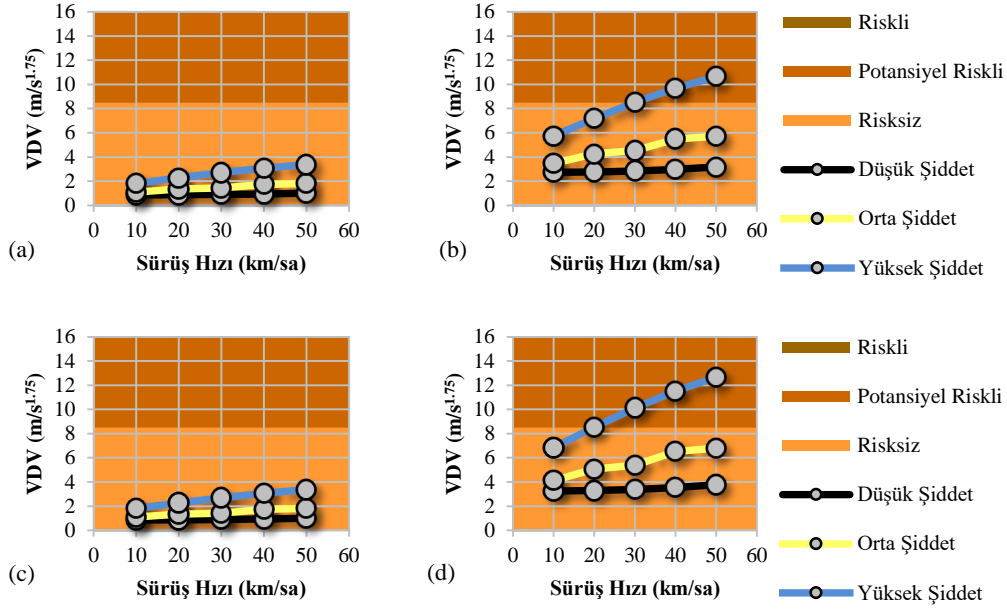
Çalışmada demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan titreşimin insan sağlığı üzerine olumsuz etki seviyeleri araştırılmıştır. Bu bölümde titreşim değerlendirme yöntemlerinin taşıt içerisindeki sürücünün maruz kaldığı mekanik şok miktarı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Titreşimin insan üzerindeki olumsuz etkileri, bu amaçla sıklıkla kullanılan ISO 2631 standardında açıklanan VDV ve S_e bileşenleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinin yapay yol profilleri oluşturularak dinamik simülasyon modeli ile üretilen titreşim verilerinden VDV ve S_e parametreleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerde VDV ve S_e parametrelerinin tek bir geçişte ve günlük maruziyet değeri olarak kabul edilebilecek 100 ve 200 defa geçişlerde alacağı değerler belirlenmiştir. Bu değerler herhangi bir bilgi veya teoriye dayanmaksızın çoklu geçişlerdeki değişimi ortaya koyabilmek amacıyla olası geçiş sayısı olarak öngörülerek seçilmiştir.

Analizler sonucunda beklendiği üzere sürüş hızı arttıkça VDV değerinin arttığı görülmektedir. Yapılan tüm değerlendirmeler sonucu elde edilen VDV değerleri ve değişimleri çift hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 8'de ve tek hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 9'da grafik olarak açıklanmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9'da çift ve tek hatlı demiryolu geçitleri tek bir geçiş ve çok sayıda geçişi örneklemek

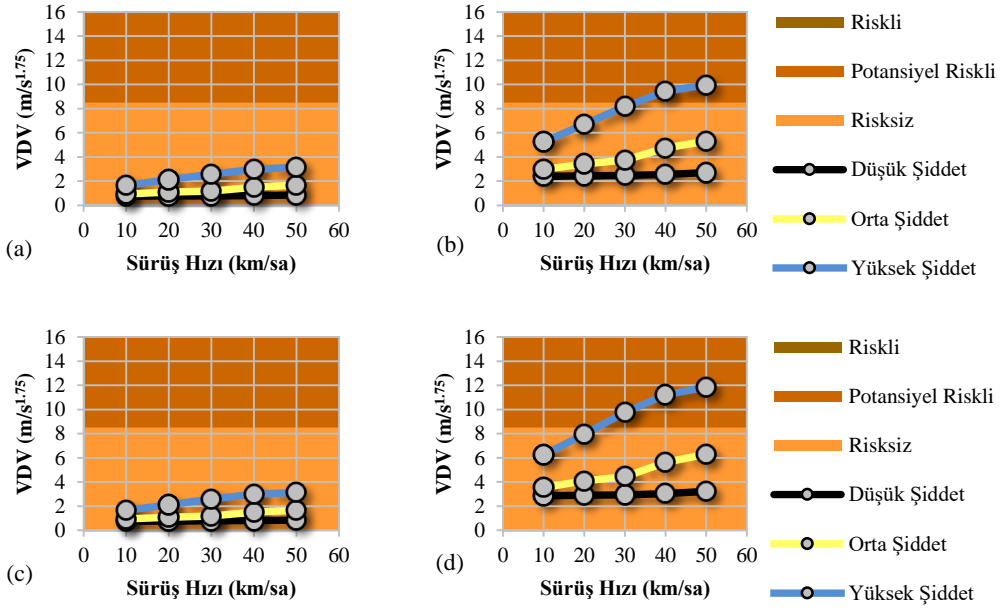
amacıyla 100 ve 200 adet geçiş için yan yana gösterilmiştir. Bu sebeple grafikleri anlamada yardımcı olan antetler yalnızca birer defa yerleştirilmiştir. VDV değerinin artışında birinci öncelikli etkenin bozulma şiddeti olduğu açıkça görülmektedir. Sürüş hızındaki artışa paralel olarak D şiddetteki demiryolu geçidi VDV değeri çok fazla artmamasına rağmen Y şiddetteki demiryolu geçidi VDV değerlerinde dramatik bir artış göze çarpmaktadır. D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde özellikle düşük hızlarda VDV değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Tek geçişte tüm şiddet seviyelerinde gerek çift hatlı gerekse tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde oluşan TVT, standartta tanımlanan VDV ölçüğüne göre insan vücudunun olumsuz etkilenmediği sağlık riski açısından risksiz sınırlarında kaldığı görülmektedir. Çift hatlı ve Y şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinde günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli sınırlarına geçilmektedir. Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta olumsuz bir etkinin görüldüğü sağlık riski açısından riskli kabul edilecek bir seviyeye ulaşılmamaktadır.

Çift hat ve tek hat demiryolu hemzemin geçitleri kendi aralarında kıyaslandığında çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı TVT analizi sonucu bulunan VDV değeri tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olmaktadır. Bozulma şiddetlerine göre bu kıyaslama yapıldığında tek hatlı demiryolu geçidinde D şiddette hızın artışı ile VDV değerinde ortalama %3 oranında, O şiddette ortalama %11 ve Y şiddette ortalama %20 oranında artış olduğu görülmektedir. Bu değişimler çift hatlı demiryolu geçitlerinde D şiddette %3, O şiddette %13 ve Y şiddette %25 oranında ortalama değerlere karşılık gelmektedir. D şiddette tek hat ve çift hat geçitlerde bir farklılık olmamaktadır. Öte yandan hızın artışı ile O ve Y şiddette çift hat geçişin tek hata nazaran daha fazla sağlık riskini ortaya çıkardığı çok açıktır. Bu değerlerin değişimi dikkate alındığında tek hatlı demiryolu geçitlerinde hızın artışı ve bozulma şiddetinin kötüleşmesine bağlı olarak VDV değerleri ortalama %11 oranında artmakta iken çift hatlı demiryolu geçitlerinde bu değer %14 olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmada son olarak titreşimin lomber omurda üzerine olumsuz etkisini sayısal olarak betimlemek için, maruz kalınan TVT'i S_e parametresi açısından değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede de analizler VDV değerlendirmesi ile aynı kriterler dikkate alınarak tamamlanmıştır. Yapılan tüm değerlendirmeler sonucu elde edilen S_e değerleri ve değişimleri çift hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 10'da ve tek hatlı demiryolu geçitleri için Şekil 11'de grafik olarak gösterilmiştir. S_e parametresinin değerlendirilmesinde hem çift hatlı hem de tek hatlı demiryolu geçidinden tek bir geçişte tüm hızlarda ISO 2631 standardına göre düşük olasılıklı sağlık riski (SR) sınırlarında kalmaktadır. 200 defa geçişlerde S_e parametresi Y şiddet seviyesine sahip çift hatlı demiryolu hemzemin geçidinde 50 km/sa ve üzerinde hızlarda orta olasılıklı SR etki sınırında kalmaktadır.



Şekil 8. Çift hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin VDV değerleri



Şekil 9. Tek hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin VDV değerleri

Değerlendirilen diğer sorgulamaların tamamında düşük olasılıklı SR sınırlarında kalınmaktadır.

D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde S_e değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği görülmektedir. Y şiddetindeki demiryolu geçitlerinde D ve O şiddetinden farklı olarak hızın artışı ile kayda değer bir SR artışının olduğu dikkat çekmektedir. Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir

SR oluşturacak olumsuz etkilenme seviyesine ulaşmamaktadır.

Çift hat ve tek hat demiryolu geçitleri kendi aralarında kıyaslandığında çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı TVT analizi sonucu bulunan S_e değeri tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazla olmaktadır. Bozulma şiddetlerine göre bu kıyaslama yapıldığında tek hatlı demiryolu geçidinde D şiddette hızın artışı ile S_e değerinde ortalama %3 oranında, O şiddette

ortalama %16 ve Y şiddette ortalama %18 oranında artış olduğu görülmektedir. Bu değişimler çift hatlı demiryolu geçitlerinde D şiddette %4, O şiddette %14 ve Y şiddette %17 oranında ortalama değerlere karşılık gelmektedir. Hızın artması ile D şiddetinde tek hat geçitler çift hat geçitlere nazaran %1 daha az SR oluşmasına neden olmaktadır. Tam tersi olarak hızın artışı ile O şiddette çift hat geçitlerde tek hat geçitlere nazaran %2 daha az ve Y şiddette %1 oranında daha az SR oluşması dikkat çekmektedir. Bu durum hızın artması ile çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde oluşan SR'inde çok küçük oranlarda farklılıklar olsa da aslında çift hat veya tek hat geçişlerinde dikkate değer bir farklılığın oluşmadığını düşündürmektedir. Öte yandan hızın artışı ile O ve Y şiddette çift hat geçişin tek hata nazaran daha fazla sağlık riskini ortaya çıkardığı çok açıktır. Bu değerlerin değişimi dikkate alındığında tek hatlı demiryolu geçitlerinde hızın artışı ve bozulma şiddetinin kötüleşmesine bağlı olarak S_e değerleri ortalama %12 oranında artmakta iken çift hatlı demiryolu geçitlerinde bu değer %11 olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2 İnsan sağlığını olumsuz etkileyen geçiş sayıları

Çalışmada demiryolu hemzemin geçitlerinde TVT'nin insan sağlığını olumsuz etkilediği ve hasar bırakma potansiyelinin olduğu geçiş sayıları da (N) tespit edilmiştir. Bu bilgi ISO 2631 standardında belirtilen S_e ve VDV bileşenlerinin eşik değerlerine hangi sayıda geçişle ulaşıldığının belirlenmesi ile açıklanmaktadır. N sayıları,

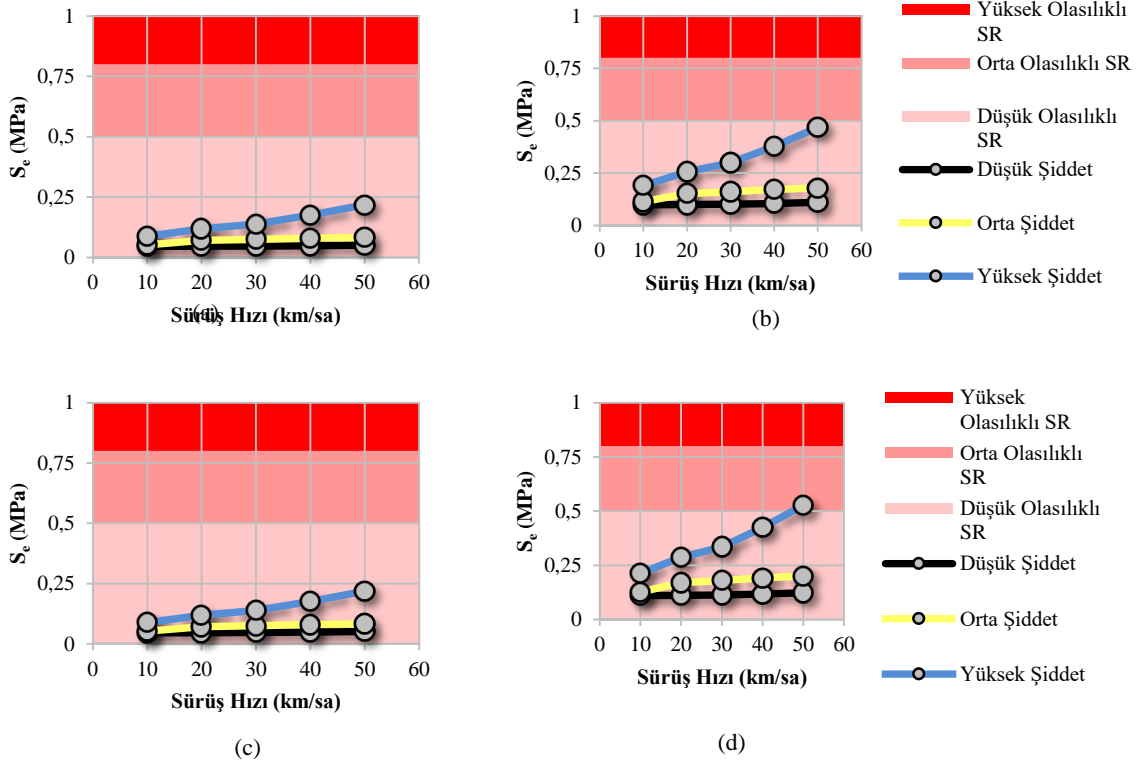
titreşimin insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini ifade eden VDV ve S_e bileşenlerinin günlük titreşim maruziyetini ifade eden yaklaşımlardan (2 ve 5 eşitlikleri) türetilerek elde edilmektedir [32]. Bu maksatla, günlük çok sayıda geçiş ifade eden VDV_d bileşeninin eşik değeri olarak belirlenen değerine göre (ISO 2631-1 standardında $8.5 \text{ m/s}^{1.75}$) maksimum geçiş sayısı $N_{8.5}$ Denklem (11) ile ifade edilebilmektedir.

$$N_{8.5} = \left(\frac{8.5}{VDV_d} \right)^4 \quad (11)$$

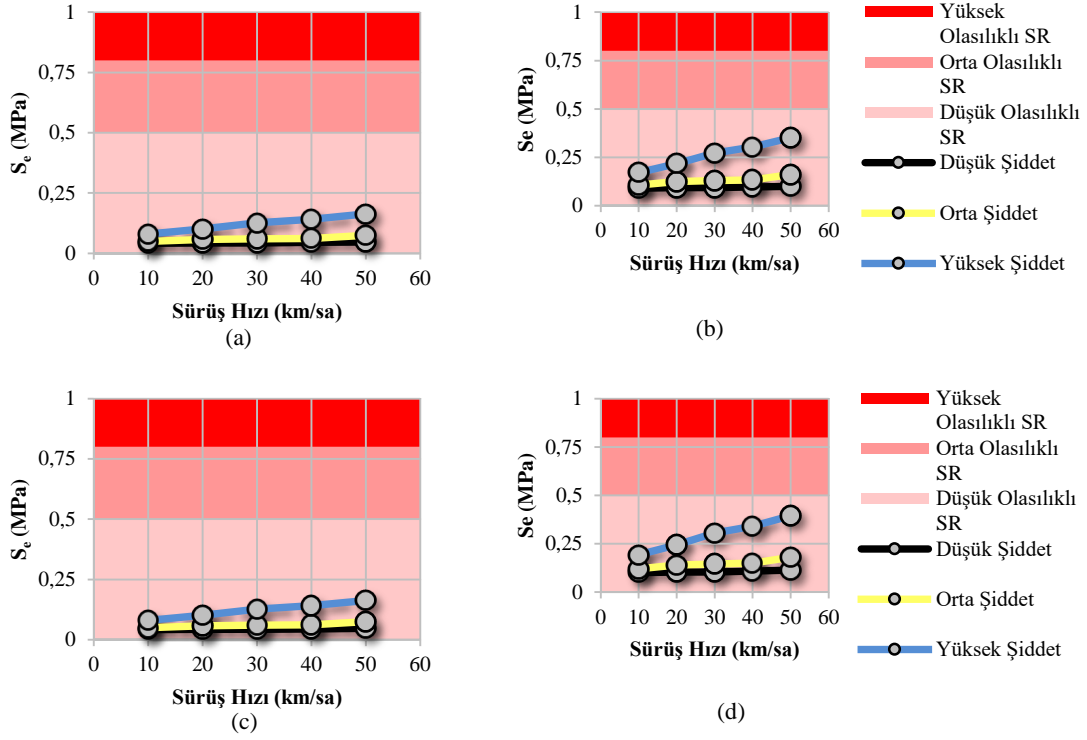
Benzer şekilde, günlük çok sayıda geçiş ifade eden S_{ed} bileşeninin eşik değeri olarak belirlenen değerine göre (ISO 2631-5 standardında 0.5 MPa) maksimum geçiş sayısı $N_{0.5}$ Denklem (12) ile ifade edilebilmektedir.

$$N_{0.5} = \left(\frac{0.5}{S_{ed}} \right)^6 \quad (12)$$

Çalışmada incelenen çift hatlı ve tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinin her biri için ISO 2631 standardında titreşimin olumsuz etkisini gösteren her iki bileşenin farklı sürüş hızlarında insan sağlığını olumsuz etkileyebilecek geçiş sayıları Tablo 5'de görülmektedir.



Şekil 10. Çift hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin S_e değerleri



Şekil 11. Tek hatlı demiryolu geçitlerinden tek geçiş (a)(c), 100 adet geçiş (b) ve 200 adet geçiş (d) sonucu maruz kalınan titreşimin S_e değerleri

Tablo 5. Sağlığın olumsuz etkilendiği eşikleri ifade eden demiryolu hemzemin geçidi geçiş sayıları

		Bozulma Şiddeti	Sürüş Hızı (km/sa)				
			10	20	30	40	50
Çift Hatlı Demiryolu Geç.	$N_{8,5}$ $VDV_d(m/s^{1.75})$	D	9490	8908	7943	6646	5155
		O	3581	1583	1244	576	490
		Y	479	196	99	59	41
	$N_{0,5}$ $S_{ed}(MPa)$	D	1756167	1614890	1452988	1201548	874658
		O	760980	127064	92271	61123	47909
		Y	33051	5569	2205	532	147
Tek Hatlı Demiryolu Geç.	$N_{8,5}$ $VDV_d(m/s^{1.75})$	D	15542	14504	13874	12141	9758
		O	6602	3732	2668	1032	664
		Y	681	259	115	66	53
	$N_{0,5}$ $S_{ed}(MPa)$	D	2934551	2477208	2437926	1906316	1496697
		O	1064067	424546	333984	280835	91659
		Y	60991	14686	3872	2007	832

Hızın ve demiryolu geçişi türü bozulmanın şiddetinin artması ile insan sağlığını etkileyebilecek geçiş sayılarının sınırları dramatik bir şekilde azalmaktadır. Veriler incelendiğinde tek hatlı demiryolu geçitlerinin çift hatlı demiryolu geçitlerine göre çok daha fazla geçişe imkan tanıdığı fark edilmektedir. Demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT'den lomber omurganın olumsuz etkilenme sınırlarının insan vücudunun genel olarak etkilenme sınırından, başka bir deyişle S_e parametresinin VDV parametresinden çok daha iyimser bir eğilimde olduğu açıktır. Başka bir bakış açısında göre titreşimin olumsuz etkilerinden tüm vücudun olumsuz etkilenmesinin lomber omurganın olumsuz etkilenmesinden daha önce olacağı anlaşılmaktadır. Analizlerde en olumsuz şartları ifade eden Y şiddet düzeyinde çift hatlı demiryolu geçitlerinde ve 50 km/sa sürüş hızında dahi sağlığın olumsuz etkilenmesi VDV parametresine göre 41 geçiş sayısında oluşuyor iken S_e

parametresine göre 147 geçiş sayısında oluşmaktadır. Y şiddet düzeyinde tek hatlı demiryolu geçitlerinde ise sağlığın olumsuz etkilenmesi VDV parametresine göre 53 geçiş sayısında oluşuyor iken S_e parametresine göre 832 geçiş sayısında oluşmaktadır. Yapılan bu değerlendirmeler ışığında aşağıda belirtilen tespitler elde edilmiştir.

- VDV ve S_e parametre değerlerinin artışında birinci öncelikli etken bozulma şiddeti ve sürüş hızıdır.
- D ve O şiddetteki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde hızın artışı ile VDV değerleri birbirlerine yakın ve nispeten küçük artışlarla seyrederken Y şiddetinde geçidi VDV değerlerinde dramatik bir artış oluşmaktadır.
- VDV değerleri tek geçişte tüm şiddet seviyelerinde gerek çift hatlı gerekse tek hatlı demiryolu hemzemin geçitlerinde insan vücudunun olumsuz etkilenmediği sağlık riski açısından risksiz sınırlarında kalmaktadır.

- Çift hatlı ve Y şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinde günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli sınırlarına geçilmektedir.
- Çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunun maruz kaldığı titreşim kaynaklı genel olumsuzluk tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olmaktadır.
- S_e parametresinin değerlendirilmesinde hem çift hatlı hem de tek hatlı demiryolu geçidinden tek bir geçişte tüm hızlarda ISO 2631 standardına göre düşük olasılıklı sağlık riski (SR) sınırlarında kalınmaktadır.
- 200 defa geçişte S_e parametresi Y şiddet seviyesine sahip çift hatlı demiryolu hemzemin geçidinde 50 km/sa ve üzerinde hızlarda orta olasılıklı SR etki sınırında kalınmakta ve diğer sorgulamaların tamamında düşük olasılıklı SR sınırlarında kalınmaktadır.
- D ve O şiddetindeki demiryolu geçitlerinde hem tek geçiş hem de çoklu geçişlerde S_e değerlerinin oldukça birbirine yakın değerlerde seyrettiği, Y şiddetinde ise hızın artışı ile kayda değer bir SR artışının olduğu dikkat çekmektedir.
- Çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defa geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir SR oluşturacak olumsuz etkilenme seviyesine ulaşılmamaktadır.
- Çift hatlı demiryolu geçidinde insan vücudunda lomber omurganın maruz kaldığı olumsuzluk seviyesi tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazladır.
- Demiryolu hemzemin geçitlerinde maruz kalınan TVT'den lomber omurganın olumsuz etkilenme sınırlarının insan vücudunun genel olarak etkilenme sınırından, başka bir deyişle S_e parametresinin VDV parametresinden çok daha iyimser bir eğilimde olduğu görülmektedir.

5 Sonuçlar

Yol üstyapılarının mevcut durumu o ülkenin ekonomik gelişmişlik seviyesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir [17]. Üstyapı yüzey bozulmaları kentsel yol ağlarında sıklıkla karşılaşılan ve sürücülere önemli miktarda rahatsızlık veren sorunların başında gelmektedir. Özellikle, trafiğin zorlayıcı etkilerinden (sinyalize düzenlemelerde yeşil sürenin kısa olması gibi) kaynaklı göreceli olarak yüksek hızla sürüş ihtiyacı gerekliliği bu rahatsızlığı katmerli hale getirmektedir. Çalışmada ASTM D 6433 standardında üç farklı bozulma şiddetinde ifade edilen bitümlü sıcak karışım üstyapılarda görülen demiryolu geçidi türü bozulmaların üzerinden taşıt ile geçişlerde maruz kalınan titreşimin insan sağlığı açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Analizlerde demiryolu hemzemin geçitlerinin farklı sürüş hızlarında ve farklı bozulma şiddetlerinde çift hatlı ve tek hatlı olmak üzere iki farklı yol kesiminde yolcu otomobili türü taşıt kullanıcılarının maruz kaldıkları TVT seviyeleri belirlenmiştir. Değerlendirmelerde ISO 2631 standardında izahatı yapılan titreşim değerlendirme parametreleri kullanılmıştır. Titreşimin insan sağlığı üzerine genel olumsuzluk etkisini ifade etmek amacıyla VDV parametresi ve insan sağlığının yanında lomber omurga üzerine olumsuz etkisini ifade etmek amacıyla S_e parametreleri kullanılmıştır.

Yapılan analizlerde titreşim parametre değerlerinin artışında öncelikle bozulma şiddeti ve sürüş hızının etkili olduğu görülmüştür. Taşıtların geçtiği hat sayısı açısından maruz kalınan genel olumsuzluğun çift hatlı demiryolu geçidinde tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %15 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Lomber omurganın maruz kaldığı olumsuzluk seviyesi açısından ise çift hatlı demiryolu geçidinde tek hatlı demiryolu geçidine nazaran %13 daha fazla olduğu görülmüştür. Otomobil türü taşıt kullanıcıları üzerinde çift hatlı ve yüksek şiddet seviyesindeki demiryolu geçitlerinden günlük 100 defa geçişlerde yaklaşık 30 km/sa sürüş hızından itibaren, 200 defa geçişlerde yaklaşık 20 km/sa sürüş hızından itibaren sağlık riski açısından potansiyel riskli durumun oluştuğu saptanmıştır. Öte yandan, çift hat ve tek hat demiryolu geçitlerinde günlük 200 defaya kadar geçiş aralığında vücutta yüksek olasılıklı bir sağlık riskinin oluşmadığı görülmektedir. Demiryolu hemzemin geçitlerinde hızın artması ile demiryolu geçişi türü bozulmanın düşük ve orta şiddet seviyelerinde olumsuzluk artışının göreceli olarak sınırlı seviyelerde olmasının yanında, bozulmanın yüksek şiddet seviyelerinde artış dramatik bir şekilde yüksektir.

Çalışma kapsamında geliştirilen ve kalibre edilen model otomobil türü taşıtın tepkilerini yansıtmakla sınırlandırılmış olmakla birlikte çalışmanın sonraki aşamalarında diğer taşıt türlerinin de analiz edilmesinin konuyu çok daha anlaşılır hale getirebileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Pavement performance levels causing human health risks. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 70 (10), 851-861, 2018. <https://doi.org/10.14256/jce.2120.2017>.
- [2] M. J. Griffin, Discomfort from feeling vehicle vibration. Vehicle System Dynamics, 45, (7-8), 679-698, 2007. <https://doi.org/10.1080/00423110701422426>.
- [3] ASTM D 6433, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D6433-20>.
- [4] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads. Construction and Building Materials, 116, 281-288, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.118>.
- [5] G. Cantisani and G. Loprencipe, Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. Journal of Transportation Engineering, 136 (9), 818-826, 2010. <https://doi.org/10.1061/ASCE/TE.1943-436.0000143>.
- [6] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement. ISO, Geneva, Switzerland, 1997.

- [7] P. Múčka, Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (4), 04020064, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000200>.
- [8] J. Zhang, L. Wang, P. Jing, Y. Wu, and H. Li, IRI Threshold Values Based on Riding Comfort. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146 (1), 04020001, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000144>.
- [9] X. Hou, X. Liang, S. Ma, and W. Hua, "The Analysis of the Correlation between International Roughness Index and Body Ride Comfort. Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), pp. 2554-2561, Harbin, China, 5-9 August 2009.
- [10] M. L. M. Duarte and G. C. de Melo, Influence of pavement type and speed on whole body vibration (WBV) levels measured on passenger vehicles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40 (3), 150, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1057-0>.
- [11] P. Múčka, International Roughness Index Thresholds Based on Whole-Body Vibration in Passenger Cars. *Transportation Research Record*, 2675 (1), 305-320, 2021. <https://doi.org/10.1177/0361198120960475>.
- [12] ISO 8608, Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data. ISO, Geneva, Switzerland, 1995.
- [13] H. Du, W. Li, D. Ning, and S. Sun, *Advanced Seat Suspension Control System Design for Heavy Duty Vehicles*, 1st Edition. Academic Press, London, UK, 2020.
- [14] T. Nguyen, B. Lechner, Y. D. Wong, and J. Y. Tan, Bus Ride Index – a refined approach to evaluating road surface irregularities. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (2), 423-443, 2019. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1625806>.
- [15] P. Múčka, Sensitivity of Road Unevenness Indicators to Distresses of Composite Pavements. *International Journal Pavement Research Technology*, 8 (2), 72-84, 2015. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(2\).72](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(2).72).
- [16] U. Kırbaş and M. Karaşahin, Discomfort limits provided by railroad crossings to passenger cars. *International Journal of Pavement Engineering*, Online pub., 2021. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2001817>.
- [17] D. Abudinen, L. G. Fuentes, and J. S. Carvajal Muñoz, Travel Quality Assessment of Urban Roads Based on International Roughness Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2612 (1), 1-10, 2017. <https://doi.org/10.3141/2612-01>.
- [18] M. J. Griffin, *Handbook of human vibration*. Academic press, London, UK., 2012, p. 1008.
- [19] ISO BS EN 8041, Human response to vibration - Measuring instrumentation, ISO, Geneva, Switzerland, 2005.
- [20] ISO 10326-1, Mechanical vibration — Laboratory method for evaluating vehicle seat vibration — Part 1: Basic requirements, ISO, Geneva, Switzerland, 2016.
- [21] H. Zhang and W. Yang, Evaluation Method of Pavement Roughness Based on Human-Vehicle-Road Interaction. *Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP)*, pp.3541-3551, Beijing, China, 2010.
- [22] A. Bhattacharya and J. D. McGlothlin, *Occupational ergonomics: theory and applications* (no. 27). CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A., 1996, p. 1332.
- [23] ISO 2631-5, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 5: Method for evaluation of vibration containing multiple shocks, ISO, Geneva, Switzerland, 2004.
- [24] M. Agostinacchio, D. Ciampa, and S. Olita, The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review*, 6 (3), 267-275, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8>.
- [25] R. Haas, W. R. Hudson, and J. P. Zaniewski, *Modern Pavement Management*. Krieger Pub. Co., Malabar, Florida, USA., 1994, p. 583.
- [26] P. Múčka and L. Gagnon, Influence of tyre-road contact model on vehicle vibration response. *Vehicle System Dynamics*, 53 (9), pp. 1227-1246, 2015. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1041992>.
- [27] ASTM E 1170, Standard Practices for Simulating Vehicular Response to Longitudinal Profiles of Traveled Surface, ASTM, West Conshohocken, PA, 1997. <https://doi.org/10.1520/E1170-97R17>.
- [28] S. Park, A. A. Popov, and D. J. Cole, Influence of soil deformation on off-road heavy vehicle suspension vibration. *Journal of Terramechanics*, 41 (1), 41-68, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.02.010>.
- [29] H. Salmani, M. Abbasi, T. Fahimi Zand, M. Fard, and R. Nakhaie Jazar, A new criterion for comfort assessment of in-wheel motor electric vehicles. *Journal of Vibration and Control*, 28 (3-4), 316–328, 2020. <https://doi.org/10.1177/1077546320977187>.
- [30] G. Loprencipe and P. Zoccali, Ride Quality Due to Road Surface Irregularities: Comparison of Different Methods Applied on a Set of Real Road Profiles. *Coatings*, 7 (5), 59, 2017. <https://doi.org/10.3390/coatings7050059>.
- [31] G. Bonin, G. Cantisani, G. Loprencipe, and M. Sbrolli, Ride Quality Evaluation: 8 d.o.f. Vehicle Model Calibration. *4th International SIV Congress*, pp. 75-83, Palermo, Italy, 12-14 September, 2007.
- [32] E. Khorshid, F. Alkalby, and H. Kamal, Measurement of whole-body vibration exposure from speed control humps. *Journal of Sound and Vibration*, 304 (3-5), 640-659, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.013>.





Sargısız betonun mekanik özelliklerinin TBDY 2018 ve diğer modellerle analitik ve deneysel karşılaştırılması

Analytical and experimental comparison of mechanical properties of unconfined concrete with TBDY 2018 and other models

Hürmet Küçükgöncü^{1,*} 

¹ Abdullah Gül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38080, Kayseri Türkiye

Öz

Betonarme elemanların davranışlarının anlaşılabilmesi için betonarmeyi oluşturan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Sargısız beton malzemesinin gerilme-şekil değiştirme davranışının tahmin edilebilmesi için pek çok matematiksel model geliştirilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) de de sargısız betonların gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına yer verilmektedir. Ancak bu matematiksel modellerin dayanım, süneklik ve yük altında enerji tüketebilme kapasitesi açısından benzer özelliklerdeki deneysel numunelerden farkının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Böylece sargısız beton modellerin, analitik yaklaşımlarının doğruluğu belirlenebilmektedir. Betonarme yapısal elemanların özellikle kesit davranışı araştırılırken ya da yük altında kesit tasarımları yapılırken söz konusu modellerin sergilediği davranışı bilmek büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada TS 500 yönetmeliğinde yer alan beton sınıfları ve dayanımlarına uygun olarak üretilen numuneler basınç testine tabi tutulmuş, sonrasında ise bu dayanım sınıflarına ait sargısız beton davranışı için literatürde sık kullanılan matematiksel modeller ve TBDY 2018 de yer alan bağıntılar kullanılarak gerilme-şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden yararlanılarak süneklik ve enerji tüketebilme kapasitesi gibi mekanik özellikleri, TBDY 2018 ve diğer matematiksel modellerle, deneysel verilerden elde edilen değerler karşılaştırılarak farklılıkları ortaya konulmuştur. Buna göre göz önüne alınan beton modellerinin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiş ve kullanılan beton sınıfına ait dayanımın da modellerin performansı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sargısız beton, Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, Dayanım, Süneklik, Tüketilen enerji

1 Giriş

Ülkemizin deprem bölgesi açısından tehlikeli bir konumda bulunması ve inşa edilen yapıların yıkıcı depremlere maruz kalması nedeniyle betonarme elemanların tasarım, yapım ve analizleri oldukça büyük önem

Abstract

It is necessary to understand the stress-strain behavior of the materials composing the reinforced concrete in order to understand the behavior of reinforced concrete members. Many mathematical models are developed to predict the stress-strain behavior of unconfined concrete. The Turkish Building Earthquake Code 2018 (TEC 2018) also includes stress-strain relations for unconfined concrete. However, it is so important to determine the differences of these mathematical models from experimental specimens with similar properties in terms of strength, ductility and consumed energy under load. Thus, the accuracy of the analytical approaches of unconfined concrete models can be determined. Comprehending the behavior of the models provides great convenience, especially when investigating the section behavior of reinforced concrete structural members or when designing the section under load. For this reason, in this study, the specimens produced in accordance with the concrete grades and strengths in the TS 500 regulation were subjected to the compression test, and then stress-strain graphs were obtained by using the mathematical models frequently used in the literature and the relations in TEC 2018 for the unconfined concrete behavior. By using these graphs, mechanical properties such as ductility and energy consumption were compared with TEC 2018 and other mathematical models and the values obtained from experimental data and their differences were revealed. Accordingly, the strengths and weaknesses of the considered concrete models were determined and it was concluded that the strength of the concrete grade was also effective on the performance of the models.

Keywords: Unconfined concrete, Stress-strain relationship, Strength, Ductility, Consumed energy

taşımaktadır. Özellikle olası yıkıcı depremlere maruz kalacak bu yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanması ve yapıyı oluşturan yapısal elemanların kesit analizlerinin doğru yaklaşımlarla yapılması gereklidir. Yapıların depreme dayanıklı tasarım ve analizlerinde doğrusal ve doğrusal olmayan olarak iki farklı davranış göz önüne alınır [1]. Buna

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hurmet.kucukgoncu@agu.edu.tr (H. Küçükgöncü)
Geliş / Received: 06.09.2022 Kabul / Accepted: 17.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1171778

göre yapısal elemanların kesit analizleri bu davranışlardan uygun olanı seçilerek yapılır. Elemanların kesit analizleri yapılırken kullanılan yapı malzemesinin davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere ilgili yapı elemanının davranışı; malzeme, geometri ve etkiyen yüklere bağlıdır [2]. Bununla birlikte, dikkate alınan malzeme özelliklerinin birim şekil değiştirme ilişkisi üzerindeki etkisi büyüktür [3]. Betonarme elemanların kesit analizlerinde ise özellikle yeterli dayanım, süneklik ve rijitliğe sahip olup olmadıkları incelenir. Bu nedenle hem yapının hem de yapısal elemanın davranışının belirlenebilmesi için betonun yapı malzemesi olarak davranışını bilmek gerekir. Böylece, gerçekçi bir yaklaşımla modellenen davranış, yapıların tasarım ve analizinin doğruluğunu artırır [4]. Bunun için öncelikle betonun gerilme-şekil değiştirme davranışının elde edilmesi gerekir. Betonun davranışı, sargılı ve sargısız olmasına göre değişkenlik göstermektedir. Bugüne kadar literatürde pek çok araştırmacı, betonun hem sargılı hem de sargısız davranışı için farklı formüller önermiştir [5-16]. Bu araştırmacıların sargılı beton davranışı için geliştirdiği formüllerin birçoğu diğer araştırmacılar tarafından çalışmalarında kullanılmış ve bazı karşılaştırmalar yapılmıştır [17-20]. Ancak, sargısız beton davranışı için önerilen formüllerin kullanıldığı oldukça az sayıda çalışma bulunmaktadır [21,22]. Öte yandan, sargısız beton davranışının da bilinmesi, betonun sargı donatısı olmaksızın, yapı malzemesi olarak davranışının anlaşılabilmesi, modelleme ve analizlerde gerekli görüldüğü yerlerde kullanılabilmesi açısından önemlidir.

Sargısız betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisini elde etmek için literatürde çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu matematiksel modellerin ilki Hognestad [5], tarafından 1951 yılında önerilmiştir. Hognestad modelinde maksimum gerilme değerine kadar eğri parabolik olarak artar, sonrasında ise doğrusal olarak düşer. Chan [6], çalışmasında hem sargılı hem de sargısız beton davranışına yer vermiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde ilk iki kısım her iki model için de aynıdır. Son kısımda ise sargısız beton için maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri ϵ_{co} değerine eşit ve negatif bir eğimi varken, sargılı betonda ise son kısmın eğimi pozitifdir. Kent ve Park [8] da hem sargılı hem de sargısız beton modelleri üzerine çalışmış olup sargısız beton malzemesi için gerilme-şekil değiştirme eğrisini Hognestad modeline benzer bir şekilde maksimum gerilmeye kadar ikinci derece bir parabol ve kalan kısmı içinse azalan eğime sahip bir doğru olarak önermiştir. Sargılı ve sargısız betonlar için ampirik formüller tanımlayan diğer araştırmacılar ise Mander vd. [11,12] ile Saatçioğlu ve Razvi [13] dir. Çalışmalarında sargılı ve sargısız betonarme elemanların davranışlarını göz önüne alarak gerilme-şekil değiştirme eğrisini araştırmışlardır. Attard ve Setunge [15], hem sargılı hem de sargısız betonlar için matematiksel modeller ve onlarla ilişkili analitik formüller önermişlerdir. Modeller için kullanılan başlıca parametreler, maksimum gerilme, maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme, elastisite modülü ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin büküm noktasındaki gerilme ve şekil değiştirmedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018) [23] de de sargılı ve sargısız beton davranışları

dikkate alınarak, her iki davranış için de gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin elde edilmesini sağlayan bağıntılarına yer verilmektedir. Bu çalışmada ise deneysel çalışmadan elde edilen silindir beton numunelere ait mekanik özellikler, Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi gibi literatürde yaygın olarak kullanılan sargısız beton modellerine göre, deneysel numunelere benzer özelliklerdeki beton sınıfları için analitik olarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu amaçla TS500 yönetmeliğinde [24], yer alan farklı sınıf (C20, C25, C30, C35 ve C40) beton numuneler üretilmiş ve basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrileriyle birlikte dayanım, süneklik, tüketilen enerji değerleri gibi mekanik özellikler elde edilmiştir. Aynı beton sınıfları için literatürdeki modellere ait analitik formüller kullanılarak elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrileri ve buna bağlı olarak hesaplanan diğer mekanik özellikler hem deneysel verilerle hem de kendi aralarında diğer sargısız beton modelleriyle karşılaştırılarak farklılıklar ortaya konulmuştur. Bu şekilde, literatürde yer alan modellerin matematiksel yaklaşımlarının gerçekte üretilen beton sınıflarıyla ne derece örtüştüğü ve analitik yaklaşımların doğruluğu tespit edilmiştir.

2 Materyal ve metod

Çalışma kapsamında, öncelikle TS 500 yönetmeliğinde tanımlanan C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına dayanım açısından uygun olan üçer adet silindir beton numune üretilmiş ve basınç testine tabi tutulmuştur. Ancak her bir beton sınıfı için üretilen numunelerin gerilme şekil değiştirme eğrilerinin ortalamasının alınması sonucu elde edilen eğri, betonun sahip olduğu σ - ϵ karakteristik eğrisini tam olarak yansıtamamıştır. Her bir numunenin belirli noktalarının ortalamasının dikkate alınması durumunda ise eğri ikinci derece parabolik eğri olma özelliğini kaybetmektedir. Bu durumda enerji tüketimi gibi özellikleri doğrudan etkilediğinden, çalışmada her bir beton sınıfı için ilgili karakteristik dayanıma en yakın numunenin σ - ϵ grafikleri göz önüne alınmıştır. Matematiksel modellerin formülasyonları gereği beton sınıfları için karakteristik basınç dayanımı göz önüne alındığından beri, her bir beton sınıfı için karakteristik dayanıma en yakın basınç dayanımına sahip beton numuneye ait deneysel verilerin karşılaştırma için kullanılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Böylece basınç testi sonrasında her bir beton sınıfı için tek bir numuneden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri (σ - ϵ) çizilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında ise herhangi bir deney verisi kullanılmaksızın C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarının yönetmeliklerde yer alan standart silindir basınç dayanımları göz önünde bulundurulmuş; Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi, TBDY 2018 sargısız beton modellerinde yer alan analitik bağıntılar kullanılarak σ - ϵ eğrileri elde edilmiştir. Sonuçta, bu eğriler yardımıyla her bir sınıfın analitik ve deneysel olarak plastik şekil değiştirmenin başladığı değerler ve bu noktaya karşılık gelen dayanım değerleri, maksimum dayanımları ve maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerleri, maksimum şekil değiştirme değeri ve bu noktaya karşılık gelen dayanım

değeri ile süneklik ve tükettikleri toplam enerji miktarları hesap edilmiştir. Elde edilen bulgular, hem deneysel verilerle hem de TBDY 2018 den elde edilenlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Deneyler ve kullanılan sargısız beton modelleri ile ilişkili analitik formüllere ait bağlantılar aşağıdaki başlıklarda verilmektedir.

2.1 Deneysel çalışma

Çalışmanın deneysel kısmında, hazır beton santralinden temin edilen TS EN 206'da [25] belirtilen beton özelliklerine uygun olarak üretilen C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına ait silindirik numuneler kullanılmıştır. Tüm numuneler, basınç deneyleri için standartlara uygun olarak [26,27] 15 cm taban çapına ve 30 cm yüksekliğe sahip silindirik kalıplara alınmıştır. Beton numuneler kalıplara yerleştirilirken, segregasyon olmayacak, yüzeye şerbet çıkmayacak ve tam sıkışma elde edilecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 1). Betonun karakteristik basınç dayanımının ilk 7 günde oldukça hızlı bir şekilde arttığı ve neredeyse nihai dayanımının %70'ine ulaştığı, ilerleyen günlerde ise nihai karakteristik basıncının kalanına daha yavaş bir artışla 28 günün sonunda ulaştığı bilinmektedir. Betonun basınç dayanımına; betonun yaşı, boyutları ve kürlenme işleminin doğrudan bir etkisi bulunmaktadır [28]. Bu nedenle silindirik numuneler, döküm işlemi tamamlandıktan 24 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır. Ardından, yönetmeliklerde belirtilen standart kür koşullarına [27] göre suda 20°C ± 2 sıcaklıkta kürlenmiş, 28 günlük standart silindirik deney numuneleri elde edilmiştir.

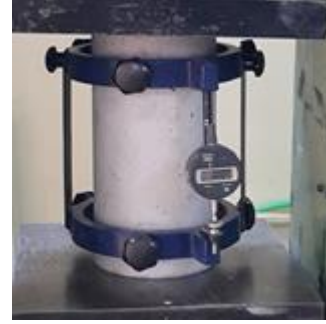


Şekil 1. Kalıplanan silindirik beton numunelerden birkaçı

Kürleme işlemi tamamlanan numunelere basınç testi uygulanacağı için standartlara [27] uygun bir biçimde kükürt başlık yapılmıştır. Sonrasında ise sırasıyla tüm numuneler tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç deneyleri sonunda, σ - ϵ grafiklerini elde edebilmek için silindirik beton numunelere birim boydaki değişimi ölçen 0,001 mm hassasiyetli komparatör takılmıştır (Şekil 2). Silindirik numuneler üzerine yerleştirilen, deney başlangıcında sıfırlanan bu deplasman ölçü saati yardımıyla deney boyunca kuvvetin artışıyla birlikte birim boyda meydana gelen değişim kaydedilmiştir. Böylece deney sonunda her bir numune için kuvvet deplasman değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak gerilme şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplamalar sonucunda her bir numuneye ait σ - ϵ eğrileri çizilmiştir.

2.2 Sargısız beton modelleri

Betonarme kesit analizlerinin yapılabilmesi için denge ve uygunluk koşullarının yanı sıra malzemelerin gerilme-şekil



Şekil 2. Komparatör takıldıktan sonra basınç testi uygulanan beton numune

değiştirme ilişkisinin de bilinmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere denge ve uygunluk koşulları malzeme davranışlarından bağımsız olup, denge denklemleri; gerilme veya kuvvet cinsinden ifade edilirken, uygunluk denklemleri ise şekil değiştirme cinsinden ifade edilir. Bu iki farklı denklem arasındaki ilişki ise sadece kullanılan malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak kurulmaktadır. Yapı malzemesi olarak betonun özelliklerine bakıldığında, basınç dayanımının çekme dayanımına oranla daha yüksek olması nedeniyle betonun katkısı sadece basınca maruz kalması durumunda göz önüne alınır. Buna bağlı olarak, betonun basınç dayanımını yansıtan σ - ϵ eğrilerinin elde edilmesinde; uygulanan yükün çeşidi, hızı, yük geçmişi, kesit geometrisi ve boyutları ile sargılı ya da sargısız olması gibi birçok değişken rol oynamaktadır. Bu nedenle beton için tek bir σ - ϵ eğrisi tanımlamak oldukça güçtür. Dolayısıyla, betonarme kesit analizlerinin yapılabilmesi için σ - ϵ eğrileri idealleştirilerek kullanılmaktadır [3]. Literatürde pek çok araştırmacı matematiksel model olarak adlandırılan bu idealize edilerek basitleştirilmiş σ - ϵ eğrileri üzerine çalışarak, beton malzemesi için birçok σ - ϵ modeli önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında sargısız beton için geliştirilen modeller arasında yer alan Hognestad, Kent-Park, Mander, TBDY 2018 modelleri kullanılmıştır. Saatçioğlu-Razvi modeli ise sargılı betonlar için geliştirilmiş olup çalışmada gerekli değişikliklerin yapılmasıyla sargısız betonlar için de kullanılmıştır. Kullanılan sargısız beton modelleri için verilen denklemlerde " σ_c " betonun ilgili şekil değiştirme değerindeki basınç dayanımını, " f_c " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını, " f_{co} " sargısız betonun maksimum basınç dayanımını, " f_{c85} " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını %85 ini, " ϵ_c " betonun ilgili gerilme değerindeki şekil değiştirme değerini, " ϵ_{co} " sargısız betonun maksimum basınç dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme değerini, " ϵ_{c85} " silindirik betonun karakteristik standart basınç dayanımını %85'ine karşılık gelen şekil değiştirme değerini, " ϵ_{50u} " maksimum gerilmenin %50 azaldığı dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, " ϵ_{u85} " maksimum gerilmenin %15 azaldığı dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, " ϵ_{cu} " ise maksimum şekil değiştirmesini, " E_c " sargısız

betonun elastisite modülünü, “E_{sec}” sargısız betonun Sekant modülünü ifade etmektedir.

2.2.1 Hognestad modeli

Hognestad [5] tarafından önerilen bu modelde σ - ε eğrisi iki kısımdan oluşur. İlk kısımda eğri, ikinci derece bir parabol olup maksimum gerilme değerini temsil eden tepe noktasına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu noktadan sonra devam eden ikinci eğri lineer olup betonun maksimum şekil değiştirme değerine kadar doğrusal olarak ilerler. Aşağıdaki bağıntılar Hognestad tarafından sargısız beton davranışı için geliştirilmiş denklemlerdir. Modelde beton basınç dayanımı silindirik numune dayanımının %85'i olarak alınmaktadır. Maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değişimi ise geleneksel betonda 0.002 olarak alınmaktadır. Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki ise, sırasıyla parabolik eğri için [Denklem \(1\)](#), [Denklem \(2\)](#), [Denklem \(3\)](#) ve doğrusal eğri [Denklem \(4\)](#) te verilen bağıntılar ile belirlenmektedir.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\varepsilon_{co} = \frac{2f_c}{E_c} \quad (2)$$

$$E_c = 12680 + 460 \times f_c \quad (3)$$

$$\sigma_c = 0,85x f_c \quad (4)$$

2.2.2 Kent-Park sargısız beton modeli

Bu modelde σ - ε eğrisinin maksimum gerilmeye kadar olan bölümü parabolik olarak tanımlanırken, maksimum gerilmeden sonraki kısmı lineer olarak azalmaktadır. Maksimum gerilme f_c , genellikle standart silindirik beton basınç dayanımı olarak alınmaktadır. Sargısız beton davranışında gerilmenin azalarak devam ettiği lineer kısımda, maksimum gerilmenin %50 azaldığı değer ve karşılık gelen şekil değiştirme değeri de hesaplanır. Ayrıca sargısız betonda maksimum birim şekil değiştirme ε_{cu} dur ve $\varepsilon_{cu}=0.004$ alınabilmektedir. Kent-Park [8] tarafından önerilen modelde parabolik eğrinin hesabı için [Denklem \(5\)](#) kullanılırken, lineer kısmın hesabı için [Denklem \(6\)](#), [Denklem \(7\)](#), [Denklem \(8\)](#) kullanılmaktadır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$f_c [1 - Z_u (\varepsilon_c - \varepsilon_{co})] \quad (6)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{co}} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.29f_c}{145f_c - 1000} \quad (8)$$

2.2.3 Mander sargısız beton modeli

Mander vd. [11,12] tarafından önerilen beton modeli, sargısız betonun davranışını ortaya koymakta olup kesitin dairesel ya da dörtgen olmasına göre farklı bağıntılar sunmaktadır. Buna göre çalışmada, silindirik numunelerin

dayanımı araştırıldığından dairesel kesite ait formüller kullanılmıştır. Mander sargısız beton modeli için geliştirilen gerilme denklemi [Denklem \(9\)](#) maksimum gerilmeyi temsil eden tepe noktasına kadar kullanılmakta olup bu noktadan sonraki gerilme değerinin hesabı için [Denklem \(10\)](#) kullanılmaktadır. Diğer denklemler ise her iki gerilme denklemi için ortak olup [Denklem \(11\)](#), [Denklem \(12\)](#) ve [Denklem \(13\)](#) te verilmektedir. Mander sargısız beton modelinde maksimum şekil değiştirme ε_{cu} yaklaşık olarak 0.004 olarak dikkate alınırken, kopma dayanımı ise bu değere karşılık gelen gerilme değeridir.

$$\sigma_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad (9)$$

$$\sigma_c = f_{co} \left(\frac{2r}{r - 1 + 2r^r} \right) \quad (10)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \quad (11)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (12)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}} \quad (13)$$

$$E_c = 5000 \times \sqrt{f_c} \quad (14)$$

2.2.4 Saatçioğlu-Razvi beton modeli

Saatçioğlu-Razvi [13] tarafından önerilen ve [Denklem \(15\)](#) ve [Denklem \(16\)](#) da bağıntıları verilen gerilme-şekil değiştirme modeli sargılı betonlar için önerilmiştir. Bu nedenle sargılı beton dayanımı hesaplanırken, yanal sargı basınç etkisini de dikkate almak için bazı katsayılar önermişlerdir. Bu çalışmada ise sargı donatısı olmadığından yanal basınca herhangi bir katkı olmamaktadır. Böylece, betonun basınç dayanımının artmasını sağladığı bilinen bu katsayılar 1 olarak alınmıştır. Bu sayede maksimum gerilme dayanımı, betonun standart silindirik karakteristik basınç dayanımına eşit olmuştur. Modelde sadece sargı donatısının sağladığı tüm katkılar matematiksel olarak çıkarılmış ve modelin doğasına zarar vermeksizin analitik formüller sadece sargısız beton davranışına uygun olarak hesaplanmıştır. Böylece sargılı donatı için geliştirilen bir modelin sargısız donatı davranışını nasıl bir doğruluk derecesi sağlayabileceği de araştırılmıştır. Matematiksel modelde σ - ε eğrisi artan eğime sahip bir parabol ([Denklem \(15\)](#)) ve sonrasında azalan eğime sahip bir doğru parçasından ([Denklem \(16\)](#)) oluşmaktadır.

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (15)$$

$$\sigma_c = f_{c+} \left(\frac{f_c - f_{c85}}{\varepsilon_{co} - \varepsilon_{c85}} \right) (\varepsilon_c - \varepsilon_{co}) \quad (16)$$

2.2.5 TBDY 2018 sargısız beton modeli

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [23] de sargısız beton malzemesinin davranışı tıpkı Mander modelinde

olduğu gibi dairesel ve dörtgen kesitler için ayrı ayrı formüller şeklinde verilmektedir. Bu modelde de Mander modeline benzer şekilde σ - ε eğrisinin parabolik kısmının elde edilmesi Denklem (17), doğrusal kısmının elde edilmesi Denklem (18) yardımıyla sağlanmaktadır. Denklem (19), Denklem (20), Denklem (21) ve Denklem (22), de yer alan bağıntılar ise σ - ε eğrisinin her iki kısmı içinde kullanılmaktadır. Mander sargısız beton modelinden farklı olarak TBDY 2018 de maksimum şekil değiştirme değeri $\varepsilon_{cu}=0.005$ olarak dikkate alınırken, sargısız betonun bu şekil değiştirme değerine ulaştığında, dayanımının sıfır olduğu yani yük taşımadığı kabul edilir.

$$\sigma_c = \frac{f_{co} x r}{r - 1 + x^r} \quad (17)$$

$$\sigma_c = f_{co} \left(\frac{2r}{r - 1 + 2r} \right) \quad (18)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \quad (19)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (20)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{co}}{\varepsilon_{c0}} \quad (21)$$

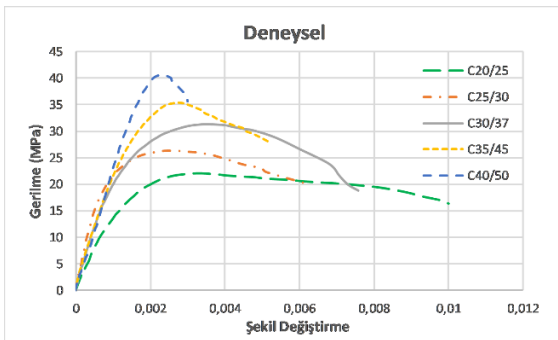
$$E_c = 5000 \times \sqrt{f_c} \quad (22)$$

3 Bulgular ve tartışma

Sargısız beton davranışı için çalışmada göz önüne alınan her bir beton sınıfına ait deneysel ve analitik sonuçlardan elde edilen σ - ε eğrileri ile bu eğrilerden elde edilen dayanım, şekil değiştirme, süneklik ve tüketilen toplam enerji değerleri karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

3.1 Deneysel sonuçlar

Silindir beton numunelerin basınç deneylerinden elde edilen kuvvet-deplasman değerlerinden, kuvvet değerinin silindir numunelerin yüzey alanına bölünmesiyle gerilme (σ), deplasman değerinin de numunenin boyuna bölünmesiyle şekil değiştirme değerleri (ε) elde edilmiştir. Böylece her bir kuvvet-deplasman değerlerine karşılık gelen gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Silindir numunelerin basınç deneylerinden elde edilen σ - ε grafikleri

3.2 Gerilme-şekil değiştirme eğrileri

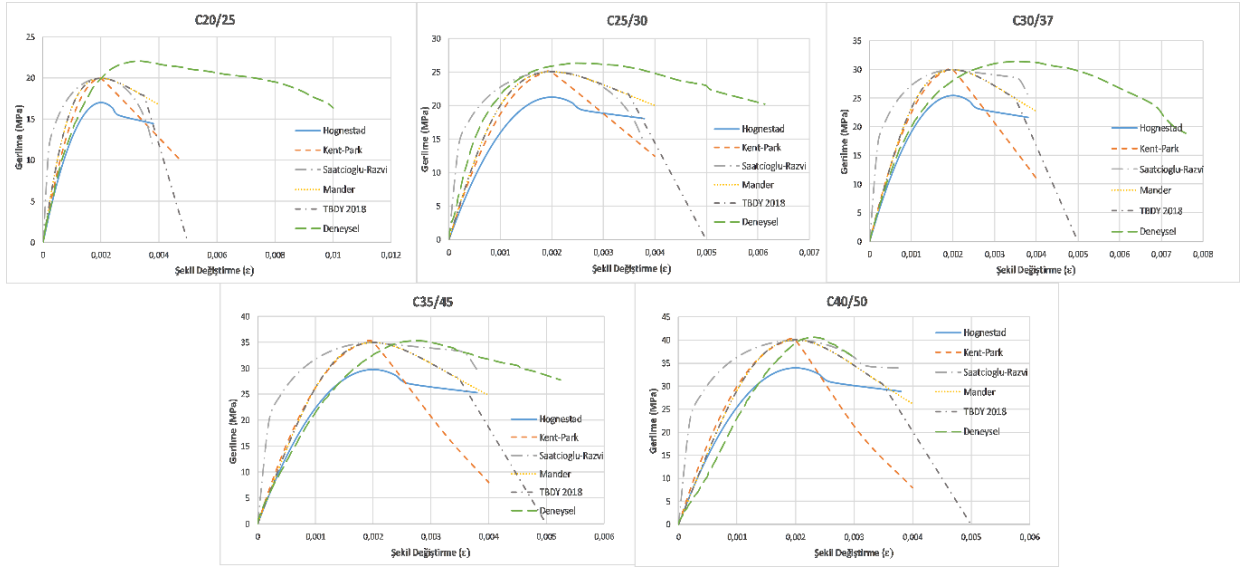
C20, C25, C30, C35 ve C40 beton sınıflarına ait standart karakteristik basınç dayanımlarının; Hognestad, Kent-Park, Mander, Saatçioğlu-Razvi, TBDY 2018 sargısız beton modelleri için geliştirilen analitik bağıntılarda kullanılmasıyla ve deneysel verilerden elde edilen σ - ε eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4'te sunulmuştur.

Şekil 4'te yer alan C20 beton sınıfına ait σ - ε grafiklerinde, deneysel verilerden elde edilen dayanımın 1-2 MPa kadar daha yüksek olması, beton santralinden gelen numunenin 20 MPa'nın biraz üzerinde bir dayanıma sahip olması ve sonucun deneysel olarak elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Analitik sonuçlara bakıldığında ise en düşük dayanım Hognestad modelinden elde edilmiştir. Bunun nedeni, bu modelin tepe noktasındaki maksimum dayanımının, silindirik karakteristik basınç dayanımının %85'i olarak kabul edilmesi ve bu şekilde önerilmesinden kaynaklıdır. Şekil değiştirme değerleri incelendiğinde ise en büyük şekil değiştirmenin yine deneysel modele ait olduğu gözlenmektedir. Deneysel modeli sırasıyla TBDY 2018, Kent-Park, Mander, ve Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad modeli izlemiştir. Eğrilerin tepe noktasına kadarki artan eğimli kısmı için en düşük artış miktarı Hognestad'a ait olup daha sonra onu, deneysel, Kent-Park, Mander ve TBDY 2018 ile Saatçioğlu-Razvi takip etmektedir.

Sargısız beton modellerinin C25 beton sınıfına ait eğrileri için bir karşılaştırma yapılacak olursa yine deneysel verilerden kaynaklı olarak yaklaşık 1 MPa civarında deney numunenin dayanımı yüksek iken, Hognestad modeli, geliştirilen analitik formülden kaynaklı olarak ($0.85f_c$) maksimum dayanım olarak en düşük değere sahiptir. Şekil değiştirmeler incelendiğinde ise en büyük şekil değiştirmenin yine deneysel veriden elde edildiği onu sırasıyla TBDY 2018, Mander ve Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ve Hognestad izlemiştir. Eğrilerin ilk kısımları incelendiğinde, en dik olanı Saatçioğlu-Razvi olup deneysel, TBDY 2018 ve Mander, Kent-Park ve Hognestad onu takip eden modellerdir.

C30 beton sınıfı numunelerde ise deneysel çalışmadan elde edilen en yüksek dayanım değeri, standart silindirik karakteristik basınç dayanımından yaklaşık 1 MPa kadar daha fazladır. Hognestad modeli ise basınç dayanımı açısından en düşük değere sahip modeldir. Şekil değiştirmeler açısından değerlendirildiğinde ise en yüksek şekil değiştirme değeri deneysel çalışmadan elde edilmiştir. Daha sonra ise TBDY 2018, Mander ve Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad modellerinden elde edilen şekil değiştirme değerleri gelmektedir. Grafiklerin ilk kısımları incelendiğinde, daha dik bir açığa sahip olmalarına göre Saatçioğlu-Razvi TBDY 2018 ve Mander, Kent-Park, deneysel ve Hognestad olarak sıralanmaktadır.

Silindir beton numunelerin C35 sınıfında olanlarının σ - ε grafikleri incelendiğinde, Hognestad modeli dışında deneysel numunelerin maksimum dayanımları ile matematiksel modellerden hesaplanan maksimum dayanım birbirine oldukça yakındır. Şekil değiştirme değerleri karşılaştırıldığında ise diğer beton sınıflarına benzer şekilde en yüksek şekil değiştirme değeri deneysel çalışmadan elde edilmiştir. Diğer modellerden elde edilen şekil değiştirmeler



Şekil 4. Silindirik numunelerin sargısız beton modelleri ve deneylerden elde edilen σ - ϵ grafiklerinin karşılaştırılması

ise en yüksekten en düşüğe doğru; TBDY 2018, Mander, Kent-Park ve Hognestad ile Saatçioğlu-Razvi dir. Grafiklerdeki eğrilerin ilk kısımlarının eğimlerine göre en yüksek eğim; Saatçioğlu-Razvi, Kent-Park, TBDY 2018 ve Mander ile Hognestad dır. Her ne kadar çok küçük bir farkla da olsa deneysel veriler yardımıyla çizilen eğrinin eğimi en düşüktür.

C40 betonu sınıfında yer alan numuneler için deneysel veriden elde edilen maksimum dayanım ile matematiksel modellerden elde edilen dayanımlar birbirlerine oldukça yakındır. Gerilme-şekil değiştirme değerleri incelendiğinde, maksimum şekil değiştirme değeri bu kez TBDY 2018 modelinden elde edilirken, bu modeli sırasıyla Mander, Kent-Park, Saatçioğlu-Razvi ile Hognestad beton modeli ve son olarak deneysel çalışma izlemektedir. σ - ϵ eğrisinin ilk kısmı irdelendiğinde, yine en dik eğime Saatçioğlu-Razvi modelinden elde edilen eğrinin sahip olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte, Kent-Park, TBDY 2018 ile Mander, Hognestad ve son olarak deneysel sonuçlar yardımıyla çizilen eğrinin eğimleri de onu takip etmektedir.

Şekil 4'te yer alan grafiklerden görüleceği üzere Mander ve TBDY 2018 in eğimindeki artış miktarı analitik formüllerden kaynaklı olarak modellerin doğası gereği aynıdır. Tüm beton sınıflarına ait grafiklerin ikinci kısımlarında yani eğri maksimum tepe noktasına ulaştıktan sonra en hızlı düşüş Kent-Park modelinde gözlenmiştir. TBDY 2018 de önerilen matematiksel modele bağlı olarak maksimum şekil değiştirmesine karşılık gelen nokta olan $\epsilon_{cu}=0.005$ ten itibaren, beton kesitin yük almadığı kabul edildiğinden bu noktada dayanım sıfırdır.

3.3 Dayanım, şekil değiştirme ve süneklik

Bu bölümde σ - ϵ grafiklerinden faydalanılarak her bir beton sınıfı için elastik dayanım ve bu dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri, plastik şekil değiştirme başlangıcı ve bu noktaya karşılık gelen dayanım değeri, maksimum dayanım ve bu noktaya karşılık gelen şekil değiştirme ile maksimum şekil değiştirme ile bu noktaya

karşılık gelen dayanım değeri hesaplanmış ve Tablo 1 de verilmiştir. Maksimum şekil değiştirme noktasına karşılık gelen dayanım değeri literatürde en son dayanım ya da kopma dayanımı olarak ifade edilmektedir. Bu nedenle betonun gevrek bir malzeme olduğu bilinmekle birlikte, çalışma boyunca bu dayanımdan kopma dayanımı olarak bahsedilmiştir. Buna göre σ - ϵ eğrisi üzerinde bulunan tepe noktası maksimum dayanımı (f_c) işaret ederken, bu dayanıma karşılık gelen şekil değiştirmede (ϵ_c) yi gösterir. Elastik dayanım (f_e), maksimum dayanımın (f_c) %40 ı olarak alınmıştır [29]. Bu değere karşılık gelen şekil değiştirme ise ϵ_e ile ifade edilir. Kopma dayanımı (f_{cu}) ise eğrinin dayanım açısından geldiği son gerilme noktası olarak tanımlanırken bu değere karşılık gelen şekil değiştirme değeri (ϵ_{cu}) ise maksimum şekil değiştirme olarak adlandırılır. Beton doğası gereği kırılğan bir malzeme olduğu için belirli bir akma noktasına sahip değildir. Bununla birlikte aksenal basınç kuvveti altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrileri doğrusal değildir. Fakat bir noktaya kadar betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin elastik davrandığı kabul edilir [30,31]. Ancak beton numunelerin tek eksenli yükleme altında gerilmelerinin artmasıyla, şekil değiştirmeler de artar. Bu gerilme artışıyla birlikte, beton içerisinde mikro çatlaklar oluşmaya başlar. Betonun doğrusal olmayan bu davranışında agrega çimento matrisi ara yüzeyinin önemli etkisi olduğu düşünülmekte olup, σ - ϵ grafiklerinin doğrusal olmaması, yükleme nedeniyle betonda çatlakların meydana gelmesiyle açıklanmaktadır [31-33]. Gerilme, beton içerisindeki mikro çatlakların hızla artması ve mikro çatlakların ağ oluşturmasıyla birlikte artmaktadır [34]. Bu nokta betonun hasar görmeye başladığı ve plastik şekil değiştirmenin başladığı nokta olarak kabul edilir [30,34-37]. Bu nokta bulunurken σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasına çizilen doğrunun eğiminden yararlanılır. σ - ϵ grafiği üzerinde bu noktanın, x eksenindeki değerine karşılık gelen nokta plastik şekil değiştirmenin (ϵ_{pn}) başladığı ve beton içindeki mikro çatlakların belirginleşerek ağ oluşturduğu noktayı, y eksenindeki iz düşümü ise bu

noktaya karşılık gelen gerilme değerini (f_{pn}) temsil eder [37-40].

Betonarme kesitlerin ve malzemelerin, elastik ötesi deformasyon yapma kapasitesi; yani yük altındaki büyük deformasyonlar yapabilme kabiliyeti veya enerji tüketilme kapasitesi, düktilite ya da süneklilik olarak tanımlanmaktadır [41,42]. Bu nedenle özellikle depreme dayanıklı yapı tasarım ilkeleri doğrultusunda, yapının sünekliliğinin yüksek olması istenilen bir özelliktir. Donatılandırılmamış betonun basınç altında şekil değiştirme sünekliliğinin oldukça sınırlı olduğu bilinmekle birlikte [41], matematiksel olarak şekil değiştirme sünekliliği, ulaşılabilecek toplam şekil değiştirmenin, elastik sınırın geçildiği şekil değiştirmeye oranı olarak hesaplanır [43]. Bu şekilde çalışmada, her bir beton sınıfı için her bir sargısız beton modelinden elde edilen σ - ϵ eğrilerinden faydalanılarak belirlenen maksimum şekil değiştirmenin plastik şekil değiştirmenin başladığı noktadaki

değere oranı ilgili beton sınıfının σ - ϵ eğrisi için şekil değiştirme süneklilik (μ) değerini verir. Hesaplanan süneklilik değerleri Tablo 1 de sunulmuştur.

Tablo 1'den görüleceği üzere, beton sınıflarının tamamı için, numunelerin elastik noktadaki dayanımlarından en düşük olanı beklenildiği gibi modelin matematiksel tanımı gereği daha düşük bir maksimum dayanıma sahip olan Hognestad a aittir. En yüksek elastik dayanım ise maksimum dayanımın en yüksek olduğu, deneysel çalışmaya aittir. Diğer modellerde ise eğrilerin bu noktaya kadarki eğim artışları eşit olduğundan bu değer de aynıdır. Plastik şekil değiştirme noktasına karşılık gelen dayanımlar incelendiğinde yine en düşük dayanım, en düşük maksimum dayanıma sahip olan Hognestad modelinden elde edilirken en yüksek dayanım, C40 beton numunesi hariç deneysel numunelerden elde edilmiştir.

Tablo 1. Silindir numunelerin beton sınıflarına göre dayanım, şekil değiştirme ve süneklilik değerleri

C20/25		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	6.8	16.96	17	14.45	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	8	19.95	20	10	0.000453	0.00195	0.002	0.00474	2.431
Saatçioğlu-Razvi	8	19.94	20	11.50	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	8	19.96	20	16.78	0.000381	0.001884	0.002	0.004	2.123
TBDY 2018	8	19.96	20	0	0.000381	0.001884	0.002	0.005	2.654
Deneysel	8.83	21.82	22.10	16.37	0.000556	0.002835	0.003365	0.01001	3.531
C25/30		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	8.5	21.20	21.25	18.06	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	10	24.93	25	12.5	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	10	24.92	25	14.37	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	10	24.94	25	14.37	0.000419	0.001901	0.002	0.004	2.104
TBDY 2018	10	24.94	25	0	0.000419	0.001901	0.002	0.005	2.630
Deneysel	10.52	25.85	26.29	20.20	0.000319	0.002022	0.002475	0.006135	3.034
C30/37		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	10.2	25.44	25.50	21.68	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	12	29.93	30	11	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	12	29.91	30	25.50	0.000139	0.00183	0.002	0.0038	2.077
Mander	12	29.96	30	22.71	0.000454	0.00196	0.002	0.004	2.041
TBDY 2018	12	29.96	30	22.71	0.000454	0.00196	0.002	0.005	2.551
Deneysel	12.55	31.12	31.37	18.87	0.000529	0.00310	0.003435	0.00758	2.445
C35/45		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	11.9	29.68	29.75	25.29	0.000453	0.00195	0.002	0.0038	1.949
Kent-Park	14	34.91	35	8	0.000453	0.00195	0.002	0.004	2.051
Saatçioğlu-Razvi	14	34.90	35	29.75	0.000139	0.00183	0.002	0.0038	2.077
Mander	14	34.97	35	24.81	0.000485	0.00198	0.002	0.004	2.020
TBDY 2018	14	34.97	35	0	0.000485	0.00198	0.002	0.005	2.525
Deneysel	14.13	35.21	35.32	27.75	0.000599	0.00264	0.00272	0.00525	1.987
C40/50		Dayanım (MPa)				Şekil Değiştirme			Süneklilik
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	fcu	εe	ε _{pn}	εc	εcu	μ
Hognestad	13.6	33.81	34	28.9	0.000453	0.001991	0.002	0.0038	1.909
Kent-Park	16	39.92	40	10	0.000453	0.001991	0.002	0.004	2.000
Saatçioğlu-Razvi	16	39.89	40	34	0.000139	0.001829	0.002	0.0038	2.078
Mander	16	39.99	40	26.18	0.000515	0.001998	0.002	0.004	2.002
TBDY 2018	16	39.99	40	0	0.000515	0.001998	0.002	0.005	2.503
Deneysel	16.25	39.84	40.63	35.60	0.000724	0.002284	0.0023	0.002995	1.311

Bunun muhtemel nedeni deneysel çalışmanın getirdiği farklılıktır. Deneysel çalışmadan sonra en yüksek plastik şekil değiştirme dayanımı ise TBDY 2018 ve Mander beton modellerinden elde edilmiştir. Her iki modelde de matematiksel yaklaşımları gereği σ - ε grafikleri maksimum dayanımı geçtikten sonraki bir noktaya kadar neredeyse aynı devam ettiğinden, kopma dayanımı hariç diğer dayanım değerleri birbirine eşittir. Plastik şekil değiştirme değerine karşılık gelen dayanım açısından bu iki grafiği izleyen diğer model ise Kent-Park modeli olup, Saatçioğlu-Razvi modeliyle arasında oldukça küçük bir fark bulunmaktadır. Plastik şekil değiştirme dayanım değerleri deneysel çalışma dâhil, tüm numunelerde maksimum dayanım değerlerine oldukça yakın değerlerdedir. Kopma dayanım değerleri incelendiğinde ise kopma dayanımının en yüksek olarak hesaplandığı model C30 ve C35 beton sınıfları için Saatçioğlu-Razvi modeli iken diğer beton sınıfları için deneysel çalışmadaki dayanım değerleridir. TBDY 2018 modelinde kopma dayanımı şekil değiştirme değeri 0.005 e ulaştığında sıfır olarak alınır.

Tablo 1'den görüleceği üzere elastik noktadaki şekil değiştirmeler açısından en düşük değer Saatçioğlu-Razvi ye aitken en yüksek değer C25 beton sınıfı hariç olmak üzere tüm sınıflar için deneysel çalışmadan elde edilendir. Plastik şekil değiştirme içinse en yüksek değer deneysel çalışmanınken, en düşük değer modelin analitik yaklaşımı nedeniyle Saatçioğlu-Razvi modelidir. Tüm modellerin analitik yaklaşımları nedeniyle maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerleri aynıdır. Maksimum şekil değiştirme değerleri incelendiğinde yapılan kabuller nedeniyle en düşük Hognestad ve Saatçioğlu-Razvi modelinde görülürken, en yüksek değer C40 beton sınıfı hariç deneysel veriden alınan değerdir. C40 betonu için karakteristik basınç dayanımı oldukça arttığında şekil değiştirmenin azalması nedeniyle bu sonuç gözlenmiştir.

Çalışmada kullanılan beton modellerine göre araştırılan tüm beton sınıfları için süneklik değerleri **Tablo 1** de sunulmuştur. Genel olarak süneklik değerleri incelendiğinde, bu değerler modellere ve beton sınıflarına göre değişmekle birlikte 2 civarlarında değerler aldığı gözlenmiştir. Beklenildiği gibi artan basınç dayanımına bağlı olarak beton sınıfı arttıkça, süneklik değerleri de azalmaktadır. Ancak Hognestad modelinde C40 beton sınıfı hariç diğer tüm sınıflarda süneklik değeri sabit kalmıştır. Süneklik değerleri beton modellerine göre incelendiğinde ise Hognestad modeli en düşük süneklik değerine sahiptir. En yüksek süneklik değeri ise C20 ve C25 için deneysel veriden elde edilen; C30, C35 ve C40 için TBDY 2018 modelleridir. Bu durumun olası nedeni uygulamada beton sınıflarında dayanım arttıkça sünekliğin azalmasıdır.

3.4 Tüketilen toplam enerji

Hem deneysel çalışmadan hem de analitik olarak beton modellerinden elde edilen σ - ε eğrileri göz önüne alınarak hesaplanan enerji tüketim miktarları **Tablo 2** de verilmektedir. Tüketilen enerji miktarları, her bir beton sınıfı için her bir modelden ve basınç deneyinden elde edilen σ - ε eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasına

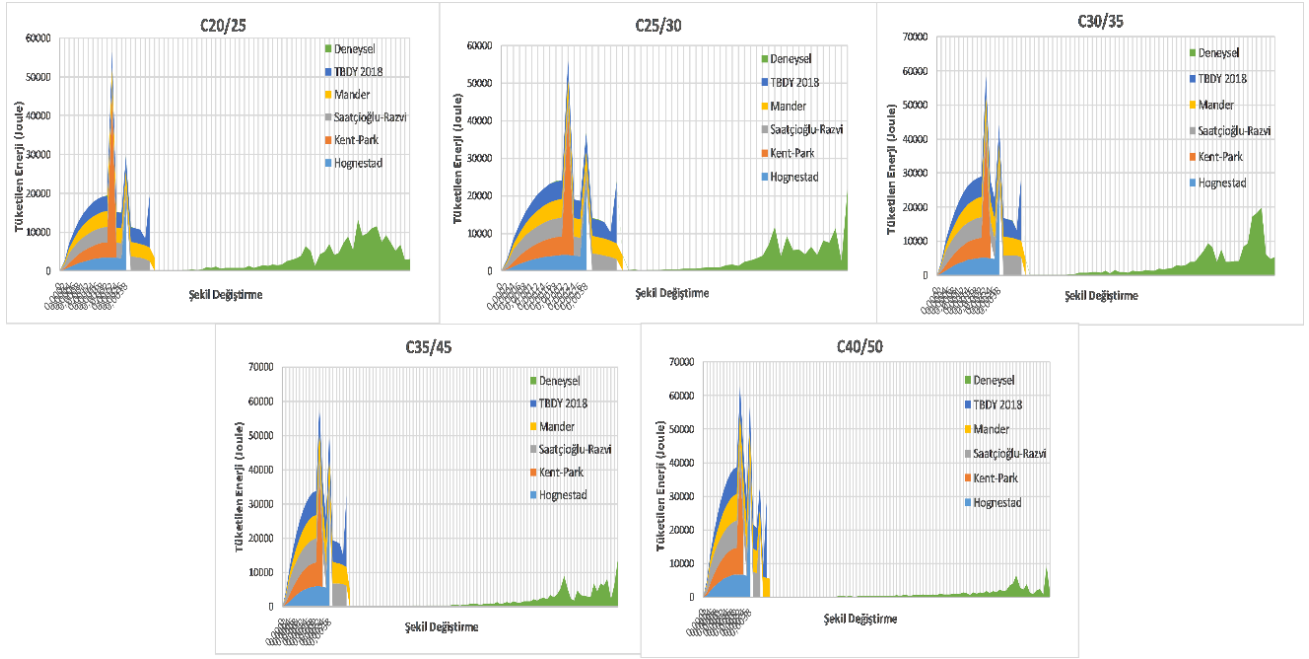
dayanmaktadır. Bilindiği üzere, enerji tüketimi ile süneklik arasında yakın bir ilişki olup, enerji tüketiminin artmasıyla sünekliğin de arttığı düşünülmektedir [44]. Süneklik artışı ise yapılarda istenen bir özelliktir. Bu nedenle her bir beton modeli için hesaplanan enerji tüketim değerleri elde edilerek bir karşılaştırma yapılmıştır.

Tüketilen enerji değerleri için **Tablo 2** ye bakıldığında, σ - ε eğrisinin altında kalan alana bağlı olarak Hognestad ve Kent-Park modelleri en az enerji tüketimine sahiptirler. En yüksek enerji tüketimine sahip model ise TBDY 2018 dir. Bu model dışında C25 ve C30 beton sınıfı için deneysel verilerden elde edilen tüketim, diğer tüm modellere göre en fazladır. **Şekil 5**'te ise şekil değiştirmelere karşılık gelen enerji tüketim alanları verilmiştir. Böylece, her bir beton modeli için şekil değiştirme değerlerinde tüketilen enerji alanları gözlenebilmektedir.

Tablo 2. Silindir numunelerin beton sınıflarına göre tüketilen enerji miktarları

Tüketilen Enerji (Joule)	Hognestad	Kent-Park	Saatçioğlu-Razvi	Mander	TBDY 2018	Deneysel
C20	50439	67687	81076	80378	93550	106252
C25	63049	70750	97291	94338	101127	170384
C30	75659	80995	119992	112534	120618	241869
C35	88268	88614	145936	130956	140246	100638
C40	100878	99482	162151	140817	150634	106353

Bu şekilde enerji tüketimi açısından her bir modelin analitik yaklaşımının daha iyi anlaşılması mümkün olmaktadır. Burada görüleceği üzere, enerji tüketiminin gerçekleşmesi açısından değerlendirildiğinde, deneysel veri ile matematiksel modellerdeki analitik yaklaşım birbirinden farklıdır. Öyle ki tüm beton modellerinde enerji tüketimi yoğun olarak maksimum tepe noktası da dâhil olmak üzere, maksimum şekil değişiminin yaşandığı noktaya kadar devam etmektedir. Bununla birlikte, her bir beton sınıfına ait tüm alan grafiklerine göre enerji tüketim değerleri maksimum dayanımın olduğu noktadan itibaren bir sıçrama gerçekleştirir ve bu nokta pik yaptığı yer olarak görülür. Maksimum şekil değişimine kadar azalan değerlerde bir miktar daha enerji tüketimi gerçekleştirir. Ancak deneysel verilerden elde edilen tüketilen enerji alanlarına bakıldığında, enerji tüketiminin elastik şekil değiştirme değerinden başlayarak arttığı ve maksimum şekil değiştirme noktasında ise maksimum değerine ulaştığı gözlenmektedir. Yani enerji tüketim değerleri, şekil değiştirmenin meydana geldiği adımlara doğru artmakta ve maksimum şekil değiştirmeye ulaşıldığı noktada ise en yüksek değerini alarak sona ermektedir. Sonuç olarak, her ne kadar tüketilen enerji değerleri benzer şekilde hesaplanırsa da tüketilen enerjinin tüketim dönemlerinin dinamiği açısından, betonun matematiksel modellerinden elde edilen enerji tüketim alanları olgusuna göre deneysel veriden elde edilenden daha farklıdır.



Şekil 5. Şekil değiştirme değerlerine karşılık gelen enerji tüketim değerleri

3.5 Sargısız beton modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması

Çalışmanın amacı doğrultusunda, matematiksel beton modellerinden elde edilen tüm sonuçlar basınç deneyinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış ve ortaya çıkan farklılıklar yüzde hata cinsinden hesaplanmıştır. Tablo 3 te çalışma kapsamında incelenen tüm beton sınıfları için bu değerler ayrı ayrı sunulmuştur. Bu şekilde araştırılan özelliklere göre, hangi beton modelinin hangi beton sınıfı için yakın sonuçlar verdiği de tespit edilmiştir.

Tablo 3 ten görüleceği üzere Hognestad modeli dışında tüm beton modellerinden hesaplanan elastik dayanım ve maksimum dayanımın hata yüzdeleri birbirleriyle aynıdır. Buna göre elastik ve maksimum dayanımın hata yüzdeleri birbirleriyle aynıdır. Bu şekilde elastik ve maksimum dayanım açısından deneysel verilere en uzak beton sınıfı C20 iken en yakın olanı C35 dir. Hata yüzdeleri ise oldukça düşüktür. Deneysel verilere göre plastik şekil değiştirmeye karşılık gelen dayanımlar karşılaştırıldığında ise hata yüzdeleri yine oldukça düşük hesaplanmıştır. Burada ise en yakın sonuçlar C40 beton sınıfı, en uzak sonuçlar ise C20 beton sınıfından elde edilmiştir.

Kopma dayanımında ise analitik modellerin matematiksel yaklaşımları nedeniyle birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, C20 beton sınıfı için en iyi sonucu Mander modeli verirken; C25 ve C30 beton sınıfı için en yakın sonuçlar Hognestad modelinden, C35 ve C40 içinse Saatçioğlu-Razvi modelinden elde edilmiştir. Burada C20 beton sınıfı için Mander modelinden sonra en yakın sonuç Hognestad modelinden elde edildiği için düşük dayanım sınıfına sahip betonlarda Hognestad modeli kopma dayanımı açısından iyi sonuçlar vermektedir. TBDY2018 modelinden elde edilen kopma dayanımının en yüksek hata değerine sahip olmasının nedeni; modelin matematiksel

yaklaşımında 0.005 şekil değiştirme değerinde kopma dayanımının sıfır olarak alınmasıdır. Yüksek dayanım sınıfındaki betonlarda ise aslında orijinalinde sargılı beton davranışı için geliştirilen Saatçioğlu-Razvi beton modeli en iyi performansı göstermiştir. Bunun nedeni olarak sargı donatısının kopma dayanımına sağladığı katkıyla birlikte, bu modelin analitik olarak sargılı beton davranışına göre tasarlanmış olması gösterilebilir. Beton modellerinden elde edilen şekil değiştirmeler irdelendiğinde dayanım değerlerine göre şekil değiştirme değerleri için daha büyük hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Analitik modellerin yaptığı kabullere bağlı olarak, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değeri için hesaplanan hata yüzdesi tüm modellerde aynıdır. Bununla birlikte, benzer kabulleri yapan bazı modellerin de yüzde oranları aynı olabilmektedir. Örneğin, Hognestad ve Kent-Park modelleri ile Mander ve TBDY 2018 modelleri kendi aralarında σ - ϵ grafiğinde özellikle grafiğin ilk kısmında benzer eğimlere sahip olduğundan elastik dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme için aynı hata miktarına sahiptirler. Bu şekil değiştirme için en yakın sonuç C20 sınıfında Hognestad ve Kent-Parktan elde edilirken, diğer sınıflarda Mander ve TBDY 2018'den elde edilir. En yakın sonuçlar C20 betonuna aitken en uzak olanlar C40 beton sınıfında hesaplanmıştır. Oldukça benzer sonuçlar plastik şekil değişimi başlangıcına karşılık gelen şekil değiştirme için de söz konusudur. C20 beton sınıfı için Hognestad ve Kent-Park en yakın sonuçları verirken, diğer sınıflarda Mander ve TBDY 2018 en iyi sonuçları sunmuştur. Bu şekil değiştirme değerinde ise en iyi sonuçlar C25 betonu için hesaplanır, en uzak sonuçlar C30 betonu için hesaplanmıştır. Maksimum şekil değiştirmede ise C40 beton sınıfı dışında, diğer beton sınıfları için en iyi sonuçlar TBDY 2018 kullanılarak hesaplanmıştır. C40 beton sınıfında maksimum şekil değişimini 0.0038 olarak kabul eden Hognestad ve Saatçioğlu-Razvi en iyi sonucu sunmuştur.

Tablo 3. Silindir numunelerin deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla elde edilen yüzdelik hata değerleri

C20/25		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	22.99	22.27	23.08	11.73	18.53	31.22	40.56	62.04	44.81	52.53	
Kent-Park	9.40	8.57	9.50	38.91	18.53	31.22	40.56	52.65	31.16	36.30	
Saatçioğlu-Razvi	9.40	8.62	9.50	29.75	75.00	35.49	40.56	62.04	41.16	23.70	
Mander	9.40	8.52	9.50	2.50	31.47	33.54	40.56	60.04	39.87	24.35	
TBDY 2018	9.40	8.52	9.50	100.00	31.47	33.54	40.56	50.05	24.84	11.96	
C25/30		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	19.20	17.99	19.17	10.59	42.01	3.56	19.19	38.06	35.77	63.00	
Kent-Park	4.94	3.56	4.91	38.12	42.01	3.56	19.19	34.80	32.39	58.48	
Saatçioğlu-Razvi	4.94	3.60	4.91	28.86	56.43	9.55	19.19	38.06	31.52	42.90	
Mander	4.94	3.52	4.91	28.86	31.35	5.98	19.19	34.80	30.65	44.63	
TBDY 2018	4.94	3.52	4.91	100.00	31.35	5.98	19.19	18.50	13.31	40.65	
C30/37		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	22.34	21.97	22.33	13.91	23.82	56.87	57.98	61.61	16.36	68.72	
Kent-Park	5.23	4.60	5.21	38.96	23.82	56.87	57.98	58.35	12.98	66.51	
Saatçioğlu-Razvi	5.23	4.68	5.21	32.82	122.26	62.81	57.98	61.61	12.15	50.39	
Mander	5.23	4.49	5.21	19.01	23.51	56.38	57.98	58.35	13.33	53.47	
TBDY 2018	5.23	4.49	5.21	19.01	23.51	56.38	57.98	42.05	3.49	50.13	
C35/45		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	21.20	21.39	21.19	12.18	45.77	34.12	29.09	23.63	1.32	12.29	
Kent-Park	1.24	1.16	1.22	97.77	45.77	34.12	29.09	20.37	2.06	11.95	
Saatçioğlu-Razvi	1.24	1.20	1.22	9.90	144.20	40.06	29.09	23.63	2.90	45.01	
Mander	1.24	0.93	1.22	14.55	35.74	32.64	29.09	20.37	1.04	30.13	
TBDY 2018	1.24	0.93	1.22	137.38	35.74	32.64	29.09	4.07	17.69	39.36	
C40/50		Dayanım (%)				Şekil Değişirme (%)				Süneklik (%)	Enerji (%)
Beton Modeli	fe	f _{pn}	fc	f _{cu}	ε _e	ε _{pn}	ε _c	ε _{cu}	μ	Tüketilen	
Hognestad	25.19	23.33	25.22	33.17	84.95	14.49	12.12	13.12	19.70	5.15	
Kent-Park	2.38	0.31	2.40	126.73	84.95	14.49	12.12	16.38	23.00	6.46	
Saatçioğlu-Razvi	2.38	0.19	2.40	7.92	183.39	22.50	12.12	13.12	19.70	52.47	
Mander	2.38	0.58	2.40	46.63	65.52	14.14	12.12	16.38	23.00	32.41	
TBDY 2018	2.38	0.58	2.40	176.24	65.52	14.14	12.12	32.68	39.48	41.64	

Tablo 3 incelendiğinde, süneklik açısından en iyi sonuçların C35 ve C40 beton sınıfı hariç, diğer beton sınıflarında TBDY 2018 sargısız beton modeline ait olduğu görülmüştür. C35 beton sınıfında ise Mander modeli en yakın sonucu verirken, C40 beton sınıfında ise bu sonuç Saatçioğlu-Razvi ve Hognestad modellerine aittir. Buna göre düşük dayanımlı beton sınıfları için hesaplanan süneklik değerlerinde TBDY 2018 yakın değerler verirken dayanımı daha yüksek betonlarda bu durum değişmektedir.

Her bir beton sınıfı için her bir beton modelinden hesaplanan tüketilen toplam enerji miktarları deneysel

verilerle kıyaslandığında ortaya sünekliktekinе benzer bir sonuç çıkmaktadır. C35 ve C40 beton sınıfı hariç diğer beton sınıflarına ait σ - ϵ eğrilerinden hesaplanan tüketilen enerji için en yakın değerlerin TBDY 2018 sargısız beton modelinden elde edildiği gözlenmiştir. C35 beton sınıfı için Kent-Park, C40 beton sınıfı içinse Hognestad beton modelleri en yakın sonuçları veren modeller olmuştur.

4 Sonuçlar

Çalışma kapsamında göz önüne alınan sargısız beton modellerinden TS500 de yer alan bazı beton sınıfları için

hesaplanan dayanım, şekil değiştirme, süneklik ve tüketilen toplam enerji miktarları açısından hem deneysel verilerle hem de TBDY 2018 ile bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu doğrultuda yapılan deneysel ve analitik çalışmalar ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

*Beton sınıflarına ait dayanım değerlerine göre deneysel verilerle en çok uyum sağlayan verilerin TBDY 2018 ve Mander sargısız beton modellerinden elde edildiği görülmüştür. Ancak kopma dayanımında TBDY 2018 sargısız beton modelinde, betonun 0.005 değerinden sonra yük taşımadığı kabulü yapılarak bu değerle dayanım sıfır alınmaktadır. Deneysel çalışmada ise silindirik beton numunelerde kırılma gerçekleşinceye kadar beton numune yük taşımaktadır. Bu noktada TBDY 2018 sargısız beton modeli daha güvenli tarafta kalmak adına bu kabulü yaptığımızdan kopma dayanımı daha yüksek hata değerine sahiptir.

*Beton sınıflarının sahip olduğu dayanımların da, beton modellerinin doğrulukları üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Buna göre özellikle düşük dayanıma sahip beton sınıflarında Mander, TBDY 2018 ve Hognestad (kopma dayanımı için) etkinken, yüksek dayanıma sahip beton sınıflarında özellikle kopma dayanımı ve maksimum şekil değiştirme açısından Saatçioğlu-Razvi sargılı beton modelinin sargısız betonlar için revize edilerek kullanılan şeklinin de etkin olduğu görülmektedir.

*Beton numunelerin farklı noktadaki şekil değiştirme değerleri açısından en yakın sonuçlar, düşük dayanım sınıflı betonlar için Hognestad ve Kent-Park modellerinden hesaplanırken, daha yüksek dayanıma sahip beton sınıflarında Mander ve TBDY 2018 den hesaplanmıştır. Maksimum şekil değişimi açısından Saatçioğlu-Razvi sargılı beton modelinin de etkin olduğu gözlenmiştir.

*Analitik beton modellerinden hesaplanan süneklik değerlerinde ise yine düşük dayanımlı beton sınıfları için en iyi performansı TBDY 2018 sargısız beton modeli gösterirken, dayanımı yüksek betonlarda bu durum değişmektedir.

*Beton numunelerin yüklemeye boyunca tükettikleri toplam enerji miktarı açısından, düşük dayanımlı beton sınıfları için en etkili model TBDY 2018 olurken, yüksek dayanıma sahip sınıflarda ise Hognestad ve Kent-Park modelleri öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, analitik modellerin enerji tüketimine yaklaşımlarının gerçekte var olan enerji tüketim olgusundan daha farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Matematiksel modeller mevcut enerji tüketiminin büyük bir kısmının maksimum dayanımda gerçekleştiği yaklaşımına sahiptir. Ancak deneysel veriler, maksimum dayanımdan sonra kuyruk kısmı ve özellikle maksimum şekil değişiminden hemen önce, açığa çıkan enerjinin önemli bir kısmının tüketildiğini göstermektedir.

Yukarıda sıralanan sonuçlara göre matematiksel modeller, özellikle deney yapma imkânına sahip olunamayan durumlarda ya da betonarme yapıları tasarlarken kesit analizlerinde, büyük kolaylıklar sağlamaktadırlar. Ancak seçilen modellere göre tasarım ya da analiz yapılırken, bu modellerin doğruluk dereceleri ya da yapı analizinde önemli bir yere sahip özellikler açısından güçlü ve zayıf yönlerinin bilinmesi analizlerin doğruluğu ve

güvenilirliği açısından önemlidir. Bu bağlamda yapılan çalışma sonucunda, mevcut deprem yönetmeliğinde yer alan TBDY 2018 sargısız beton modelinin dayanım ve şekil değiştirme açısından iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Süneklik ve enerji tüketimi açısından ise düşük dayanım sınıfına sahip betonlarda daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca analizlerde ve tasarımda beton modeli seçilirken, kullanılacak beton sınıfı ve dayanımının da önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin çimento, su miktarı, betonun kompozitesi, yüklemeye tipi, yüklemeye hızı, yüklemeye geçmişi, kesit geometrisi gibi pek çok değişkene bağlı olduğu ancak çalışmada nedenleri açıklandığı üzere incelenen beton sınıfları için tek bir silindirik numuneye ait σ - ϵ eğrilerinden faydalandığı belirtilmiştir. Gelecek çalışmalarda ortaya çıkan kısıtların giderilerek, beton numunelerin σ - ϵ eğri karakteristiklerini değiştirmeden daha fazla sayıda numunenin ve ilave beton sınıflarının da dahil edilmesiyle deneysel olarak incelenmesi faydalı olacaktır. Böylece deneylerde kullanılan beton sınıfının artırılması ve bu sayede elde edilen sonuçların istatistiksel olarak daha geniş ölçekte değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu çalışmalar neticesinde dayanımı yüksek betonlar için matematiksel beton modeli üzerine bir çalışma düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] K. J. Bathe, and S. Ramaswamy, On three-dimensional nonlinear analysis of concrete structures. Nuclear Engineering and Design, 52 (3), 385-409, 1979. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(79\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(79)90029-3).
- [2] I. Carol, and J. Murcia, nonlinear time-dependent analysis of planar frames using an 'exact' formulation-I. theory. Computers & Structures, 33(1), 79-87, 1989. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(89\)90131-4](https://doi.org/10.1016/0045-7949(89)90131-4).
- [3] U. Ersoy, Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2007.
- [4] U. Ersoy ve G. Özcebe, Sarılmış betonarme kesitlerde moment-eğrilik ilişkisi analitik bir irdeleme. İMO Teknik Dergi, 9 (4), 1799-1827, 1998. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/12805/155419>.
- [5] E. Hognestad, A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois Engineering Exp. Station, Urbana-Champaign, United States, Bulletin, 49 (22), 1951.
- [6] W. W. L. Chan, The Ultimate strength and deformation of plastic hinges in reinforced concrete frameworks. Magazine of Concrete research, 7(21), 121-132, 1955. <https://doi.org/10.1680/mac.1955.7.21.121>.
- [7] M. Sargin, Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections. Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 4, 1971.

- [8] D. Kent and R. Park, Flexural members with confined concrete. Journal of Structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 97(7), 1969-1990, July 1971. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0002957>.
- [9] S. Popovics, A numerical approach to the complete stress-strain curves of concrete. Cement and Concrete Research, 3 (5), 583-59, 1973. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3).
- [10] S. A. Sheikh and S. M. Uzumeri, Analytical model for concrete confinement in tied columns. Journal of Structural Engineering, 108 (12), 2703-2722, 1982. <https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0006100>.
- [11] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114 (8), 1804-1826, 1988a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- [12] J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park, Observed stress-strain behavior of confined concrete. Journal of Structural Engineering, 114 (8), 1827-1849, 1988b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1988\)114:8\(1827\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1988)114:8(1827)).
- [13] M. Saatcioglu and S. R. Razvi, Strength and ductility of confined concrete. Journal of Structural Engineering, 118(6), 1590-1607, 1992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1992\)118:6\(1590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1992)118:6(1590)).
- [14] K. M. El-Dash and S. H. Ahmad, a model for stress-strain relationship of spirally confined normal and high-strength concrete columns. Magazine of Concrete Research, 47(171), 177-184, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF02473125>.
- [15] M. M. Attard and S. Setunge, Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. Materials Journal, 93(5), 432-442, 1996.
- [16] B. Assa, M. Nishiyama and F. Watanabe, New approach for modeling confined concrete. I: Circular columns. Journal of Structural Engineering, 127(7), 743-750, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:7\(751\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(751)).
- [17] A. İlki ve N. Kumbasar, Sargılı beton için mevcut modellerin deneysel verilerle karşılaştırılması. Teknik Dergi, 12(3), 2419-2433, 2001. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12794/155379>.
- [18] A. İlki, T. Fukuta ve P. Özdemir, Sargılı beton davranışı ve üç doğrudan oluşan gerilme-şekil değiştirme modeli. Teknik Dergi, 14(1), 2853-2871, 2003. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/1278/155358>.
- [19] H. Özmen, M. İnel ve H. Bilgin, Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (2), 2007. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6672/88386>.
- [20] S. Foroughi, R. Jamal ve B. Yüksel, TBDY 2018 ve Mander modeline göre sargılı betonun gerilme-şekil değiştirmesinin araştırılması. El-Cezeri, 8(1), 363-375, 2021. <https://doi.org/10.31202/ecjse.788121>.
- [21] S. B. Yüksel and S. Foroughi, Betonarme kolonların sargısız ve sargılı beton dayanımının analitik olarak araştırılması. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3), 612-631, 2019. <https://doi.org/10.36306/konjes.613880>.
- [22] B. Uzbaş, Beton için geliştirilen gerilme-şekil değiştirme modellerinin karşılaştırılması. Politeknik Dergisi, 17(3), 115-126, 2014. <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33071/368015>.
- [23] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2018.
- [24] TS500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara, 2000.
- [25] TS EN 206-1, Beton, Özellik, Performans, İmalat, Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [26] TS EN 12390-1 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [27] TS EN 12390-2 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyle-Bölüm 2: Dayanım Deneylelerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [28] T. Demir, B. Demirel ve A. Demirbilek, Farklı su bağlayıcı ve kimyasal katkı oranlarına sahip yüksek dayanımlı betonların işlenebilirlik ve dayanım özellikleri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 34 (1), 161-170, 2022. <https://doi.org/10.35234/fumbd.990036>.
- [29] T.Y. Erdoğan, Beton. ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2010.
- [30] İ. B. Topçu ve A. Uğurlu, Betonda elastisite kuramı ve baraj betonları için statik e-modülünün kompozit modellerle tahmini, Teknik Dergi, 18 (86), 4055-4067, 2007. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12772/155292>.
- [31] M. Pekgöz, Görüntü işleme yöntemiyle betonda gerilme-şekil değiştirme davranışının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [32] P.K. Mehta, Concrete. Prentice-Hall, USA, 2006.
- [33] O.F. Slate, and L.B. Meyers, Deformation of plain concrete. 5. International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
- [34] O.N. Oktar, Bağlayıcı hamurun yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1977.
- [35] S. Mindess, and J.F. Young, Concrete. Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- [36] S.D. Santiago, and H.K. Hilsdorf, Fracture mechanisms of concrete under compressive loads, Cement Concrete Research, 3 (4), 363-388, 1973.
- [37] H.H. Bache, and P.N. Christensen, Observations on strength and fracture in lightweight and ordinary concrete. Proceedings of and International Conference on the Structure of Concrete and Its Behaviour under Load, London, 1965.

- [38] A.M. Neville, Properties of Concrete. Pitman Books Limited, London, 1981.
- [39] M. P. Kaya, Mevcut betonarme binaların deprem performanslarının belirlenmesinde doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerin karşılaştırılması üzerine sayısal bir inceleme. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [40] H. Özmen, M. İnel ve H. Bilgin, Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22 (2), 2013. <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6672/88386>
- [41] A. C. Aydın ve B. Bayrak, Betonarme perde duvarların farklı yapı malzemeleri açısından değerlendirilmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10 (1), 217-240, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.751562>
- [42] H. E. H. Roy and M.A. Sozen, Ductility of concrete. Special Publication, 12, 213-235, 1965.
- [43] A. Nzafakumunsi, T tipi plan düzensizliği olan betonarme yapıların doğrusal olmayan yöntemle performansının değerlendirmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [44] O. Merter ve T. Uçar, Betonarme kesitlerin doğrusal elastik ötesi davranışında tüketilen enerjiye boyuna donatı oranının, enine donatı aralığının ve eksenel yükün etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4 (1), 21-39, 2015. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239360>.





Tüf katkılı yüksek plastisiteli killerde kıvam limitleri ve şişme potansiyeli ilişkisi

Consistency limits and swelling potential relationship in tuff added high plasticity clays

Yasemin Aslan Topçuoğlu^{1,*} , Zülfü Gürocak² 

^{1,2} Firat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

Öz

Bu çalışmada asidik ve bazik tüf katkısının yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ile şişme potansiyeline olan etkileri ve bu özellikler arasındaki ilişkileri incelenmiştir. Bu amaçla %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik tüf ve bazik tüf katkıları içeren örnekler optimum su içeriğinde sıkıştırılarak kür öncesi ve 28 günlük kür sonrasındaki kıvam limitleri, şişme basıncı ve şişme yüzdesi belirlenmiştir. Katkısız kil ve tüf katkılı örneklerde şişme basıncı ve şişme yüzdesi değişimlerinin kıvam limitleriyle olan ilişkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda artan katkı oranı ve kür etkisiyle hem LL hem de PI değerlerinde azalmalar, PL değerlerinde ise artma ve azalmalar oluşmuştur. Örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de artan katkı oranı ile azalmıştır. Regresyon analizi sonuçlarına göre asidik tüf katkılı örneklerin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif ilişkilerin olduğu belirlenmiştir. Bazik tüf katkılı örnekler de ise LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli bir pozitif ilişkiler bulunurken, PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında herhangi bir anlamlı ilişki belirlenmemiştir.

Anahtar kelimeler: Likit limit, Plastik limit, Regresyon analizi, Şişme basıncı, Şişme yüzdesi, Tüf

Abstract

In this study, the effects of acidic and basic tuff additives on the consistency limits and swelling potential of high plasticity clay and the relationship between these properties were investigated. For this purpose, samples containing 5, 10, 15 and 20% acidic tuff and basic tuff additives were compressed at optimum water content, and the consistency limits, swelling pressure and swelling percentage were determined before and after curing for 28 days. The relationship of swelling pressure and swelling percentage changes with consistency limits in pure clay and tuff added samples was investigated. As a result of the experimental studies, decreases in both LL and PI values, and increases and decreases in PI values have occurred with increasing additive ratio and curing effect. Swelling pressure and swelling percentage values of the samples also decreased with increasing additive ratio. According to the results of the regression analysis, it was determined that there were very strong positive relationships between LL, PL and PI of the acidic tuff added samples, with swelling pressure and swelling percentage. In the basic tuff added samples, there was a very strong positive relationship between LL and PI with swelling pressure and swelling percentage, but no significant relationship was found between PL with swelling pressure and swelling percentage.

Keywords: Liquid limit, Plastic limit, Regression analysis, Swelling pressure, Swelling percentage, Tuff

1 Giriş

Artan su içeriğine bağlı olarak hacimsel artışın meydana geldiği killi zeminler, şişen zeminler olarak adlandırılır ve bu zeminlerde meydana gelen şişmenin miktarı su içeriğine, zeminin içerdiği kilin yüzdesine ve özellikle kilin mineralojik bileşimine bağlı olarak değişebilmektedir. Şişen zeminlerde şişmeyi karakterize etmek için kullanılan ve şişme potansiyeli olarak adlandırılan iki terim vardır. Bunlar, şişme yüzdesi ve şişme basıncıdır. Zemindeki değişebilir katyonların bileşimi, karbonatların oranı, doku, zemin suyunun kimyasal bileşimi ve kil daneleri arasındaki

çimentolanma gibi pek çok faktörden etkilenen şişme potansiyeli, zeminin hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade etmektedir [1]. Şişme, sadece su içeriğindeki artışa bağlı olarak hacimdeki artışı değil, aynı zamanda ortamdaki suyun yokluğu durumunda hacimde meydana gelen azalmayı yani büzülme de vurgulamaktadır. Özellikle, yağışlı bölgelerde şişme potansiyeline sahip killi zeminler üzerinde inşa edilmiş olan yapılarda, zeminin şişme basıncının, üzerindeki yapıdan kaynaklanan ek gerilmelerden daha büyük olması durumunda yapıda önemli hasarlar meydana gelebilmektedir [2, 3]. Şişme nedeniyle meydana

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yaslan@firat.edu.tr (Y. Aslan Topçuoğlu)
Geliş / Received: 16.02.2023 Kabul / Accepted: 24.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1251975

gelebilecek bu hasarların önlenmesi ve doğru zemin iyileştirme yöntemine karar verilebilmesi ancak zeminin şişme potansiyelinin özellikle de şişme basıncının doğru şekilde belirlenmesi ve tasarım sırasında dikkate alınması ile mümkündür [4-6]. Killerin şişme basıncının izin verilebilir değerlerden daha yüksek olduğu durumlarda zeminde iyileştirme yöntemlerine başvurulur ve yapılan iyileştirmeler ile zeminin şişme potansiyelinin azaltılmasına çalışılır. Bu amaçla yapılan zemin iyileştirmelerinden birisi de katkı malzemeleri kullanılarak yapılan stabilizasyondur. Bu yöntemde, killi zemine eklenen ve puzolanik özelliğe sahip olan tuf, silis dumanı, sönmüş kireç, uçucu kül, mermer tozu, pomza ve çimento gibi katkı maddeleri ile zeminde puzolanik reaksiyonların oluşumu sağlanmakta ve böylece zeminin taşıma gücü, dayanım, oturma, sıkışma, şişme ve geçirimsizlik gibi mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir [7-21]. Bu konuda yapılan çalışmalarda, katkı malzemesinin eklenmesinden sonra katkı ile zemine ait elementlerin reaksiyona girdiği ve bunun sonucu olarak da zeminin su içeriğinin kısa sürede azalarak işlenebilir hale geldiği, uzun süreçte ise zeminin dayanım ve duraylılığının arttığı, sıkışabilirlik, şişme potansiyeli ve hacimsel değişimin ise azaldığı belirtilmektedir. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar farklı türde ve oranda katkı kullanımıyla birlikte sıkışabilirliğin azaldığını ifade etmişlerdir [22-24]. Ayrıca katkı kullanılışının şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerini de azalttığı belirlenmiştir [25-29]. Literatür incelendiğinde ön konsolidasyon basıncı ve konsolidasyon katsayısının, zeminde katkı malzemesi kullanımına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [30-32]. Zorluer ve Gücek [33]'e göre yüksek plastisiteli inorganik kile belirli oranlarda mermer tozu (%0, 3, 5, 10, 15) karıştırılarak optimum su içeriğinde dört farklı örnek hazırlanmış ve hazırlanan karışımlarda mermer tozu oranı arttıkça şişme yüzdesinin azaldığı ifade edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, %15 oranına kadar mermer tozu katkısının şişme potansiyelini önemli derecede azalttığı belirlenmiştir. Çimen vd. [34] yaptıkları çalışmada katkı olarak pomza kullanımının LL, PL, PI ve şişme basıncını azalttığını belirlemişlerdir.

Başarılı bir stabilizasyon için kullanılacak katkı malzemesinin seçimi önemli olmakla birlikte katkı malzemesinin puzolanik özelliğe sahip olması, ucuz olması, kolay bulunabilir ve çevre dostu olması oldukça önemlidir. Malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken bu özellikler, kireç, silis dumanı, uçucu kül gibi yapay katkı malzemesi yerine pomza, volkanik kül ve tuf gibi doğal katkı malzemelerin kullanımının artırılması gerektiğini göstermektedir. Bu nedenle doğal katkı malzemelerinin araştırılması, bu malzemelerin özelliklerinin belirlenmesi ve stabilizasyonda kullanılmaları durumunda zeminin hangi özellikleri üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduklarının ortaya konulması önem taşımaktadır. Bu çalışmada, tuf katkısının yüksek plastisiteli kilin kıvam limitleri ve kilin şişme potansiyeline olan etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kili, katkı malzemesi olarak da ekonomik ve ekolojik kriterlere sahip, sürdürülebilir bir malzeme olan asidik ve bazik karakterli tüfler kullanılmıştır. Bentonite farklı oranlarda asidik ve

bazik tuf eklenerek hazırlanan örneklerin kür öncesi ve sonrasındaki likit limit, plastik limit, şişme basıncı ve şişme yüzdesinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

2 Materyal ve metod

Çalışma örneklerin derlenmesi, deneye hazırlanması, Standard proktor, likit limit, plastik limit, şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneylerinin yapılması şeklinde gerçekleştirilmiştir.

2.1 Örneklerin derlenmesi ve hazırlanması

Çalışmada kullanılan bentonit kili Reşadiye (Tokat) kil ocağından, bazik karakterli tuf Ağın (Elazığ) bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'ndan, asidik karakterli tuf ise Gümüşhane bölgesinde yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bentonitin literatüre girişi ilk kez sabun kili adıyla 1876 yılında olmuştur ve bentonit adı bulunduğu Rock Creek sahasındaki Fort Benton'dan (Montana, ABD) gelmektedir. Alüminyum ve magnezyum içeriği bakımından zengin volkanik küllerin, volkanik kayaçların ve tüflerin kimyasal ayrışması ya da bozuşması sonucunda meydana gelen bentonit kili, simektit grubu minerallerden montmorilloniti yüksek oranda içermekte ve kimyasal olarak hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşmaktadır. Bentonitler, ana değişebilir katyon türlerine göre sodyum bentonit, kalsiyum bentonit ve sodyum-kalsiyum (ara tip) bentonit olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [35]. Dane boyutu 2 µm (0.002 mm) veya daha küçük olan ve en ayırt edici özelliği ise özellikle Na-bentonitlerin su ile etkileşimi durumunda şişerek hacimlerinde büyük değişimin meydana gelmesidir. Bentonit kurduğunda ise büzülerek hacimleri küçülmekte ve yüzeyinde çatlaklar oluşmaktadır [36]. Bu çalışmada, kullanılan yüksek plastisiteli kil, Reşadiye bentonit ocağından temin edilen katkısız bentonittir. Aslan Topçuoğlu [37] tarafından yaptırılan XRD analizlerine göre, bu ocaktan alınan bentonit kili montmorillonit, kuvars ve kalsit minerallerinden oluşmaktadır ve XRF analizi sonuçları (Tablo 1) bu bentonit kilinin Na-Bentonit sınıfında olduğunu göstermektedir. Laboratuvara getirilen bentonit kili 200 nolu elekten elenmiş ve sabit kütleye gelinceye kadar 105°C'de etüvde kurularak deneylere hazır hale getirilmiştir.

Katkı malzemesi olarak kullanılan asidik karakterli tuf, Gümüşhane ili ve civarında yüzeyleme veren Kızılkaya Formasyonu'ndan derlenmiştir. Bu formasyon ilk kez Güven [38] tarafından tanımlanmıştır. Riyodasit/dasit ve bunların piroklastitlerden oluşan formasyonun kayaçları otobreşik ve akıntı yapıları olmak üzere iki farklı formdadır ve üst seviyelerinde piroklastik kayaçlar yüzeylenmektedir. Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda formasyonun yaşı Geç Kretase olarak verilmektedir [39-41]. XRF analizi sonuçlarına göre tüflerin SiO₂ miktarı %63'den fazladır ve asidik karakterlidir (Tablo 1). XRD analizi sonuçlarına göre kuvars, kalsit, feldspat ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır [37].

Bazik karakterli tuf ise Elazığ ili Ağın bölgesinde yüzeyleme veren Karabakır Formasyonu'nun derlenmiştir. Pliyo-Pleistosen yaşlı Karabakır Formasyonu, genel olarak bazalt, volkanik breş ve tüflerden oluşan bir litolojiye sahiptir. Elazığ'ın batı ve kuzey bölgelerinde yüzeylenen bazaltik

bileşimli bu kayalar alkalın özelliktedir [42]. Karabakır Formasyonu'na ait tüflerde yapılan XRD ve XRF analizlerine göre tüfler esas olarak feldispat, dolomit, kalsit ve ikincil kil minerallerinden oluşmaktadır [37]. SiO₂ miktarı ise %45'den azdır ve bazik karakterlidir (Tablo 1). Bu çalışmada katkı olarak kullanılan asidik ve bazik karakterli tüflerin puzolanik özellikleri Aslan Topçuoğlu ve Gürocak [43] tarafından incelenmiş, yapılan analiz sonuçları standartlarda verilen sınır değerler ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2).

Tablo 1. Katkısız kil, asidik ve bazik tüflere ait ana oksit yüzdeleri [37]

Ana Oksitler (%)	Kil	Asidik Tüf	Bazik Tüf
SiO ₂	62.10	69.10	31.40
Al ₂ O ₃	17.60	20.70	7.15
Fe ₂ O ₃	3.63	0.47	3.49
MgO	2.00	0.19	2.11
CaO	2.86	0.76	28.70
Na ₂ O	2.58	0.39	0.60
K ₂ O	0.92	1.43	0.87
MnO	0.10	<0.01	0.03
TiO ₂	0.32	0.29	0.41
P ₂ O ₅	0.14	0.06	0.09
SO ₃	0.076	0.90	0.036
Sr	0.073	0.024	0.033
Cr ₂ O ₃	<0.01	<0.01	0.02
Ateşte kayıp	6.60	5.50	24.80

Araştırmacılar tarafından yapılan değerlendirmeye göre asidik tüflerin tüm özellikleri TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46] standartlarında verilen limit değerlere uygun olmasına karşın, puzolanik aktivite deneyinden ve 7 günlük basınç dayanımı deneylerinden elde edilen sonuçlara göre asidik tüflerin CaO miktarının az olması nedeniyle bu tüfler yeterli puzolanik aktivite gösterememektedir. Araştırmacılar, asidik tüflerin katkı malzemesi olarak kullanılabilirlik durumunda, puzolanik aktivitenin geliştirilebilmesi için CaO eksikliğini giderilmesine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. Aynı çalışmanın sonuçlarına göre,

Tablo 2. Asidik ve bazik tüflerin TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46]'e göre puzolan olarak kullanılabilirlik sınırlarına uygunluğu

Özellik	Asidik Tüf	Bazik Tüf	TS 25 [44]	TS EN 450-1 [45]	ASTM C 618 [46]
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	90.27	42.04	≥ 70.00	≥ 70.00	≥ 70.00
MgO (%)	0.19	2.11	≤ 5.00	≤ 4.00	
SO ₃ (%)	0.90	0.036	≤ 3.00	≤ 3.00	≤ 4.00
K ₂ O + 0.658Na ₂ O * (%)	1.69	1.27	-	≤ 5.00	≤ 1.50
Serbest CaO (%)	0.76	28.70	-	≤ 2.50	-
Reaktif SiO ₂ (%)	28.11	23.15	≥ 25.00	≥ 25.00	-
Ateşte kayıp (%)	5.50	24.80	-	≤ 5.00-9.00	≤ 10.00
7 Günlük Serbest Basınç Dayanımı (MPa)	2.05	3.60	≥ 4 MPa	-	-

* Eşdeğer alkali madde içeriği

bazik tüflere ait değerlerin birçoğunun TS 25 [44], TS EN 450-1 [45] ve ASTM C 618 [46] standartlarında verilen limitler dışında olduğu ve bu tüflerin tek başına puzolanik özellik göstermediği belirtilmektedir.

Arazi çalışması ile derlenen asidik ve bazik tüf blokları laboratuvara getirildikten sonra öğütülerek 200 nolu elekten elenmiş ve sabit kütleye gelinceye kadar 105°C'de etüvde kurutulmuştur. Daha sonra iki ayrı grup örnek hazırlanmıştır. İlk gruptaki örnekler bentonit kiline %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik tüf, ikinci gruptaki örnekler ise aynı oranlarda bazik tüf katkısı ilave edilerek hazırlanmıştır.

2.2 Deneysel çalışmalar

Bu çalışma kapsamındaki deneysel çalışmalar kür öncesi ve kür sonrası deneysel çalışmalar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Kür öncesi deneysel çalışmaların ilk safhasında katkısız bentonit ve katkılı örneklerin optimum su içeriklerini belirlemek amacıyla standard proktor deneyleri yapılmıştır. Sonraki aşamada ise hazırlanan katkılı ve katkısız örnekler optimum su içeriği değerleri dikkate alınarak sıkıştırılmış ve bu örneklerin yarısında kür öncesinde likit limit, plastik limit, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında ise 28 günlük küre tabii tutulan katkısız ve katkılı örneklerde aynı deneyler tekrarlanmıştır.

2.2.1 Standard Proktor deneyi

Maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{kmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bu deney, ASTM D 698 [47] standardına göre 30.5 cm yükseklikten serbest düşmeye bırakılan 2.5 kg'lık yük altında zeminin üç tabaka halinde kalıp (mold) içerisine sıkıştırılması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmaların ilk aşamasında katkısız kil ve kuru ağırlıkça %5 AT, %10 AT, %15 AT, %20 AT, %5 BT, %10 BT, %15 BT ve %20 BT katkıları eklenerek hazırlanmış olan katkılı örneklerde ASTM D 698 [47] standardına göre standard proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Örneklerde gerçekleştirilen proktor deneyleri ile belirlenen γ_{kmax} ve w_{opt} değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Katkısız kil ve tuf katkılı kil örneklerinin γ_{kmax} ve w_{opt} değerleri

Örnek	γ_{kmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
K	11.57	38
K+%5AT	10.49	40
K+%10AT	11.47	41
K+%15AT	11.24	42
K+%20AT	11.07	48
K+%5BT	10.98	40
K+%10BT	10.79	43
K+%15BT	10.55	46
K+%20BT	10.49	47

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Deney sonuçlarına göre, katkısız kilin w_{opt} değeri %38, γ_{kmax} değeri ise 11.57 kN/m³'tür. Katkılı örneklerde γ_{kmax} değerleri 10.49-11.47 kN/m³ arasında, w_{opt} değerleri ise %40-48 arasında değişmektedir. Asidik ve bazik tuf katkı oranları arttıkça, örneklerin γ_{kmax} değerleri azalmakta, buna karşın w_{opt} değerleri ise artmaktadır.

2.2.2 Likit ve Plastik Limit deneyleri

Kıvam (Atteberg) limitleri su içeriğine bağlı olarak ince daneli zeminlerde kıvamın değişim gösterdiği sınırlardır ve bu limitlerden en önemlileri ise likit limit (LL) ve plastik limittir. Zeminin viskoz kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği LL, zeminin yarı katı kıvamdan plastik kıvama geçtiği andaki su içeriği ise PL olarak tanımlanmaktadır. Laboratuvar çalışmalarının bu aşamasında, hazırlanmış olan 18 adet katkısız ve katkılı örneğin 9 tanesinde ASTM D4318-17e1 [48] standardına göre LL ve PL deneyleri gerçekleştirilmiş ve örneklerin kür öncesi LL ve PL değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak örneklerin kür öncesi plastisite indisi (PI) değerleri hesaplanmıştır. 28 günlük kür uygulanan 9 örnekte LL ve PL deneyleri tekrarlanmış, örneklerin kür sonrası LL ve PL değerleri belirlenerek PI değerleri hesaplanmıştır. Deneylere ait sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Katkısız örnek için yapılan zemin sınıflamasında çalışmada kullanılan bentonitin zemin sınıfı Birleştirilmiş Zemin Sınıflamasına (UCSC) göre yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

2.2.3 Şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri

Zeminlerde şişme, su içeriği ve gerilme şartlarındaki değişimlerin sonucunda meydana gelen hacim artışıdır. Bu özellik hem şişme yüzdesini hem de şişme basıncını ifade eden şişme potansiyeli olarak adlandırılır [49, 50]. Şişme potansiyelinin en önemli bileşeni olan şişme basıncı, killi zeminlerin, suyla teması sonucunda, matris emmedeki azalma nedeniyle ortaya çıkan hacim artışları engellenmeye çalışıldığında, oluşan basınçtır ve kilin su veya elektrolit absorbe etmesine izin verilmesi halinde, kil-su sistemini

istenen boşluk oranında tutmak için gerekli basınç olarak tanımlanmaktadır [51].

Tablo 4. Katkısız ve katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası LL, PL ve PI değerleri

Örnek	Kürsüz			Kürlü		
	LL (%)	PL (%)	PI (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
K	507	41	466	480	42	438
K+%5AT	463	37	426	441	39	402
K+%10AT	433	34	399	415	35	380
K+%15AT	424	35	389	406	36	370
K+%20AT	377	34	343	360	37	323
K+%5BT	487	43	444	458	38	420
K+%10BT	463	32	431	443	36	407
K+%15BT	454	30	424	430	34	396
K+%20BT	435	39	396	410	43	367

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Şişme basıncının ölçülmesinde kullanılan yöntemler sabit yük ve sabit hacim ödometre deneyleri olmak üzere iki tiptir. Sabit yük ödometre deneyinin, serbest şişme ödometre deneyi, çift ödometre deneyi, yüklü şişme ödometre deneyi ve Chinese yöntemi olmak üzere 4 tipi vardır [49, 50, 52-55]. Sabit hacim ödometre deneyleri ise sabit hacim ödometre deneyi ve deformasyon kontrollü deney yöntemi [49, 56, 57] olmak üzere iki çeşittir. Bu çalışmada, zemin örneklerinin şişme basınçlarını belirlemek için ASTM D 4546 [58] tarafından önerilen sabit hacim ödometre deney yöntemine (Metot-C) göre bir boyutlu ödometre deney aletinde şişme basıncı deneyleri yapılmıştır.

Zeminlerin şişme potansiyelinin önemli bir göstergesi olan şişme yüzdesi, örselenmemiş veya sıkıştırılarak hazırlanmış zemin örneğinin su altında bırakılması sonucu hacminde meydana gelen artışın, başlangıç hacmine göre yüzdesini ifade etmektedir [59]. Zeminlerin şişme yüzdesinin belirlenmesi konusunda farklı araştırmacılar tarafından önerilen ve prensipleri arasında önemli farklılıklar bulunan deney yöntemleri bulunmaktadır. Holtz ve Gibbs [60] zeminin şişme yüzdesini zeminin kuru halden, 7 kPa sürşarj yükü altında doymun hale gelmesi sırasında meydana gelen toplam hacim değişikliği olarak tanımlarken, Seed vd. [61] optimum su içeriğinde sıkıştırılmış zemin örneğinin, ödometre koşullarında 7 kPa sürşarj basıncı altında, su altında bırakılması sonucu meydana gelen düşey boy değiştirmesinin başlangıç numune yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadırlar. Snethen [62] ise örselenmemiş zemin örneğinin ödometre koşullarında, arazide maruz kalacağı yüke eşdeğer sürşarj yükü altında ıslatılması ve nihai denge doymunluk durumuna kadar örneğin hacminde meydana gelen değişiminin, başlangıç örnek yüksekliğine oranı olarak tanımlamaktadır. Günümüzde en fazla tercih edilen yöntem, ASTM D 4546 (2008) tarafından önerilen ve doğrudan bir

ölçüm tekniği olan tek boyutlu ödometre yöntemidir. Bu yöntemde Metot-A, B ve C olmak üzere üç farklı deney yöntemi önerilmektedir. Bu çalışmada Metod-A olarak önerilen serbest şişme yöntemi kullanılmıştır.

Katkısız ve %5, 10, 15 ve 20 oranlarında asidik ve bazik tuf katkılı örnekleri **Tablo 3**'te verilen w_{opt} değerlerinde Standard proktor ile sıkıştırılarak 18 adet örnek hazırlanmış ve bu örneklerin yarısına kür uygulanmadan, geriye kalan örneklerde ise 28 günlük kür sonrasında şişme basıncı ve şişme yüzdesi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ring içerisindeki örnekler ödometre hücresine yerleştirildikten sonra, sadece üst poroz blok ve yükleme başlığı ağırlığı altında 5 dk bekletildikten sonra hücre su ile doldurulmuş ve örneğin şişmesine izin verilmeden, hacmi sabit kalacak şekilde yüklemeler yapılmıştır. Yüklemelerde 0.01 mm'den büyük deformasyonların meydana gelmemesine dikkat edilmiştir. Örneğin hacminde artışın olmadığı ve daha fazla yüklemeye gerek görülmediği durumda deney sonlandırılmıştır. Bu deneyde, örneğe uygulanan nihai basınç, örneğin şişme basıncıdır.

Tablo 5. Katkısız ve katkılı örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri

Örnek	Kürsüz		Kürlü	
	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)
K	1030.72	21.5	861.05	18.92
K+%5AT	761.02	18.35	638.44	10.25
K+%10AT	760.04	16.75	563.9	9.4
K+%15AT	662.95	12.5	490.35	8.45
K+%20AT	588.42	9.45	393.26	6.75
K+%5BT	761.02	21.1	686.49	18.2
K+%10BT	741.41	18.8	662.95	17.15
K+%15BT	686.49	17.25	574.69	14.5
K+%20BT	564.88	12.6	490.35	11.75

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

Şişme yüzdesi ise optimum su içeriğindeki katkısız ve katkılı örneklerin standart proktor ile sıkıştırılması ile hazırlanan 18 adet örnekte gerçekleştirilmiştir. Örnekler öncelikle 7 kPa'lık sürşarj yükü altında 5 dk bekletildikten sonra ödometre hücresi tamamen su ile doldurularak örneğin serbestçe şişmesine izin verilmiş, örneklerin su altında bırakılmasından hemen sonra, farklı zaman aralıklarında şişme deformasyonları tamamlanana kadar kayıt altına alınmıştır. Katkısız ve katkılı örnekler için kür öncesi ve sonrasına ait şişme basıncı ve şişme yüzdesi deney sonuçları **Tablo 5**'de verilmiştir.

Deney sonuçlarına göre, katkısız kilin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa'dır ve bu değer kür sonrasında azalarak 861.05 kPa'a düşmüştür. Katkılı örneklerde şişme basıncı değerleri kür öncesinde 564.88-761.02 kPa arasında, kür sonrasında ise 393.26-686.49 kPa arasında değişmektedir.

Katkısız kilin şişme yüzdesi değeri %21.5 olup kür sonrasında %18.92'ye düşmüştür. Katkılı kil örneklerinde şişme yüzdesi değerlerinin kür öncesinde %9.45-21.1 arasında, kür sonrasında ise %6.75-18.2 arasında değiştiği belirlenmiştir.

3 Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneysel çalışmalar ile belirlenen katkılı ve katkısız örneklerin kür öncesi ve kür sonrası LL, PL, PI, şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri değerlendirilerek kürün, katkı oranı ve tipinin bu değerler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ayrıca basit istatistiksel analizler ile örneklerin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3.1 LL, PL ve PI değerlerindeki değişimler

Deney sonuçlarına göre katkısız kilin kür öncesi LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri ise %466 iken, kür sonrası LL değeri %480'e, PL %42, PI ise %438 olarak belirlenmiştir. Kür etkisi ile katkısız örneğin LL değeri %5.33, PI değeri %6.01 oranında azalırken, PL değeri ise %2.44 oranında artmıştır (**Tablo 6**).

Asidik tuf katkısı eklenmiş örneklerin kür öncesi LL, PL ve PI değerlerinde azalmalar belirlenmiştir. Meydana gelen azalma oranları katkı oranına bağlı olarak artmaktadır. Bu örneklerde kür sonrası belirlenen LL, PL ve PI değerlerindeki değişimlere bakıldığında, LL ve PI değerlerinin kür öncesine göre daha fazla oranda azaldığı görülmektedir. Örneklerin kür sonrası PL değerlerinde meydana gelen azalmalar LL ve PI değerlerindeki gibi düzenli azalma oranları şeklinde değildir. Kür sonrasında PL değerindeki maksimum azalma %10 asidik tuf katkılı örnekte %14.63 oranında meydana gelmiştir. Katkı oranının artışına bağlı olarak PL değerlerinde meydana gelen değişim oranları da azalmıştır (**Tablo 6**).

Bazik tuf katkılı örneklerde kür öncesi LL ve PI değerleri asidik tuf katkılı örneklerde olduğu gibi azalmalar meydana gelmiştir. Katkı oranının artışına bağlı olarak LL ve PI değerlerindeki azalmalarda artmaktadır. Ancak oluşan bu azalmalar asidik tuf katkılı örnekler için daha az orandadır. Bu örneklerde kür uygulanması sonucunda belirlenen LL ve PI değerlerindeki azalmalar kür öncesine göre daha fazla oranda meydana gelmiştir. PL değerleri ise düzenli olmayan değişimler sunmaktadır. Nitekim %5, 10 ve 15 bazik tuf katkılı örneklerde PL değerleri katkı oranının artışı ile azalmakta, ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte PL değeri %4.88 oranında artış göstermektedir (**Tablo 6**).

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda zeminde katkı malzemelerinin kullanılmasıyla LL ve PI değerlerinin azaldığı belirlenmiştir [25, 34]. Bazı çalışmacılar da artan katkı oranı ve topaklanma ile kilin plastisitesinin azaldığını ve daha düşük plastisite özelliği kazanmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir [63-66]. Bu çalışmada, kilde katkı malzemesi olarak tüflerin kullanılmasına ve kür süresine bağlı olarak LL ve PI değerlerinde meydana gelen azalmanın literatürdeki mevcut çalışmalardan elde edilen verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 6. Örneklerin kür öncesi ve sonrası LL, PL ve PI değerlerinde katkı oranına bağlı olarak oluşan değişimler

Örnek	Kür öncesi % değişim			Kür sonrası % değişim		
	LL	PL	PI	LL	PL	PI
K	-	-	-	-5.33	2.44	-6.01
K+%5AT	-8.68	-9.76	-8.58	-13.02	-4.88	-13.73
K+%10AT	-14.60	-17.07	-14.38	-18.15	-14.63	-18.45
K+%15AT	-16.37	-14.63	-16.52	-19.92	-12.20	-20.60
K+%20AT	-25.64	-17.07	-26.39	-28.99	-9.76	-30.69
K+%5BT	-3.94	4.88	-4.72	-9.66	-7.32	-9.87
K+%10BT	-8.68	-21.95	-7.51	-12.62	-12.20	-12.66
K+%15BT	-10.45	-26.83	-9.01	-15.19	-17.07	-15.02
K+%20BT	-14.20	-4.88	-15.02	-19.13	4.88	-21.24

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

3.2 Şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki değişimler

Katkısız ve katkılı örneklerde şişme basıncı değerleri incelendiğinde (Tablo 7), katkısız kil örneğinin kür öncesi 1030.77 kPa olarak belirlenen şişme basıncının kür sonrasında %16.46 azalarak 861.05 kPa değerine düştüğü görülmektedir. Asidik ve bazik tuf katkılı örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de benzer şekilde kür sonrasında azalmaktadır.

Farklı oranlarda asidik tuf katkısının eklenmesi sonucunda örneklerin hem şişme basıncı hem de şişme yüzdesinde önemli sayılabilecek azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalmalar katkı oranının artışına bağlı olarak fazlaşmış ve %20 asidik tuf katkılı örneğin şişme basıncında %42.91, şişme yüzdesinde ise %56.05 oranında azalmalar oluşmuştur.

Tablo 7. Örneklerin kür öncesi ve sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde katkı oranına bağlı olarak oluşan değişimler

Örnek	Kür öncesi % değişim		Kür sonrası % değişim	
	Şişme Basıncı	Şişme Yüzdesi	Şişme Basıncı	Şişme Yüzdesi
K	-	-	-16.46	-12.00
K+%5AT	-26.17	-14.65	-38.06	-52.33
K+%10AT	-26.26	-22.09	-45.29	-56.28
K+%15AT	-35.68	-41.86	-52.43	-60.70
K+%20AT	-42.91	-56.05	-61.85	-68.60
K+%5BT	-26.17	-1.86	-33.40	-15.35
K+%10BT	-28.07	-12.56	-35.68	-20.23
K+%15BT	-33.40	-19.77	-44.24	-32.56
K+%20BT	-45.20	-41.40	-52.43	-45.35

K:Kil, AT: Asidik tuf, BT: Bazik tuf

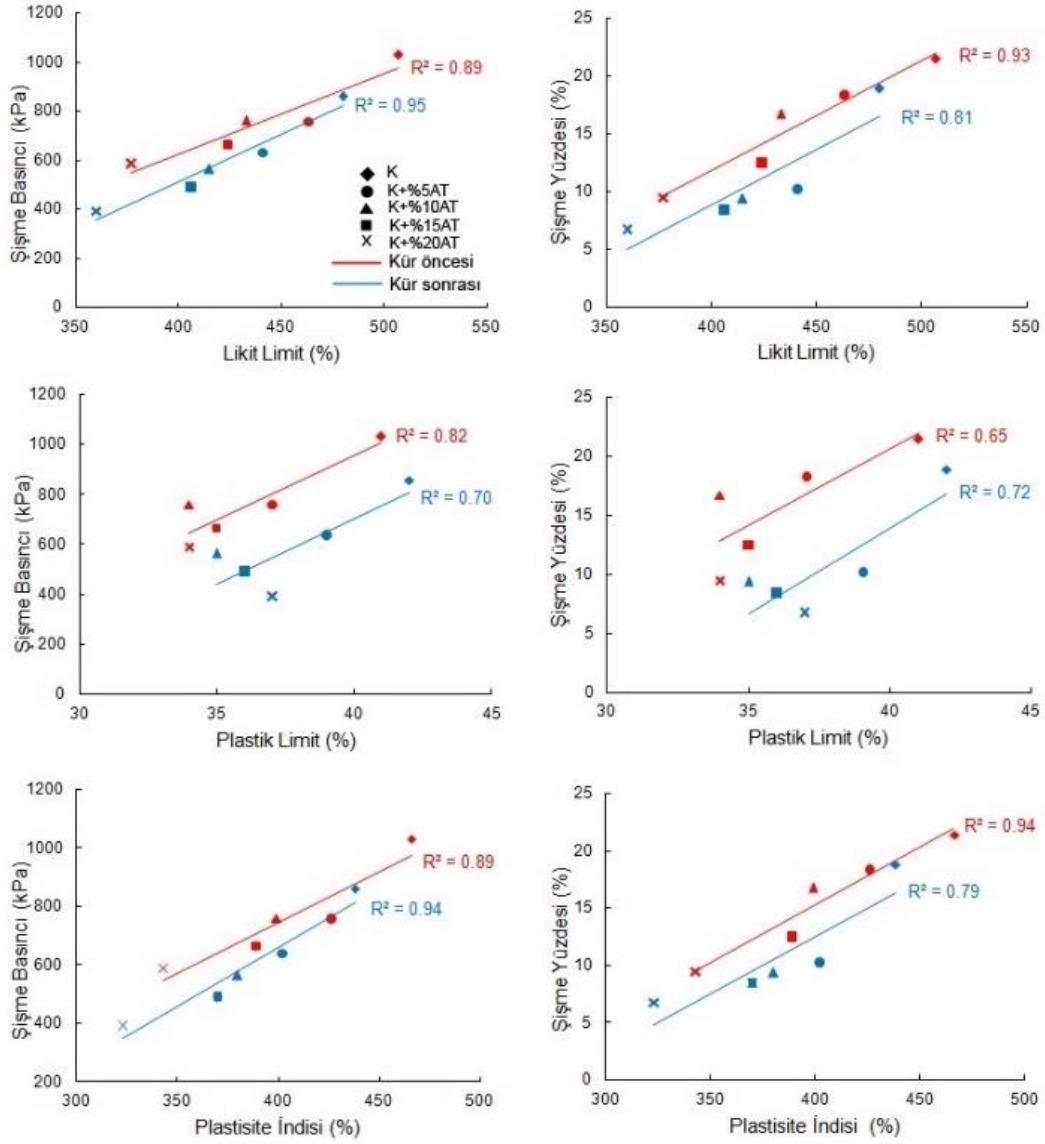
Bazik tuf katkılı örneklerde de asidik tuf katkılı örneklere göre değişim oranlarında olduğu gibi şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde önemli oranlarda azalmalar ortaya çıkmıştır. En fazla katkı oranının kullanıldığı %20 bazik tuf katkılı örnekte şişme basıncındaki azalma oranı %45.20'ye, şişme yüzdesindeki azalma oranı ise %41.40'a ulaşmıştır.

Katkılı örneklerin kür sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki değişimler incelendiğinde; bu değerlerdeki azalmanın kür öncesine göre daha fazla olduğunu görmek mümkündür. Asidik tuf katkılı örneklerde kür sonrasında şişme basıncındaki azalma oranı %61.85'e ulaşırken, şişme yüzdesindeki azalma oranı ise %68.60 olarak belirlenmiştir. Bazik tuf katkılı örneklerde de kür sonrası şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin kür öncesine göre azaldığı belirlenmiştir. Ancak bu azalma asidik tüflere göre daha az oranlarda meydana gelmiştir. %20 bazik tuf katkılı örneğin kür sonrasındaki şişme basıncı %52.43, şişme yüzdesi ise %45.35 oranında azalmıştır.

Farklı malzemelerin katkı olarak kullanılmasıyla zeminin şişme basıncının ve şişme yüzdesi değerlerinin azaldığı farklı araştırmacılar tarafından belirlenmiştir [29, 33, 34]. Ayrıca Little vd. [63] şişme potansiyeli ve şişme basıncında meydana gelen önemli miktardaki azalmanın, stabilizasyon sonucu zeminin plastisite indisindeki azalma ile ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Bu çalışmada kullanılan tuf katkılarının ve kür uygulamasının etkisiyle şişme yüzdesi ve şişme basıncı değerlerinde azalma meydana gelmiştir ve bu anlamda elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

3.3 LL, PL, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

Asidik ve bazik tuf katkılı örneklerde kür öncesi ve sonrasına ait LL, PL ve PI değerleri ile örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler basit regresyon analizleri ile incelenmiş ve veri dağılım grafikleri Şekil 1 ve 2'de verilmiştir. Şekil 1'de asidik tuf katkılı örnekler için verilen grafikler incelendiğinde, hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 1. Asidik tüf katkılı örneklerde LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

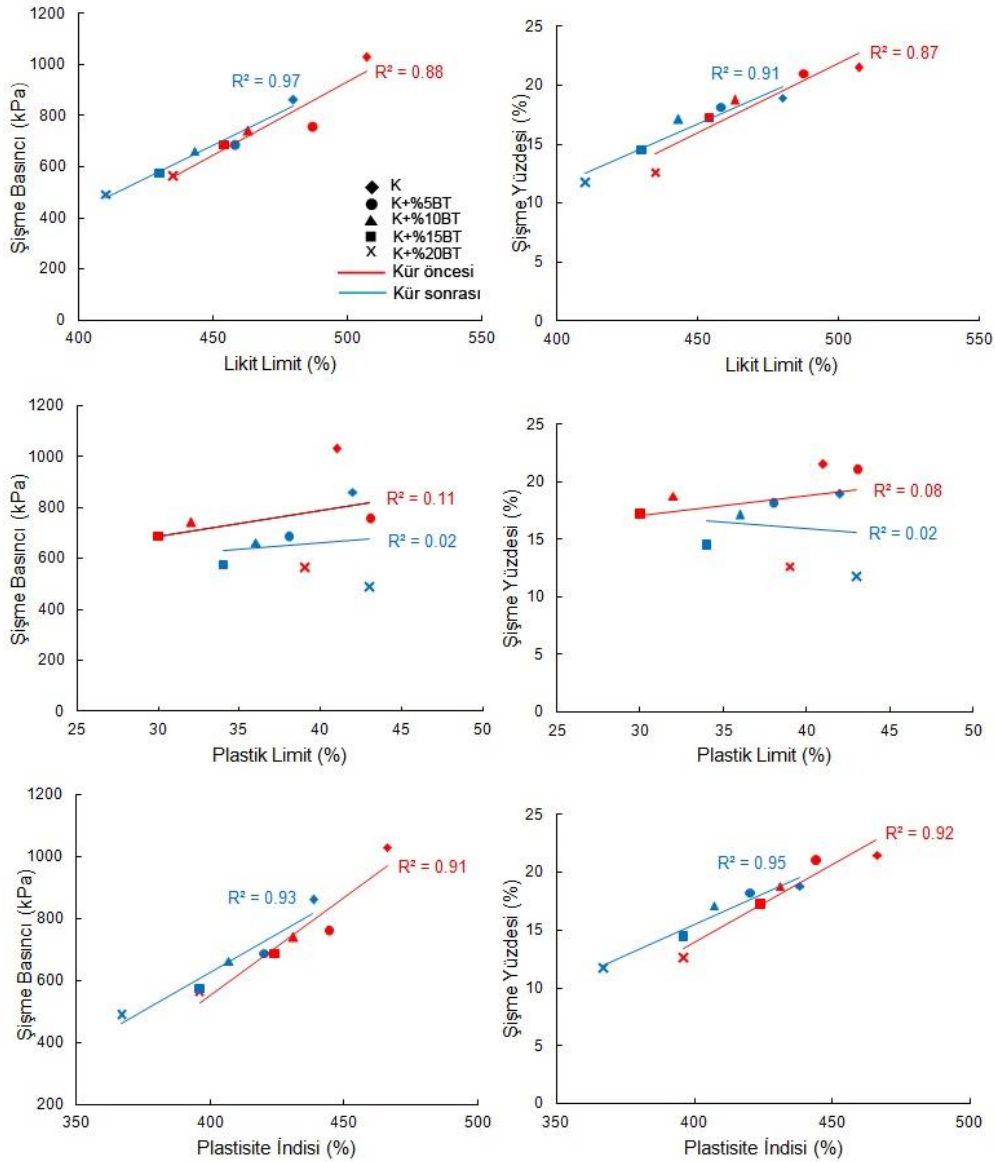
LL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif, PL ile şişme basıncı arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif, PL ile şişme yüzdesi arasında kuvvetli pozitif, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında ise çok kuvvetli pozitif korelasyonlar vardır.

Bazık tüf katkılı örnekler için verilen Şekil 2’de verilen grafiklere göre, asidik tüf katkılı örneklerde olduğu gibi hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi de azalmaktadır. Örneklerde LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif korelasyonlar bulunurken, bazık tüf katkılı örneklerde PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında anlamlı bir ilişki söz konusu değildir.

4 Sonuçlar

Asidik ve bazık tüf katkılarının yüksek plastisiteli kilin LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerine olan etkilerinin ve bu parametreler arasındaki ilişkilerin araştırıldığı bu çalışmadan ortaya çıkan sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür.

1. Katkısız kilin kür öncesi LL değeri %507, PL değeri %41 ve PI değeri ise %466 olarak belirlenmiştir. Kilin kür sonrasında belirlenen LL değeri %480, PL %42, PI ise %438’dir. Kür etkisi ile katkısız örneğin LL değeri %5.33 ve PI değeri %6.01 oranında azalmış, PL değeri ise %2.44 oranında artmıştır.
2. Asidik ve bazık tüf katkılarının eklenmesi ve artan katkı oranı ile birlikte örneklerin kür öncesi ve sonrası LL ve PI değerleri azalmıştır. Örneklerin PL değerleri ise artışlar ve azalmalar şeklindedir.



Şekil 2. Bazık tuf katkılı örneklerde LL, PL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasındaki ilişkiler

Nitekim asidik tuf katkılı örneklerde kür öncesi PL değerlerindeki en yüksek azalma oranı %10 ve 20 katkı oranına sahip örneklerde meydana gelirken, kür sonrasında ise en yüksek azalma oranı %10 katkılı örnekte belirlenmiştir. Ayrıca, kür sonrasında LL, PL ve PI değerlerindeki azalmalar kür öncesine göre daha yüksek oranlardadır.

3. Bazık tuf katkılı örneklerin hem kür öncesi hem de kür sonrası LL ve PI değerleri, asidik tuf katkılı örneklerde olduğu gibi artan katkı oranı ile birlikte azalmıştır. Meydana gelen azalma oranları asidik tuf katkılı örneklere göre daha azdır. Örneklerin kür öncesi PL değerleri de %15 katkı oranında maksimuma ulaşmış, ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte azalma göstermiştir. Kür sonrası PL değerlerine bakıldığında, kür öncesine göre daha az

bir azalma söz konusudur. Kür sonrasında %15 katkıya sahip örnekte PL değerindeki azalma maksimumdur. Ancak katkı oranının %20 olduğu örnekte PL değerinde azalma değil artış meydana gelmiştir.

4. Katkısız kilin kür öncesi şişme basıncı 1030.72 kPa, şişme yüzdesi ise %21.5 olarak belirlenmiştir. Kür uygulandıktan sonra şişme basıncı %16.46, şişme yüzdesinde ise %12.00 oranında azalma oluşmuştur.
5. Katkılı örneklerde şişme basıncı ve şişme yüzdesinin artan katkı oranı ve kür etkisiyle önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Katkılı örneklerde kür öncesi şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerindeki en fazla azalma oranı %20

katkılı örneklerde meydana gelmiştir. Kür öncesinde bazik tuf katkı örneklerin şişme basıncında meydana gelen azalma asidik tuf katkı örneklerine göre daha fazladır. Ancak şişme yüzdesinde asidik tuf katkı örneklerde daha fazla bir azalma oranı ortaya çıkmıştır. Kür sonrasında ise hem şişme basıncı, hem de şişme yüzdesi değerlerinde en fazla azalmanın olduğu örnekler asidik tuf katkı örneklerdir. Bu sonuçlar şişme basıncı ve şişme yüzdesi açısından asidik tuf katkı örneklerde kürün daha fazla etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

6. Asidik tuf katkı örneklerde hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi azalmıştır. Basit regresyon analizlerinden ortaya çıkan sonuçlara göre LL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif, PL ile şişme basıncı arasında çok kuvvetli-kuvvetli pozitif, PL ile şişme yüzdesi arasında kuvvetli pozitif, PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında ise çok kuvvetli pozitif korelasyonlar vardır.
7. Bazik tuf katkı örneklerde de asidik tuf katkı örneklerde olduğu gibi hem kür öncesi, hem de kür sonrasında artan katkı oranı ile birlikte örneklerin LL, PL ve PI değerlerinin azalmasına bağlı olarak örneklerin şişme basıncı ve şişme yüzdesi de azalmaktadır. Örneklerde LL ve PI ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında çok kuvvetli pozitif korelasyonlar belirlenmiştir. Ancak bazik tuf katkı örneklerde PL ile şişme basıncı ve şişme yüzdesi arasında anlamlı bir ilişki söz konusu değildir.
8. Tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde asidik ve bazik tuf katkısı ve kür uygulanmasına bağlı olarak oluşan topraklanma ile tane boyutundaki artış zemin tanelerini yüksek plastisiteli kilden daha düşük plastisiteli yapıya taşımakta ve buna bağlı olarak PI değerinin azalmasıyla şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerleri de azalmaktadır. Plastisite indisinin azalması zeminin suya karşı hassasiyetinin azaldığını gösteren bir parametre olarak kabul edilmektedir ve plastisite indisindeki azalmanın zeminin işlenebilirliğini artıracığı düşünülmektedir.
9. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, kür uygulamasının killerin stabilizasyonunda çok önemli bir yere sahip olduğunu göstermesi açısından önem taşımaktadır.
10. Elde edilen sonuçlar, kolay elde edilebilir, ekonomik ve çevreci bir malzeme olan tüflerin stabilizasyonda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini ortaya koyması bakımından oldukça önemlidir.
11. Katkılı stabilizasyon yöntemi, yarma ve dolgularda, su tutma yapılarında, hafif yapıların temellerinde, yol kaplaması altında ve üstyapı tabanında

uygulanabilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları asidik ve bazik karakterli tüflerin iyileştirme çalışmalarında hangi oranda ve ne kadar süre ile kürelemeye tabi tutularak kullanılması durumunda başarılı bir iyileştirmenin gerçekleştirilebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

12. Ayrıca, tüflerin katkı malzemesi olarak kullanımının, ülke ekonomisi ve çevre duyarlılığı açısından önem taşıdığı ortaya konmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

Kaynaklar

- [1] P.J. Thomas, Quantifying properties and variability of expansive soils in selected map units. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [2] A.E. Dif and W.F. Bluemel, Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, 14(1), 96-102, 1991.
- [3] J.H. Hardcastle, Evaluation and treatment of expansive volcanic soils. US95, Owyhee County, Idaho. Final Report, 2003.
- [4] D. Mohan, G.S. Jain and D. Sharma, Foundation practice in expansive soils in India. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Israel, 125-132, 1973.
- [5] M.E. Popescu, Engineering problems associated with expansive clays from Romania. *Engineering Geology*, 14(1), 43-53, 1979. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90062-0).
- [6] F.H. Chen, *Foundation expansive soils*. 2nd ed. New York, Elsevier Scientific Pub. Co., 280p., 1988.
- [7] J. Locat, M.A. Berube ve M. Choquette, Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(3), 294-304, 1990. <https://doi.org/10.1139/t90-040>.
- [8] S.C. Chu ve H.S. Kao, Study of engineering properties of a clay modified by fly ash and slag, *American Society of Civil Engineers*, 36, 89-99, 1993.
- [9] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils. *Elsevier Science*, 42(4), 223-237, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).
- [10] D.I. Boardman, S. Glendinning ve C.F.D. Rogers, Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6), 533-543, 2001. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.6.533>.
- [11] E. Kalkan, and S. Akbulut, The positive effects of silica fume on the permeability, swelling preure and compresive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, 73(1/2), 145-156, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001>.
- [12] H.S. Aksoy, M. Yılmaz ve E.E. Akarsu, Stabilization of a clayey soil with Tunçbilek fly ash. *Fırat Üniversitesi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 88-92, 2008.

- [13] O. Cuisinier, J-C. Auriol, T. Le Borgne and D. Deneele, Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology*, 123(3), 187-193, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.07.010>.
- [14] K. Harichane, M. Ghrici, S. Kenai and K. Grine, Use of natural pozzolana and lime for stabilization of cohesive soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(5), 759-769, 2011. DOI 10.1007/s10706-011-9415-z.
- [15] K.M.A. Hossain and L. Mol, Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3495-3501, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.042>.
- [16] B. Lin, A.B. Cerato, S.M. Andrew and M.E.E. Madden, Effect of fly ash on the behavior of expansive soils: microscopic analysis. *Environmental and Engineering Geoscience*, 19(1), 85-94, 2013. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.19.1.85>.
- [17] P. Voottipruex and P. Jamsawang, Characteristics of expansive soils improved with cement and fly ash in Northern Thailand. *Geomechanics and Engineering*, 6(5), 437-453, 2014. <https://doi.org/10.12989/gae.2014.6.5.437>.
- [18] M.R. Asgari, A.B. Dezfule ve M. Bayat, Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1439-1452, 2015. DOI 10.1007/s12517-013-1173-1.
- [19] A.R. Goodarzi, S. Goodarzi ve H.R. Akbari, Assessing geo-mechanical and micro-structural performance of modified expansive clayey soil by silica fume as industrial waste. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Civil Engineering*, 39, 333-350, 2015.
- [20] H. Bahadori, A. Hasheminezhad ve F. Taghizadeh, Experimental study on marl soil stabilization using natural pozzolans. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 1-10, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002577).
- [21] Y. Aslan Topçuoğlu and Z. Gürocak, Changes in the strength of high-plasticity clays after stabilization: an experimental study, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022a.
- [22] S.W. Lee and U. Dutto, Improved resilient modulus realized with waste products, grouting. *Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE Publishing, 1987.
- [23] R.C. Joshi, and T.S. Nagaraj, Fly ash utilization for soil stabilization, Balkema Rotterdam. *Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, 77-93, 1987.
- [24] A.M. Al-Swaidani, I. Hammoud ve A. Meziab, Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(5), 714-725, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.04.002>.
- [25] S. Keskin, ve Ö. Çimen, Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde pomza kullanımının araştırılması, I. Isparta Pomza Sempozyumu, Isparta, Türkiye, 1997.
- [26] Ö. Çimen, B. Dereli, F. Yıldırım, Ö.F. Şevkatlioğlu ve A. Eralp, Manisa kula yöresi volkanik tüfünün yüksek plastisiteli kilin mühendislik özelliklerine etkisi. 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2013.
- [27] R. Kılıç, Ö. Küçükali ve K. Ulaş, Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(2), 35-744, 2015. DOI:10.1007/s10064-015-0757-2.
- [28] A. Cheshomi, A. Eshaghi ve J. Haanpour, Effect of lime and fly ash on swelling percentage and atterberg limits of sulfate-bearing clay. *Applied Clay Science*, 135, 190-198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.09.019> Get rights and content.
- [29] Ö. Çimen ve F.Ş. Coşan, Volkanik tüf ve amorf silikanın kilin mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(3), 459-466, 2019.
- [30] T.W. Tao and Y. Lee, Consolidation behaviour of a soft mud treated with small cement content. *Engineering Geology*, 59, 327-335, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00021-7).
- [31] A.K. Mishra, M. Ohtsubo, L.Y. Li and T. Higashi, Influence of the bentonite on the consolidation behaviour of soil-bentonite mixtures. *Carbonates and Evaporites*, 25(1), 43-49, 2010. DOI 10.1007/s13146-010-0006-5.
- [32] D. Wang, N.E. Abriak, R. Zentar and W. Chen, Effect of lime treatment on geotechnical properties of dunkirk sediments in France. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 485-503, 2013. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.755935>.
- [33] İ. Zorluer and S. Gücek, Şişen killerin mermer tozu katkı maddesiyle stabilizasyonu. *International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, 2019.
- [34] Ö. Çimen, B. Dereli ve E. Keleş. Üç farklı bölgeye ait pomzanın yüksek plastisiteli kile etkisinin karşılaştırılması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 427-433, 2020.
- [35] B.S. Avcı, Soda ve MgO ile aktiflendirilmiş ara tip bentonitlerin sondaj ve döküm bentoniti karakteristiklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [36] A. Akbulut, Bentonit. MTA Eğitim Serisi-32, Ankara, 1996.
- [37] Y. Aslan Topçuoğlu, Farklı katkı maddelerinin zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.

- [38] İ.H. Güven, Doğu pontidler'in jeolojisi ve 1/250 000 ölçekli kompliasyonu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 1993.
- [39] G. Gülibrahimoğlu, Trabzon Maçka güneyi maden jeolojisi raporu no: 1850. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara, 1985.
- [40] B. Yalçınalp, Güzelyayla (Maçka-Trabzon) porfiri Cu-Mo cevherleşmesinin jeolojik yerleşimi ve jeokimyası. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1992.
- [41] A. Korkmaz, Tonya-Düzköy (GB Trabzon) yöresinin stratigrafisi. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni, 36, 151-158, 1993.
- [42] S. Kürüm ve Ö. Tanyıldızı, Geochemical and sr-nd isotopic characteristics of upper cretaceous (calc-alkaline) and miocene (alkaline) volcanic rocks: Elazığ, Eastern Taurides, Turkey. Journal of African Earth Sciences, 134, 332-344, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.06.020>.
- [43] Y. Aslan Topçuoğlu ve Z. Gürocak, Asidik ve bazik karakterli tüflerin puzolanik özelliklerinin araştırılması: Elazığ ve Gümüşhane yörelerinden örnek bir çalışma, 12(4), 1024-1035, 2022b.
- [44] TS 25, Doğal puzolan (tras)-çimento ve betonda kullanılan tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [45] TS EN 450-1, Uçucu kül-betonda kullanılan-bölüm 1:tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [46] ASTM C-618, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [47] ASTM D 698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [48] ASTM D 4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [49] A. Sridharan, A.S. Rao and P.V. Sivapullaiah, Swelling pressure of clays. Geotechnical Testing Journal, 9(1), 24-33, 1986. DOI: 10.1520/GTJ10608J.
- [50] F. Shuai, Simulation of swelling preure measurements on expansive soils. Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, 1996.
- [51] A. Sridharan and D. Choudhury, Swelling pressure of sodium montmorillonites. Geotechnique, 52(6), 459-462, 2002. <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.6.459>.
- [52] F. Shuai and D.G. Fredlund, Model for the simulation of swelling-preure measurements on expansive soils. Canadian Geotechnical Journal, 35(1), 96-114, 1998. <https://doi.org/10.1139/t97-071>.
- [53] A.W. Skempton, Horizontal strees in an over-consolidated eocene clay. The 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1961.
- [54] E.L. Matyas, Some properties of two expansive clays from western Canada. 2nd International Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, 263-278, 1969.
- [55] M. Feng, A study of swelling preure using various laboratory testing methods, Research Report. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 1995.
- [56] D.G. Fredlund, J.U. Hasan ve H. Filson, The prediction of total heave. 4th International Conference on Expansive Soils, Denver, 1980.
- [57] A.A. Porter and J.D. Nelson, Strain controlled testing of expansive soils. In Expansive Soils, 34-44, 1980.
- [58] ASTM D 4546, Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of cohesive soils. Annual book of ASTM standards, West Conshohocken, PA, 2008.
- [59] S.N. Keskin, H. Yıldırım ve M.A. Ansal, Killi zeminlerde yanal şişme davranışları, zemin mekaniği ve temel mühendisliği. 4. Ulusal Kongresi, İstanbul, Türkiye, 1992.
- [60] W.G. Holtz and H.J. Gibbs, Engineering properties of expansive clays: Transactions. ASCE 121, 641-677, 1956. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007325>.
- [61] H.B. Seed, C.K. Chan and C.E. Lee, Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures in asphalt pavements. International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Supplement University of Michigan, 1962.
- [62] D.R. Tan Sneathen, Evaluation of expedient methods for identification and claification of potentially expansive soils. In XV International Conference on Expansive Soils, Australia, 1984.
- [63] D.N. Little, T. Scullion, P.B.V.S. Kota and J. Bhuiyan, Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades. Texas A and M University, Austin, Texas, 1995.
- [64] J. Mallela, P. Harold Von Quintus, K.L. Smith and E. Consultants, Consideration of limestabilized layers in mechanistic-empirical pavement design. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA, 2004.
- [65] B.R.P. Kumar and R.S. Sharma, Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, 130(7), 764-767, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(764\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(764))
- [66] S. Aydın, Yenikent (Ankara) yerleşim alanı killilerinin kireç ve uçucu küllü geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.





D vitamini ve tespitine yönelik geliştirilen elektrokimyasal biyosensörler

Vitamin D and enhanced efficient electrochemical biosensors

Mervenur Kirazoğlu¹ , Birgül Benli^{2,*} 

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Nanobilim ve Nanomühendislik Programı, 34469, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Madencilik Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Son yıllarda giderek artan taleple birlikte vitaminlere olan ilgi hızla büyümektedir. Pandemi dönemiyle beraber dikkatleri üzerine çeken vitamin grubu ise D vitamindir. D vitamini eksikliği ve yetersizliği; kanserler, kardiyovasküler hastalıklar, metabolik sendrom, enfeksiyöz ve otoimmün hastalıkların dahil olduğu pek çok kronik hastalıkla ilişkilendirilmektedir. Bu yüzden gerek maruz kalınan ve gerekse yiyeceklerdeki, ilaçlardaki ve biyolojik sıvılardaki vitaminlerin ve miktarlarının takibine duyulan ihtiyaç düzenli ölçmeyi kritik hale getirir. Vitaminlerin stabilitesinin sağlanması, kararlılığının artırılması ve korunmasında kullanılan organik ve inorganik (nanokiller, seramikler, biyoaktif camlar ve metal oksit nanopartiküller gibi) taşıyıcıların önemi büyüktür. Bu çalışmada, D vitamini ve öneminden başlayarak, D vitamini tayininde kullanılan yöntemlere değinerek, özellikle elektrokimyasal yöntemler incelenecek, stabilite sağlayıcı inorganik nanotaşıyıcılara nanokiller özelinde değinerek, yakın gelecekteki (biyo)algılama platformları olarak umut verici olasılıklar hakkında kapsamlı incelemelerde bulunulacaktır.

Anahtar kelimeler: D vitamini, Elektrokimyasal sensörler, Giyilebilir biyosensörler, Nutrikozmetikler, Nanokil taşıyıcılar

1 Giriş

Nutrikozmetikler, cilt, tırnak ve saçın doğal güzelliğini koruyan, besin takviyesi görevi gören ürünler ve bileşenlerdir. İçerideki güzelliği teşvik etmek için içeriden çalışırlar. Son kullanıcı uygulamaları dikkate alındığında küresel nutrikozmetik pazarının kolajen, peptitler, proteinler, karotenlerden, minerallere ve omega-3 yağ asidi ile birlikte vitaminleri de kapsamaktadır [1]. Vitaminler metabolizma için önemli fonksiyonlara sahiptirler. Pek çok vitamin metabolizmada görev yapan enzimlerin ve proteinlerin yapısına girerek biyolojik olayların düzenlenmesini sağlar [2]. Vitaminler çeşitli biyokimyasal işlevler için gerekli olup organizma tarafından ya yetersiz sentezlenirler ya da hiç sentezlenmezler, bu sebeple diyetle dışarıdan alınırlar. Genel olarak yeşil bitkiler bu besin maddelerinin ana kaynağıdır. Ancak diğer vitaminlerden farklı olarak D vitamini sadece vücuda yenen yiyecekler ve takviyeler yoluyla değil, deri üzerinden güneşin UV ışınlarını tetiklemesi ile de üretilir.

Abstract

With the increasing demand in recent years, the interest in vitamins has been growing rapidly. The vitamin group that attracts attention with the pandemic period is vitamin D. Vitamin D deficiency and insufficiency; It is associated with many chronic diseases including cancers, cardiovascular diseases, metabolic syndrome, infectious and autoimmune diseases. Therefore, the need to monitor exposure and the amount and amount of vitamins in foods, drugs, and biological fluids makes regular measurement critical. The importance of organic and inorganic (such as nanoclays, ceramics, bioactive glasses and metal oxide nanoparticles) carriers used in ensuring, increasing and protecting the stability of vitamins is of great importance. In this study, starting from vitamin D and its importance, by referring to the methods used in the determination of vitamin D, electrochemical methods will be examined in particular, by referring to the stabilizing inorganic nanocarriers in particular nanoclays, comprehensive reviews will be made about promising possibilities as (bio)detection platforms in the near future.

Keywords: Vitamin D, Electrochemical sensors, Wearable biosensors, Nutricosmetics, Nanoclay carriers

Vitaminler arasında daha az çalışması bulunan grubu olan D vitaminlerine duyulan ihtiyacın giderilmesinde yani insan vücudundaki hayati sistemlerin düzgün çalışmasında uygun miktarda alınmaları önemlidir. Zira hem vitamin eksikliği hem de fazlalığı çeşitli hastalıklara zemin hazırlayabilir. Diğer yandan sensör bileşenleri arasında algılayıcı modifikasyonlarında son derece etkili elektrokimyasal sensörlerin nanokil modifiye elektrotların kullanıldığını, geliştirilen elektrokimyasal sensörlerin mükemmel hassasiyet, seçicilik ve stabiliteye sahip olduğunu görmekteyiz [3]. Bu nedenle çalışmamızda D vitamini ve tespitine yönelik önerilen yollarla, D vitamini taşıyıcıları tanıtılacak, özellikle kil bazlı algılayıcılar üzerinde durularak D vitamini tesbitine yönelik biyosensör çalışmaları derlenerek, gelecekteki giyilebilir biyosensörlere öneriler geliştirilecektir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: benli@itu.edu.tr (B. Benli)

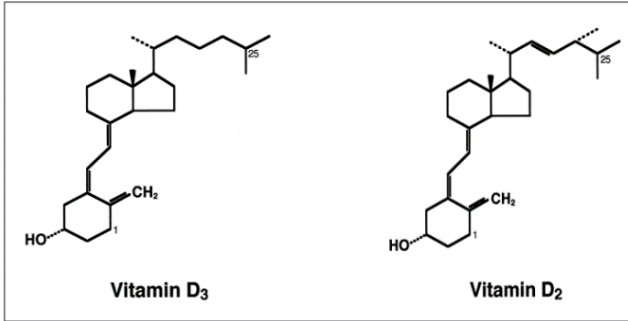
Geliş / Received: 27.09.2022 Kabul / Accepted: 27.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1181007

2 D vitamini nedir?

D vitamini, 750 milyon yıldan fazla üretilen en eski hormonlardan biridir. Doğumdan ölüme kadar sağlıklı bir iskeletin gelişimi, büyümesi ve bakımı için kritik öneme sahiptir. Ana işlevi ise kalsiyum dengesini korumaktır. D vitamini sayesinde, bağırsaktaki kalsiyum emilimi artar [4].

Şekil 1’de gösterildiği gibi D vitamini iki farklı formda bulunur [5]. D₂ vitamini, maya sterol ergosterol’ün ultraviyole ışınması ile elde edilen, doğal olarak güneşe maruz kalan mantarlarda bulunan şeklidir. D₃ vitamini ise önemli bir kısmı (%80-90) güneş ışığına ultraviyole B (UVB) radyasyona doğrudan maruz kalan ciltte sentezlenen, bu yüzden en "doğal" form olarak adlandırılan formudur [6]. D₃ vitamini ayrıca bazı hayvansal gıdalarda da bulunur ve D₂ vitaminine göre vücutta ve kemiklerde 2-3 kat daha fazla depolanır. Bu yüzden oldukça etkilidir [7].



Şekil 1. D vitamini formlarının kimyasal yapılarına göre karşılaştırılması [5].

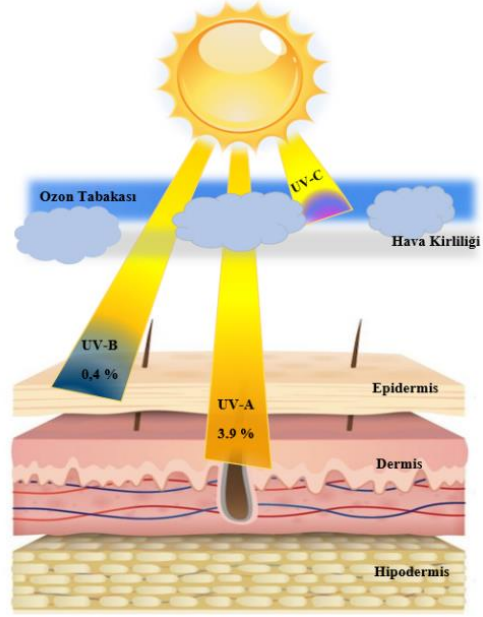
2.1 D vitamini ve UV radyasyonu

UVA (Ultraviyole A), ışını cildin kalın tabakası olan alt deriye (dermise ve hipodermise) uzun dalgalar halinde ulaşarak nüfuz ederken UVB (Ultraviyole B) ışınları daha kısa dalgalar halindedir. İki ışın türü de cildin erken yaşlanmasının, güneş lekelerinin ve cilt kanserlerine neden olmaktadır [8]. Buna karşın, vücut bir seferde sadece sınırlı miktarda D vitamini emebilir. Şekil 2’de cilt üzerinden olan emilimin mekanizması gösterilmektedir. Yeterince ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında, örneğin güneş altında fazladan zaman harcaması, kişinin D vitamini düzeylerini artırmaz. UV etkisiyle erken yaşlanma ve daha büyük bir tehdit olan cilt kanseri riskini artırır. Bir kişinin UV ihtiyacı, yılın zamanına, bulunduğu konumun coğrafi özelliklerine, cilt tipine ve mevcut D vitamini seviyelerine bağlıdır [9]. Özellikle güneşin daha az görüldüğü ülkelerde D vitamini eksikliği yıl boyu devam etmektedir. İkinci dünya savaşı yıllarından beri tedavi amaçlı olarak kullanılan UV lambalar bu ihtiyacın sonucu olarak ortaya çıkan tedavi yöntemidir. Günümüzde yeni doğan çocukların sarılık tedavisinde halen kullanılmaktadır [10].

2.2 D vitamini eksikliği

Dünyada D vitamini eksikliği dramatik bir şekilde artmaktadır. Bağışıklık sisteminin düzenli çalışmasında kritik öneme sahip olan D vitamini eksikliği, D vitamininin aktif formu (1 α 25 (OH)₂D) (1.25 dihidroksivitamin D) ile

belirlenir. Eksikliğinde ise hem otoimmün hastalıklar hem de kardiyovasküler hastalıklar görülebilir [11].



Şekil 2. UV-A ve UV-B ışınlarının cilt ve deri üzerindeki etkinliği.

Örnek olarak, D vitamininin kalsiyum homeostazındaki rolünün bir sonucu olarak görülen kemik bozukluğu raşitizmle ilişkilidir. Yapılan araştırmalara göre, vücuttaki D vitamini eksikliğinin ideal düzeyinin tanımlayan, minimum seviye tanımları neredeyse her yıl değişmektedir. Minimum düzeylerin geçen birkaç yıldan çok daha yüksek olduğunu gösteren araştırmalara göre [7], D vitamini eksikliği sıklıkla, proksimal uzuv kaslarının baskın olarak kas güçsüzlüğü, bacaklarda ağırlık hissi, kronik kas-iskelet sistemi ağrısı, yorgunluk veya kolay yorulma gibi yaygın, spesifik olmayan semptomlarla kendini gösterir. Eksiklik endemiktir ve çok sayıda ciddi hastalıkla ilişkilidir [12].

Türkiye’de Batı Karadeniz bölgesindeki çocukların D vitamini düzeyleri ile ilgili yapılan bir çalışmada, çocukların büyük çoğunluğunda vitamin D vitamini düzeylerinin düşük olduğu ortaya çıkmıştır [13]. 381 kız (%53.7), 328’i erkek (%46.3) toplam 709 çocuğun dahil edildiği bu çalışmada, ortalama serum 25(OH) D vitamini düzeyleri 18.8 ng/mL yaş gruplarına (1-4 yaş, 5-9 yaş, 10-14 yaş, 15-18 yaş) ve mevsimlere göre farklılıklar gösterirken, yerleşim yerine göre farklılık saptanmamış olması dikkat çekicidir. Erkeklerde ortalama serum 25(OH) D vitamini düzeyi 20.2 ng/mL ile ortalamanın üzerinde olduğu, buna karşın kızlarda 17.3 ng/mL ile ortalamanın altında kaldığı, kızlarla erkekler arasında anlamlı farkın olduğu tespit edilmiştir [13].

2.3 D vitamininin COVID-19’a etkisi

D vitamini grip ve solunum yolu enfeksiyonu riskleriyle de ilişkilidir. Zarflı virüslere karşı doğrudan antiviral etkilere sahiptir. Günümüzün pandemisi koronavirüs, zarflı bir virüstür. Bu yüzden D vitamini, COVID-19 ile enfeksiyona karşı bağışıklık ve oksidatif yanıtı düzenleyebilir [14].

Dünyanın çeşitli yerlerinde gerçekleştirilen korelasyonel ve kesitsel gözlemsel çalışmalar, D vitamini eksikliği olan bölgelerin COVID-19 hastalarının daha yüksek prevalansına sahip olduğunu göstermiştir. Tanımlayıcı ve gözlemsel çalışmalar, daha yüksek mortalite ve kritik vakaların görüldüğünü bildirmiştir. COVID-19, D vitamini eksikliği olan hastalarda daha yaygın olduğu ortaya çıkmıştır [15].

D vitamininin COVID-19 enfeksiyonu, hastaneye yatış ve ölüm oranlarına etkisi, son zamanlarda sadece bilimsel platformlarda değil, medyada da çok tartışılmıştır. Bilinen COVID-19 bağışıklık yolları, D vitamini fizyolojisi ve bağışıklık sistemi üzerine etkileri, D vitamini düzeylerini solunum yolu enfeksiyonlarına bağlayan popülasyon temelli çalışmalar dahil olmak üzere çok sayıda veri oluşturuldu. COVID-19 iletimi ve komplikasyonlarında D vitamini eksikliğini önemi gösterdi [13- 15].

3 D vitamini analiz yöntemleri

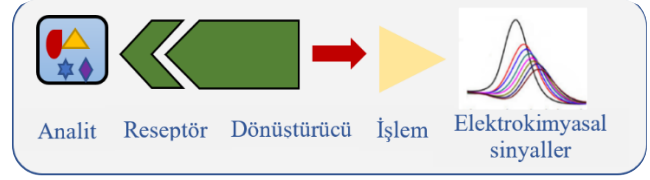
D vitamini miktar tayininde rutin olarak çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Rekabetçi protein bağlama (CPB) testleri, radyoimmünoassayler (RIA), kemilüminesans immünolojik testler (CLIA), UV saptamalı sıvı kromatografisi (LC) ve sıvı kromatografi-kütle spektrometrisi (LC-MS) veya tandem kütle spektrometrisi (MS/MS) kullanılan popüler yöntemlerdir. Klinik uygulamada, CPB, RIA ve CLIA en yaygın olarak uygulanan testler olmaya devam etmektedir. Kit şeklinde olup, saatte yüzlerce örneğin ölçülmesine izin verecek otomatik sistemlerde kolayca ve yüksek verimle analiz imkânı sağlamaktadır [16].

Farmasötik ürünlerden, gıdalara veya biyolojik numunelerden vitamin tespit test etmek için kullanılan HPLC, floresan algılamaları, mikrobiyolojik teknikler ve kapiler bölge elektroforezi (CZE) gibi standart analitik yöntemler zaman alıcı ve pahalı olduğu kadar, karmaşık prosedürlere gerek duyarak, çok miktarda numune gerektirir. Buna karşın, vitaminlerin hızlı ve hassas tespiti için elektrokimyasal yöntemlerin kullanıldığını görmekteyiz. D vitamininin tayini için kullanılan analitik yöntemlerle karşılaştırıldığında, az miktarda numune gerektirmesi ve prensibin basit olması nedeniyle, sensörler ve özellikle elektrokimyasal sensörler hızlı, güvenilir ve ucuz bir alternatif oluşturmaktadır [17].

3.1 Vücuttaki D vitamini tespiti için geliştirilen elektrokimyasal sensörler

Biyosensörler, molekülleri araştırmak veya tespit etmek için biyolojik tanıma sistemi kullanan küçük cihazlardır. İnsan vücudundaki en ufak fizyolojik değişikliği bile yüksek hassasiyetle tespit edebilme, insan doğasını ve çevresini etkileyen süreçleri doğru bir şekilde izleyebilme yeteneği sayesinde yaşam kalitesinde büyük bir iyileşme sağlarlar. Biyosensörler, biyomedikal teşhis, tedavi ve hastalık ilerlemesinin izlenmesi, ilaç keşfi, gıda kontrolü, çevresel izleme, vitamin eksikliği dahil olmak üzere sayısız alanda kritik bir rol oynarlar [18]. Bilindiği gibi hemen hemen tüm vitaminler elektrokimyasal olarak aktiftir. Elektrokimyasal sensörler, bir analit varlığında dönüştürücü eleman olarak bir elektrotun kullanıldığı bir kimyasal sensör sınıfıdır [19] Bu tür sensörler, algılama yüzeyi ile analitler arasındaki etkileşimden kaynaklanan elektrotları kullanarak

elektrokimyasal reaksiyonları ve ölçümleri algılar ve bu yanıt veren bilgiyi, aynı zamanda amperometri, potansiyometri ve kondüktometri ölçümlerine dayanan kalitatif ve kantitatif elektrik sinyallerine dönüştürürler [20-21].



Şekil 3. Elektrokimyasal sensörün ana bileşenleri.

Elektrokimyasal sensörlerin çalışma prensibi, bir elektrolitteki vitaminlerin elektrokimyasal oksidasyonu veya indirgeme reaksiyonuna dayanarak, çalışma elektrotundaki akımın ölçerek vitaminlerin konsantrasyonunun saptanmasına dayanır [22].

COVID-19 de dahil olmak üzere çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarıyla ilişkilendirilen D vitamini yetersizliğinin tespitinde, organik çözücülerle elektron transfer reaksiyonuna girebilen elektrokimyasal sensörlerin kullanıldığını görmekteyiz. D vitamini algılamasında, çok sayıda altın, metal, grafen gibi nanomalzemeler ile çalışılmış, elektrokimyasal sensörler oldukça ilgi görmüştür [19- 22].

Vitamin tespiti için son zamanlarda kullanılan biyosensör çalışmalarına baktığımızda Parvin ve ekibi tarafından altın elektrotlar üzerinde yerinde elektropolimerizasyon yoluyla polianilin/gama alüminyum oksit (PAn/ γ -Al₂O₃) nanokompozitleri sentezlenerek E vitamini (VE) tespiti yapmışlardır. Çalışmaya göre, biyosensör mükemmel performans sergilemiş, algılama sınırının (LOD) 0.06 μ M civarında olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar, önerilen modifiye elektrotun VE için iyi bir sensör olarak işlev gördüğünü göstermiştir. [23].

Sha ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise ticari meyve suyunun gerçek numunelerindeki C vitamini konsantrasyonu elde etmek için enzimatik olmayan bir amperometrik C vitamini biyosensörünün yapımı için ilk kez Okara'nın biyokütle atıklarından düşük maliyetli nitrojen katkılı grafen benzeri mezogözenekli nano tabakalar (N-GMN'ler) sentezlemişlerdir. N-GMN'lerin nano yapıları karbonunun sentezi için hammadde olarak Okara'nın kullanılması, C vitamini tespitinde enzimatik olmayan elektrokimyasal biyosensör geliştirmesi ve düşük maliyetli bir elektrot malzemesi üretmek için yeşil bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır [24].

Bireysel beslenme ihtiyaçlarını karşılamak ve bağışıklık sistemi sağlığını geliştirmek için diyet müdahalelerine rehberlik etmeye yönelik kişiselleştirilmiş beslenmeyi geliştirmeyi amaçlayan Ruiz ve ekibinin çalışmasında, tükürükten C ve D vitaminlerinin eşzamanlı olarak izlenmesini sağlayan kompakt bir biyoelektronik çift sensör çipi tasarlamışlardır. Yeni biyoelektronik çip, 25 dakika içinde 10 μ L'lik bir tükürük örneğinde her iki vitaminin seçici olarak tespitini gerçekleştirmek için komşu elektrotlar

üzerinde rekabetçi D vitamini immün testi ile yeni bir C vitamini amperometrik testini birleştirmişlerdir [25].

3.1.1 D₃ vitamini tayini için kullanılan elektrokimyasal sensörler

Genel olarak D₃ vitamini tayini için kullanılan elektrokimyasal sensörler incelendiğinde, son yıllarda yapılan yenilikçi elektrot çalışmalarının ağırlıklı olarak modifiye edilmiş organik polimerlerle ve hibrid iyonik hidrojel kompozitlerinden hazırlandığını görmekteyiz [25-27]. Kompozitlere eklenen CNT'ler, nanokiller ve metal oksitler gibi inorganik katkı maddeleri sayesinde D₃ vitamini tespitinde hızlı ve kararlı ölçümler alınabilmektedir.

3.1.1.1 Modifiye edilmiş organik polimerlerle yapılan sensörler

Seçici moleküler baskılı polimer olan fenilendiamin–resorsinol karışımı sayesinde, ekran baskılı karbon elektrot (SPCE) yüzeyinde D₃ vitamini moleküllerinin varlığında elektropolimerizasyonu ile sentezlenmiş, ardından elektrot yüzeyinde ferrisiyanürün indirgenmesini bastıran bir film birikimi yapılmıştır. Bu sensör, 1×10^{-12} M alt algılama limiti ve 1×10^{11} - 2×10^9 M doğrusal yanıt aralığı göstermiştir. [26]. Aynı ekibin bir diğer D₃ vitamini çalışmasında, hibrit baskılı polimere dayalı olarak son derece hassas bir elektrokimyasal sensör üretilmiştir. D₃ vitamini emici moleküler baskılı polimer (MIP), ortama katılan çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) mevcudiyetinde sentezlenmiş ve daha sonra bağlayıcı grafit tozu ve n-eikosan ile karıştırılarak karbon pasta elektrotlarla doğrusal yanıt aralığı aralığı 5×10^{-8} - 7×10^{-6} M ve alt algılama limiti 3×10^{-8} M ile gerçek örnekler için oldukça verimlidir [27]. Bir diğer çalışmada ise Chauhan ve ekibi, D₃ vitamin tespitinde gadolinium oksit nanoçubuk (Gd₂O₃NR) ile modifiye edilmiş bir elektrokimyasal biyosensör tasarlamıştır. Tasarlanan hidrofilikliğe sahip Gd₂O₃NR'ler (Asp-Gd₂O₃NR) aspartik asit ile işlevselleştirilip, ITO yüzeyine kaplanmış cam substrat üzerine biriktirildi. Daha sonra Ab-VD₃ ve BSA, Asp-Gd₂O₃NR'lerin yüzeyine immobilize edildi. BSA/Ab-VD₃/Asp-Gd₂O₃NRs/ITO immünoelektrotunun pH 7' de PBS (fosfat tamponlu tuz çözeltisi) içindeki D₃ vitamininin elektrokimyasal tepkisi DPV analizi ile araştırıldı. Doğrusal aralık 10–100 ng mL⁻¹ ve LOD değeri ise 0.1 ng mL⁻¹ saptandı. Geliştirilen biyosensör, özellikle ticari D₃ oral solüsyona tatmin edici bir sonuç gösterdi [28].

3.1.1.2 İyonik hidrojel bazlı polimerlerle yapılan sensörler

Suda şişebilen üç boyutlu yapılar olarak bilinen hidrojellerin, matris yapısına kattıkları üstün özellikleri, kimyasal etkileşimler sonucu güçlü kovalent bağlarla, çapraz bağlı jeller veya hidrojen bağları ile oluşturulan jeller veya fiziksel kuvvetler sayesinde van der Waals kuvvetleri, hidrofobik ve iyonik etkileşimler gibi zayıf kuvvetlerle bir arada tutulmasıyla oluşturulur [29-30]. Mükemmel biyoyoumluluğa sahip bu akıllı malzemelerin biyosistemlerle aşamalı olarak arayüzler oluşturduğu kabul edilir. Biyolojik bileşenlerle arayüzlerdeki moleküler düzeydeki etkileşimlerle biyoalgılama uygulamalarında popüler hale gelmiştir. Düzenleyicinin viskoelastik özellikleri, dış uyarılara karşı reaktifliği, biyoreseptörleri

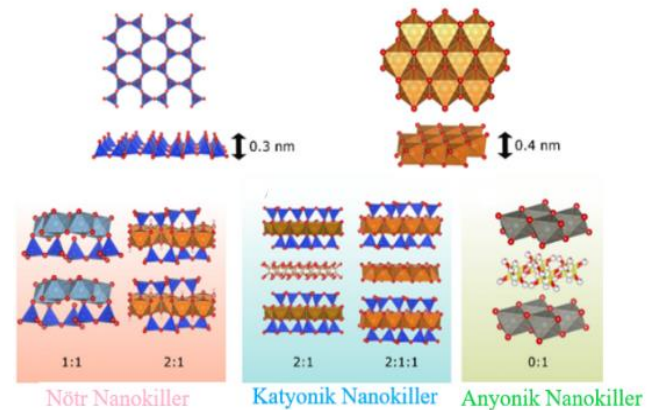
yüksek oranda ıslak yapılarına dahil edebilmesi gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedirler [29-31].

Hidrojel bazlı biyosensörlerle biyolojik olayların tesbiti genel olarak pH ve sıcaklık olarak iki şekilde yapılmaktadır. Birinci grup, biyoreseptör içermeyen hidrojel olup, seçilen biyolojik etkileşimlere yanıt olarak şişme özellikleri değişen hidrojelini içerir [32]. Sıcaklık, elektrik alanı ve pH gibi çevresel duyarlılığa sahip iyonik hidrojel bu grupta yaygın olarak kullanılmaktadır [33].

pH'a duyarlı hidrojel, çevreleyen sulu biyosistemdeki uygun iyonik güç değişikliklerine tepki olarak protonları kabul eder ya da serbest bırakır. İyonik hidrojel ne kadar iyonize olursa, polimerik zincirler arasında o kadar fazla elektrostatik itme oluşacaktır. Buna bağlı olarak, negatif veya pozitif şişme görülür [34]. Benzer davranım, polielektrolit jeller için de gözlemlenmiştir. Polielektrolit jellerde, şişme ve şişmeyi giderme süreçlerinden sorumlu olan bir elektrik alanına yanıt olarak şişme davranımı gelişmektedir. Elektrik alan şiddeti ne kadar yüksek olursa, şişme derecesini etkileyen sabit yükler o kadar fazla olacaktır [35]. pH duyarlı polielektrolit kompozitlerde nanokiller gibi inorganik katkıların ilavesini görmekteyiz. İkinci grupta ise, termo-duyarlı hidrojel bulunmaktadır. Uyarıcıya duyarlı hidrojel ailesinin bir parçası olan sıcaklığa duyarlı hidrojel, sıcaklığa bağlı bir şişme derecesi sergileyen su dolu polimer ağlarından (yani jeller) oluşur. Sıcaklığa duyarlı hidrojel, jel malzemesinin artan sıcaklıkla şiştiği anlamına gelen pozitif bir sıcaklık tepkisi veya jel malzemesinin artan sıcaklıkla küçüldüğü anlamına gelen negatif bir sıcaklık tepkisi gösterebilir [36-37].

3.1.1.3 İnorganiklerle modifiye edilmiş kompozit sensörler

Nanokompozit hidrojellerin üretiminde, organik bazlı nanomalzemelerin dışında nanokatki olarak inorganik nanomalzemelerin (nanokiller, seramikler, biyoaktif cam, metalik NP'ler) aktif olarak kullanıldığını görmekteyiz [38]. Söz konusu inorganik nanoyapıların arasında gerek katkı maddesi (filler) ve gerekse destek malzemesi olarak kullanılan nanokiller, kendiliğinden nanoboyuta inebildiğinden, diğer metal oksitler nanopartiküllere göre son yıllarda dikkat çeken doğal ve sentetik nanoyapılardır. Şekil 4' de elektrokimyasal yük dağılımına göre yapılan kil sınıflandırılması görülmektedir [39].



Şekil 4. Elektrokimyasal yüzey yüklerine göre killer.

Nanokiller ise tabakalı mineral silikatlara verilen genel isimlendirmedir. Killer, tetrahedral ve oktahedral nanotabakaların bir arada bulunması, yüksüz killerde (tip 0:1 ve 2:1), katyonik killerde (tip 2:1 ve 2:1:1), ve anyonik killerde (tip 0:1) oluşumuna sebep olur. Smektitlerden montmorillonit (MMT), hektorit tipi killer ve yüksek oranda MMT içeren kalsiyum ve/veya sodyum bentonit yanı sıra fiber yapılı sepiolit ve halloysit killeri ile tek tabakalı kaolin bu grupta en bilinenleridir [40], [41].

Nanokiller, uygun dağıtma ortamlarında kimyasal etkisiyle ve/veya ilave mekanik kuvvetlerle nanoboyuta getirilebilmeleri sayesinde biyoyumlu, biyobozunur, toksik olmayan nanokatki arayışında dikkat çekici alternatif olmaktadır. Organiklerle yüzeyi modifiye edilen gruplar “organokiller” olarak bilinir. Bu nedenle, nanokil bünyesindeki metal oksitler, topraktan gelen doğal hümatalar ve hümik asit gibi organik madde izleri içerdiği bulunduğu formasyona göre değişen magnezyum, demir, alkali toprak, alkali metaller ve diğer ortamdaki katyonlarla izomorfik yer değiştirme (katyon değişimi) sonucunda kimyasal yapısında yeni bir değişiklik olmaksızın mineral kristaldeki elementler yer değiştirebilir [42]. Örneğin, oktahedral koşullarda Fe^{+3} , Fe^{+2} ve Mg^{+2} iyonları muhtemelen Al^{+3} 'ün yerini alabilirken, tetrahedral koşullarda Si^{+4} , Al^{+3} ile değiştirilebilir. Bu yer değiştirmede, sulu alüminyum silikatlardaki AlO_6 ve SiO_2 ağırlıkça oranı önemlidir. Örneğin ağırlıkça AlO_6/SiO_2 oranı kaolinde 1:1, montmorillonit ve vermikülit ile 2:1, klorit ise 2:2 oranındadır [42].

Doğal oluşum kil mineralleri yüksek yüzey alanı (~750 m^2/g), kimyasal kararlılık, üstün iyon değiştirme yeteneğiyle kontrol edilebilir yüzey yapıları sayesinde geniş kullanılabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunarak, elektrot modifikasyonlarında kaplama malzemesi olarak son yıllarda yoğun ilgi görmektedirler [43-45]. C vitamininin biyokimyasal olarak aktif formunu temsil eden, L-Askorbik asidin saptanmasında kullanılan nanoyapılı MMT-serisin nanokompozit sayesinde, yüksek fiziksel ve mekanik mukavemete sahip sensörün, kare dalga voltametri (SWV) ile ve 10-1000 μM arasında ve (LOD) 8 μM hassas tespitinin mümkün olduğu görülmüştür. Sensör ayrıca farmasötik C vitamini numunesi için geçerlidir [46]. Kil minerallerinin ilaç ve biyomedikalde yara iyileştirici formülasyonlarda kullanılmaktadır. Mg açısından zengin smektit kil minerali, cilt yaralarında kollajen sentezine ve anjiyogeneze yardımcı olur. Paligorskisit ve sepiolit, anti-inflamatuar özellikler gösterdiği görülmüştür. Kil mineralleri, cilt bakım ürünlerinde yağdan arındırma, temizleme, peeling yapma, canlandırma, nemlendirme ve sıkılaştırma aktiviteleri için kullanılan termal çamurları (nanokil/kaynak suyu hidrojel) formüle etmek için kullanılır. Kil takviyeli dermatolojik ürünler ve kil maskeleri günlük kullanımlarda daha çok yer bulan uygulamalarıdır [46].

Diğer yandan, metal NP' lerin ve bunların oksit formlarının hidrojel yapısına olan etkisi, manyetizma, elektriksel ve termal iletkenlik ve antimikrobiyal aktiviteler gibi çekici özellikleri ortaya çıkarmıştır. Bu nanokompozit hidrojel, ilaç dağıtımı gibi diğer uygulamalara ek olarak sensörler ve iletken yapı iskeleleri olarak harika alternatifler haline getirir [38]. Antioksidanlar ve vitaminler için taşıyıcı

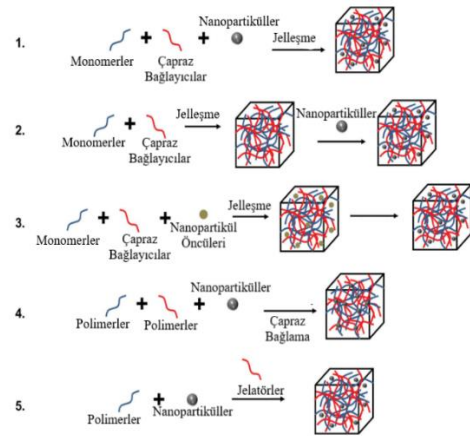
olarak sistemde kil nanoparçacıklarının birçok uygulaması vardır. Killer doğada bulunur, düşük maliyetlidir ve çok çeşitli kullanımlar için kullanılabilen çevreye zararsız malzemelerdir. Kil nanoparçacıkları kanı temizleme, gıda kontaminasyonunu azaltma ve mide ülserlerini ishal önleyici ilaçları iyileştirme özelliklerine sahiptir [38].

3.1.1.4 Hidrojel tabanlı sensörlerin hazırlanmasına örnekler

Hidrojel, hidrojel kullanılarak sensör platformlarının hazırlanmasında öncelikle matris yapının hazırlanması ile başlanır. Hidrojel, hidrojel üretiminde, genel olarak UV, termo-başlatılmış radikal polimerizasyon veya ekleme reaksiyonları, yerinde jelleşme yöntemlerinden biri tercih edilir [47].

Hidrojel inorganik kompozitler, inorganik ve biyolojik özellikleri birleştirerek her iki malzemenin dezavantajlarını dengelemek için tasarlanmıştır. Hibrit kompozit yapı oluşturmak için polimer matrisine nanodolgu maddeleri ve çapraz bağlayıcılar eklenir [48].

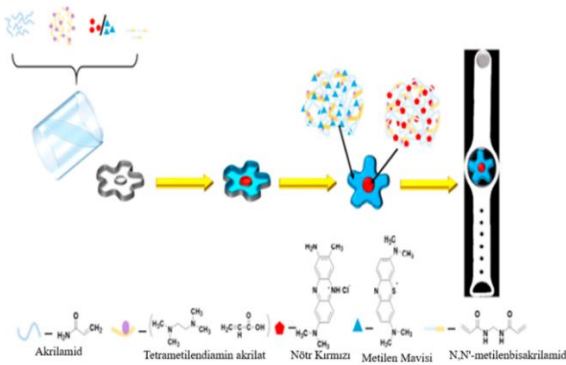
İnorganik partiküller, jelleşmeden önce veya sonra hidrojel yapısına eklenebilir. Bunun için öncelikle homojen olarak dağıtılmış nanopartikül dispersiyonu, hidrojel matrisine eklenerek, birlikte jelleştirilir. Sonradan ilaveliler de ise jelleşmiş hidrojel matrisine nanopartiküller emdirilir. Hidrojel matrisi içinde düzgün bir şekilde dağılım birbirleri ile olan etkileşimlere bağlıdır, polimer zincirleri ile nanopartiküller arasında fiziksel enkapsülasyon ve hidrojen bağı gibi fiziksel etkileşimler meydana gelir [47]. Yerinde jelleşme ise daha çok optik olarak duyarlı sensörler üretmek için uygulanır. Farklı uygulamalar için Langer ve arkadaşları, matris boyunca daha düzgün bir nanoparçacık dağılımı elde etme de nanopartikül üretme ve homojen dağıtma yöntemleri esasen uygulanmaktadır. Ayrıca, nanopartikül sentez yerine nanopartiküllerin hazırlanmasında kullanılan öncülerin bir jele yerleştirilmesi de başarılı sonuçlar vermiştir [49,50].



Şekil 5. Tekdüze dağılımlı hidrojel-inorganik faz kompozitinin sentezlenme yöntemleri: (1) yerinde jelleşme, (2) jelleşme sonrası nanopartiküllerin katılımı, (3) jel içinde nanoparçacık oluşumu, (4) birden fazla polimerle nanoparçacıklar kullanılarak çapraz bağlama, (5) Jelatör molekülleri varlığında jel oluşumu [47].

D vitamini özelindeki sensör çalışmalarından, iyonik hidrojenleri kullanan, giyilebilir güneş radyasyonu sensörü tasarımı Şekil 6' de gösterilmektedir [51]. Sensör sayesinde, hem D vitamini üretimi miktarı ve hem de güneş yanığı oluşturabilecek radyasyon dozu aynı anda izlenebilmektedir. Tetrametiletilendiamin akrilat (TEMEDA), Tetrametiletilendiamin (TEMED), serbest radikal reaksiyonu ile akrilamid ve akrilik asit (AA) nötralizasyonundan elde edilmiştir. Polimerizasyon sırasında MB (Metilen mavisi) ve NR (doğal kırmızı) ekleyerek, nihai iyonik hidrojenlerin renk değişikliği ile güneş ışınlarının radyasyon şiddeti tespit edilebilmektedir. Maviden kırmızıya renk değişimi hızı radyasyon dozu ile ilişkili olduğundan, giyilebilir sensör bünyesindeki MB'nin iyonize hidrojeninin renginin bozulması D vitamini sentezlemek için insan vücudunun ihtiyaç duyduğu güneş radyasyonu dozunu gösterirken; NR ise potansiyel cilt hasarına neden olan radyasyon dozunun eşikini göstermektedir [51].

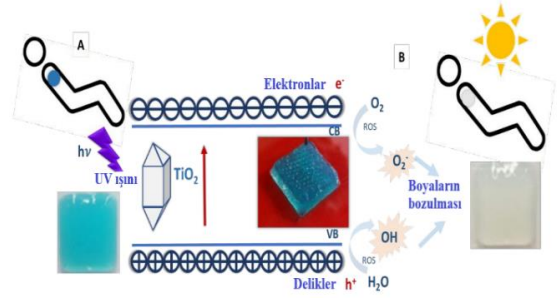
Ek olarak, ısıya duyarlı çapraz bağlı poliüretan kaplama kullanımı ise kendiliğinden temizleme etkisi yaratmaktadır. Geçiş sıcaklığının altındaki hidrofilitik özelliğinden dolayı çapraz bağlı bant, günlük kullanımdan sonra lekeleri kolayca temizleme özelliğine sahiptir. Bu tür giyilebilir sensörler, özellikle açık hava etkinliklerinde güneş radyasyonunu izlemek için yaygın olarak kullanılabilir [51].



Şekil 6. İyonik hidrojenlere dayalı giyilebilir güneş radyasyonu sensörü gösterilmektedir. Boya içeren iyonik hidrojen sensör, PU bandına entegredir [51].

Diğer yandan, 3D baskı yöntemi yardımıyla ilk kez Finny vd. 2020 [52], kolorimetrik olarak UV radyasyonu takibi yapabilen taşınabilir, sağlam ve ucuz, hidrojel tabanlı sensör yapısı geliştirmişlerdir. Sensörler, organik boyaları oksidatif olarak parçalamak için TiO_2 nanoparçacıklarının benzersiz fotokatalitik özelliğini kullanmış, boyayı ve fotokatalitik nanoparçacıkları şeffaf bir hidrojel matrisi içinde stabilize ederek hazırlanmıştır. Hidrojel, nanopartikülleri ve boyaları stabilize etmek için mükemmel bir ortam sağlayan aljinat ve jelatin biyopolimerlerinden yapılmıştır. Hidrojel bileşimi, oda sıcaklığında jelleşmeyi sağlamak ve mekanik olarak kararlı, sağlam ve tekrar üretilebilir yapıların 3D baskısını kolaylaştırmak için optimize edilmiştir. Tamamen 3D baskı ile yapılan sensör tasarımı, biyoyumlu giyilebilir sensörler

geliştirmek için 3D baskının potansiyeli Şekil 7'de gösterilmektedir [52].



Şekil 7. Sensörün fotokatalitik algılama mekanizması; (A) UV'ye maruz kalmadan önce, (B) UV'ye maruz kaldıktan sonra sensörün kolorimetrik yanıtı [52].

3.1.1.5 Çift ağ hidrojel kompozitlerin hazırlanmasına örnekler

Daha sert hidrojenler geliştirme arayışında, makromoleküler, mikroküre kompozit hidrojenler, fiziksel etkileşimle geliştirilmiş hidrojenler, tetra-PEG hidrojenler, kayan halka hidrojenler, nanokompozit hidrojenler ve çift ağ hidrojenler dahil olmak üzere pek çok yöntem literatürde kullanılmıştır. Klasik iki aşamalı polimerizasyon yöntemi, moleküler stent yöntemi ve tek kap yöntemi gösterilmektedir [48]. Polimerizasyon, UV lamba kürlenme ve ısıtma ile yapılırken, çift ağ hidrojenlerin katı ve kırılğan ağı yapısı, tipik olarak kovalent bağlı, çapraz bağlı polimer ağı, diğeri ise iyonik bağlanmaya benzer daha yumuşak ve daha zayıf moleküler etkileşimler ile karakterize edilebildiği, iç içe geçen bir polimer ağına (IPN) sahiptir. Bu zıt ağ yapısı ve karışıklık, hidrojel bazlı elektroniklerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir [49].

3.1.1.6 İnorganik katkı sensörlerin hazırlanmasına örnekler

Çok yönlü uygulamalar için doğru, seçici ve kullanımı kolay bir elektrokimyasal analitik cihaz tasarlamak, bugünün ve yarının biyomedikal bilimi için önemli bir zorluktur. Çıplak elektrotta D vitamininin elektrokimyasal oksidasyonu zayıftır. D vitamininin oksidasyonunu arttırmak ve kan örneklerindeki konsantrasyonunu belirlemek için Anusha ve ekibi bir elektrokimyasal sensör olarak fulleren-C60 ve bakır-nikel bimetallik nanoparçacıklar nanokompozit film modifiye camısı karbon elektrotunu önermiştir. Fullerene-C60, damla döküm yöntemi ile GCE'ye manuel olarak düşürülmüş ve ardından CuNP'ler ve NiNP'ler, fulleren ile modifiye edilmiş GCE üzerine elektrokimyasal olarak biriktirilmiştir. Geliştirilen sensör, elektrokimyasal ve morfolojik olarak karakterize edilmiştir. GCE üzerindeki CuNPs-NiNPs@indirgenmiş-fulleren-C60 nanokompozit filmi, 1.25–475 μM yüksek dinamik konsantrasyon aralığı ve 0.0025 μM algılama sınırı ile D₃ vitamini tespiti için iyi tanımlanmış bir oksidasyon zirvesi sergilemiştir [53]. Ekibinin yaptığı farklı bir çalışmada ise camısı bir karbon elektrot (GCE) yüzeyinde zeolitik imidazolat çerçevesi (ZIF-8) ile birleştirilmiş lantan nanoparçacıkları-grafen kuantum noktalarına (LaNPs-GQDs) dayalı biyolojik sıvılarda D₃

vitamini analizi için yeni bir elektrokimyasal nanosensör geliştirmişlerdir. Elektrokimyasal çalışmalar, hazırlanan bir sensörün, sırasıyla 0.00610 μ M kabul edilebilir bir saptama limiti ile 0.00625 μ M ila 1.25 μ M arasında geniş bir lineer aralıkta D₃ vitamini oksidasyonuna karşı mükemmel elektrokimyasal tepki gösterdiğini ortaya koymuştur [54].

Aynı ekibin bir diğer çalışmasında ise gümüş-kobalt (Co-Ag) katkılı polianilin-polipirol (PANI-PPY) kopolimeri ve iyonik sıvıya (IL) dayalı yeni kompozit malzemenin sentezi için basit ve ekonomik bir yol tanımlamışlar ve D₃ vitamini tespiti için algılama malzemesi olarak kullanmışlar. Co-Ag/PANI-PPY/IL ilk olarak camı karbon elektrotunu (GCE) modifiye etmek için kullanılmış ve D₃ vitamini tespiti için uygulanmıştır. Daha sonra önerilen malzemenin iletken mükrekebi hazırlanmış ve el yapımı bir kâğıt sensörü üretilmiştir. Co-Ag/PANI-PPY/IL@GCE ve kâğıt elektrot, sırasıyla 0.0073 μ M ve 0.015 μ M kabul edilebilir saptama limiti ile 0.0125–22.5 μ M ve 0.025–0.125 μ M konsantrasyon aralığında D₃ vitamini oksidasyonuna karşı mükemmel elektrokimyasal davranış göstermiştir. Serum ve idrar örneklerinde D₃ vitamini tespiti için Co-Ag/PANI-PPY/IL@GCE ve kâğıt elektrot başarıyla uygulanmıştır [55]. Ekibin son çalışmasında ise Au nanopartiküller ile fonksiyonelleştirilmiş GCN–b–CD nanokompozitine dayalı serum numunelerinde 25-hidroksivitamin D₃ (25(OH)D₃) biyobelirteç tespiti ve miktar tayini için yeni bir etiketsiz impedimetrik immünosensör önermişlerdir. Ab-25(OH)D₃ antikoları, karbodiimid kimyası kullanılarak GCN–b–CD@Au/GCE üzerinde kovalent olarak hareketsizleştirildi. Oluşturulan immünosensörün yüzey morfolojisi ve yapısal özellikleri, farklı analitik tekniklerle doğrulandı. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), etiketsiz olması, biyomolekül aktivitelere daha az zarar vermesi ve yüksek oranda immünosensör yüzeyinde Antikor (Ab) ve Antijen (Ag) etkileşiminin ölçümünde ana tespit yöntemi olarak seçilmiştir. Hazırlanmış gibi immünosensör, 0.01 ng/ml'lik en düşük saptama limiti ile 0.1 ng/ml ila 500 ng/ml arasında beklenenin aksine mükemmel olmayan bir konsantrasyon aralığı sergiledi. Ayrıca, serum numunelerinde tekrarla doğrulandı ve elde edilen sonuçlar standart CLIA tekniği ile karşılaştırıldı. Sonuçlar, algılama probunun klinik laboratuvarlarda Vitamin D eksikliğinin klinik teşhisi için kullanılabileceğini ortaya koymuştur [56].

Wadhwa ve arkadaşlarının çalışmasında [57], ise grafen kuantum nokta-altın (GQD-Au) hibrit nanoparçacıkları kullanarak D₃ vitamini tespiti için taşınabilir bir elektrokimyasal aptasensörü rapor etmişlerdir. Geliştirilen aptasensörün doğrusal aralığı 1 nM – 500 nM, algılama limiti (LOD) 0.70 nM (0.28 ng mL⁻¹), miktar belirleme limiti (LOQ) 2.09 nM (0.84 ng mL⁻¹), hassasiyet 0.90 Ω nM⁻¹ mm⁻² ve yanıt süresi <1 dakikadır. Geliştirilen sensör kontrollü elektronik ile entegre edilerek taşınabilir bir prototip oluşturulmuştur. Durovic ve ekibinin yaptığı çalışmada [58], çalışma metodu olarak camı modifiye edilmemiş camı karbon elektrot kullanılarak ticari diyet takviyelerinde D₃ vitamini tayini için hassas bir voltametrik yöntem geliştirilmiştir. Kare dalga voltametrik yöntemin optimizasyonunu takiben, tepe akımı ve D₃ vitamini konsantrasyonu arasındaki doğrusal ilişki göstererek, 1.25-

105 μ mol/L konsantrasyon aralığında başarılıdır. Hesaplanan saptama limiti ve ölçüm limiti değerleri sırasıyla 0.24 ve 0.73 μ mol/L olduğu, geliştirilen analitik prosedür sayesinde, gün içi ve günler arası (n=7) %3' ten daha düşük RSD değerleriyle olağanüstü kesinlik ortaya koymuştur. Aynı ekibin bir diğer çalışmasında D₃ vitamini tayini için bor katkılı elmas elektrodunun çalışma elektrotu olarak kullanıldığı, hassas bir kare dalga voltometri yöntemi geliştirilmiştir. D₃ Vitamini, %50 etanol içinde hazırlanan 0.02 moldm⁻³ Britton-Robinson tampon pH 5.0'da yaklaşık +1.00 V'de (Ag/AgCl'ye karşı 3.5 moldm⁻³) iyi tanımlanmış bir voltametrik tepe sağlanmıştır. Optimum koşullar altında, oksidasyon tepe akımı, 2 ila 200 μ mol dm⁻³ aralığında D₃ vitamini konsantrasyonu ile doğrusal olarak artmıştır. Hesaplanan saptama limiti ve ölçüm limiti sırasıyla 0.17 μ mol dm⁻³ ve 0.51 μ mol dm⁻³ idi. Bor katkılı elmas elektrot, olası enterferanslar arasında koleksiferol için spesifik tanıma kabiliyeti sergilemiş ve karmaşık numune ön işlemleri olmaksızın ticari farmasötik ürünler gibi numunelerde D₃ vitamini tespiti mümkün olmuştur [59]. Fathima vd. [60] karbon nanotüplerin elektrokatalitik aktivitesi üzerine yaptıkları bir çalışmada, D₃ vitamini elektro-oksidasyonu durumunda metalik safsızlıklar ve karbonlu safsızlıkların herhangi bir rol oynamadığını görerek, elektrokatalitik aktivitenin, CNT'lere bağlı oksijen fonksiyonel grupları tarafından desteklendiği ve yalnızca bunların kenar bölgelerinden kaynaklanmadığı gözlemlenmiştir. MWCNT (çok duvarlı karbon nanotüpler) ile modifiye edilmiş GCE (camı karbon elektrotlar) ayrıca 20–350 μ M aralığında ve LOD'si 9.3 μ M'lik bir aralıkta iyi algılama performansı sergilemiştir.

Karbon bazlı nanomalzemeler, çeşitli biyomoleküllerin algılanmasında kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Bora ve ekibinin çalışmasında, antikor içermeyen, yüksek duyarlılığa sahip, karbon nanotüp bazlı, yüksek düzeyde yanıt veren bir vitamin D₃ sensörü rapor edilmiştir. Saf karbonun hidrofobik karakterinin sınırlayıcı etkisinin üstesinden gelmek için azot katkılı karbon nanotüpler kullanılmıştır. Sensör, 16 pM algılama sınırı ile 0–10 nM konsantrasyon aralığında yüksek performans sağlayabilmektedir. Yanıt yüzey modelleme çalışması, duyarlılık değerinin 0.000495 mA/cm² nM olarak göstermiştir [61]. Canevari ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada [62], amorf nikel (II) hidroksit parçacıklarının, a-Ni(OH)₂'nin sentezini, karakterizasyonunu ve uygulamasını, silika ve grafen oksitten oluşan bir hibrit malzeme olan SiO₂/GO üzerine açıklamaktadır. Bu organik-inorganik matrisi elde etmek için katalizör olarak HF kullanan sol-jel işlemi kullanılmıştır. Ni(OH)₂, çözücü olarak nikel (II) asetat ve N,N-dimetilformamid (DMF) kullanılarak doğrudan matrisin yüzeyinde hazırlanmıştır. SiO₂/GO/Ni(OH)₂ materyali ile modifiye edilmiş camı bir karbon elektrot, darbe diferansiyel voltmetrisi ile vitamin D₃ tayini için hassas bir elektrokimyasal sensörün geliştirilmesinde kullanılmıştır. pH 13'te sodyum hidroksitte D₃ vitamininin iyi tanımlanmış bir elektro-oksidasyon tepe noktası gözlemlenmiştir. Sonuçlar, elde edilen SiO₂/GO/Ni(OH)₂ modifiye elektrotun son derece seçici ve bir saptama sınırı ile çok hassas olduğunu göstermiştir.

3.2 D₂ vitamini için elektrokimyasal sensörler

D vitamininin diğer formu olan D₂ vitamini konusunda ise daha sınırlı sayıda çalışmayı görmekteyiz. Sarkar ve ekibinin yaptığı CQD@Fe₃O₄-CHIT/ITO' nun elektrokimyasal tepki çalışmalarında Fe₃O₄-CHIT/ITO elektrotlarına kıyasla gelişmiş elektrokimyasal sinyal göstermiştir. Bu nedenle, diferansiyel darbe voltametri (DPS) tekniği kullanılarak D₂ vitamini (10-100 ngmL⁻¹) tespiti için CQD@Fe₃O₄-CHIT/ITO elektrotu kullanılmıştır [63]. Sarkar ve ekibinin yaptığı çalışmada D₂ vitamini tespiti için karbon noktaları (CDs) ile modifiye edilmiş kitosan (CH) tabanlı bir biyoalgılama platformu üretilmiştir. Asetik asit (%1) çözeltisi içinde kitosan (%1) çözeltisi hazırlanmış ve ardından karbon noktaları-kitosan (CD-CH) kompozitini hazırlamak için CD'ler eklenmiştir. Damla döküm yöntemiyle ITO cam substratı (CD-CH/ITO) üzerine ince bir CD-CH kompozit filmi hazırlanmıştır. CD-CH/ITO yüzeyi, BSA/Ab-VD₂/CD-CH/ITO biyoelektrotunu hazırlamak için vitamin D₂ antikorumun (Ab-VD₂) ve sığır serum albümininin (BSA) hareketsizleştirilmesiyle ayrıca modifiye edilmiştir. Biyoelektrodun D₂ vitamini antijenine (Ag-VD₂) karşı elektrokimyasal tepkisi, döngüsel voltametre ve DPS ile gerçekleştirilmiştir. Biyoalgılayıcı elektrot, Ag-VD₂ konsantrasyonunun 10-50 ng mL⁻¹ aralığında doğrusallık göstermiştir [64].

4 Giyilebilir teknolojiler ve geleceğin teknolojileri

Giyilebilir elektrokimyasal sensörler, hızla gelişen bir dijital sağlık teknolojisinin temsil etmekte ve başarılı bir kişiselleştirilmiş beslenme yaklaşımı için dijital ve biyokimyasal analizler arasındaki boşluğu kapatmak için mükemmel adaylardır. Bu tür biyosensörler, farklı formlarda gelişmiş elektrokimyasal cihazlar kullanarak ter, tükürük, gözyaşı ve interstisyel sıvıdaki dinamik olarak değişen biyobelirteç konsantrasyonlarına kolayca ve hızlı bir şekilde erişebilir [65, 66].

COVID-19 pandemisi, hastalıkların önlenmesine, izlenmesine ve erken tedavisine yardımcı olmak için klinik ziyaretler olmaksızın insanların esenliği hakkında kapsamlı bir görüş sağlayan kendi kendini izleme cihazlarına olan acil ihtiyacı ortaya çıkardı. Küresel pandemi krizine yanıt olarak, şu anda vücut sıvılarından ana vitaminlerin ve diğer temel besinlerin güvenilir, sık veya sürekli multipleks tespiti ihtiyaç halini aldığından, bütünleşmiş biyoelektronik cihazların geliştirilmesine yönelik artan çabalara tanık olmaktadır. Bu yeni giyilebilir ve mobil kimyasal algılama yeteneklerini diğer fiziksel sensör modaliteleri ve büyük veri analitiğinkilerle entegre ederek, etkili kişiselleştirilmiş diyet rehberliği sağlama potansiyeline sahiptir [66].

Birçok çalışmada; ürik asit, kan ketonları ve glikoz gibi analitleri gibi biyobelirteçleri tespit edebilmek için akıllı telefon tabanlı elektrokimyasal sensörler önerilmiştir. Bu nedenle, vitaminlerin tespiti için akıllı telefon tabanlı elektrokimyasal sensörlerin kullanılabilirliğini, ucuz ve erişilebilir kılınarak, yaygınlaştırılacağı düşünülmektedir. Ayrıca, akıllı telefon tabanlı elektrokimyasal sensörler, vitaminlerin gerçek zamanlı ve uzaktan tespiti için beşinci nesil kablosuz iletişim ve IoT ile birleşebilir. Üstün özellikleri düşük maliyetli inorganik katkılarla sağlayarak,

her kesime hitap eden, vitaminlerin tespitine ümkün kılan, elektrokimyasal sensörlerin sürekli ilerlemeler sağlayacağına ve gelecekte tam olarak günlük hayatın içinde kullanılacağı ön görülmektedir [66, 67].

5 Sonuç ve perspektifler

Covid-19 pandemisi, vitaminler ve insanların tükettikleri gıdalara olan ilgilerinin çoğalmasında sayesinde yapılan testleri büyük ölçüde artırdı. Bu nedenle, vitamin miktarının tayini daha da önemli hale geldi ve bu sonuç olarak vitamin algılama alanındaki araştırmalar hızlandı. İlave olarak, bakım noktası testlerine (point-of-care-testing) yönelik yüksek taleple birlikte kullanımı kolay, uygun maliyetli ve basit test kitlerine duyulan ihtiyacın ortaya çıkmasıyla birlikte, elektrokimyasal algılama ve optik algılama alanında çalışan araştırmacıların artmasına, çok fazla beceri gerektirmeyen, kolayca ele alınabilen ve aynı zamanda iyi performans sağlayan yeni sensörler tasarlamaya motive edecektir.

Unutulmamalıdır ki, biyosensörler; aptamerler, MIP ve nanomalzemelerin kullanımı, algılama ve vitamin algılamada yeni bir boyut açtı. Tablo 1'de elektrokimyasal sensör kullanan D vitaminiyle ilgili çalışmalar derlenmiştir. Yapılan çalışmalara bakıldığında öne çıkan yapıların karbonnanotüplerin olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca, vitaminleri ölçmek için elektrokimyasal algılamanın kullanıldığını ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Vitamin tespiti, bağışıklık sistemlerini ve insan vücudunun sağlığını iyileştirmedeki rolü nedeniyle önümüzdeki yıllarda büyüme potansiyeline sahip olacağı beklenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] Dini and S. Laneri, Nutricosmetics: A brief overview, Phytotherapy Research, vol.33, pp.3054-3063, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1002/ptr.6494>
- [2] H. Akkoyun ve M. Bayramoğlu, D Vitamini Ve Metabolizma İçin Önemi, cilt 9, sayı 3, Aralık 2014. <https://doi.org/10.17094/avbd.05043>
- [3] L. S. Killedar, P. R. Vernekar, M. M. Shanbhag, N. P. Shetti and R. S. Malladi, Fabrication of nanoclay-modified electrodes and their use as an effective electrochemical sensor for biomedical applications, Elsevier Inc., vol 351, Apr. 2022. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.118583
- [4] M. F. Holick, Vitamin D: A millenium perspective, J Cell Biochem, vol. 88, no. 2, pp. 296-307, Feb. 2003. <https://doi.org/10.1002/jcb.10338>
- [5] M. Kira, T. Kobayashi, K. Yoshikawa, Vitamin D and the Skin, The Journal of Dermatology, vol. 6, no. 6, pp. 429-437, Feb. 2014.
- [6] H. S. Çakmak, Y. N. Yüksek, T. Tütüncü, E. Ö. Küçük, T. Turan, D. Berker ve R. Kahveci, D vitamini testinin akıllı kullanımı: Test mi? Ya da tedavi mi?, Turkish Journal of Clinics and Laboratory, cilt 10, sayı 2, pp.168 - 178, Jun. 2019. <https://doi.org/10.18663/tjcl.440877>

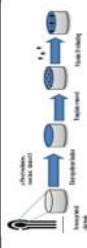

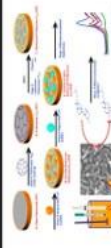

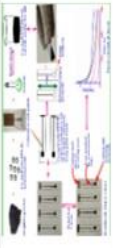

- [7] R. Nair, A. Maseeh, Vitamin D: The "sunshine" vitamin, *J Pharmacol Pharmacother*, vol. 3, no. 2, pp. 118–126, Apr-Jun. 2012.
- [8] Y. Shi, Manco, M., Moyal, D., Huppert, G., Araki, H., Banks, A., ... & Pielak, R. M. Soft, stretchable, epidermal sensor with integrated electronics and photochemistry for measuring personal UV exposures, *PLoS one*, 13(1), e0190233, Jan. 2018 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190233>.
- [9] M. Rivas, E. Rojas, M. C. Araya and G. M. Calaf, Ultraviolet light exposure, skin cancer risk and vitamin D production, *Oncol Lett*, vol. 10, no. 4, pp. 2259-2264, Oct. 2015. <https://doi.org/10.3892/ol.2015.3519>
- [10] H. Genç, Yenidoğan sarılığın tedavisinde beşikte fototerapinin etkinliği, *Uzmanlık Tezi, Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Anabilim Dalı, İstanbul Tıp Fakültesi, İstanbul, Türkiye*, 2010.
- [11] G. R. Zosky, L. J. Berry, J. G. Elliot, A. L. James, S. Gorman, and P. H. Hart, Vitamin D deficiency causes deficits in lung function and alters lung structure, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, vol. 183, no. 10, pp. 1336–1343, May. 2011.
- [12] L. G. Collins, C. Haines, R. Perkel, and R. E. Enck, Lung cancer: Diagnosis and management. *Am. Fam. Physician*, vol. 75, no. 1, pp. 56–63, Jan. 2007.
- [13] E. Doğan, N. Sevinç, Türkiye’de Batı Karadeniz bölgesindeki çocukların D vitamini düzeyleri. *Pamukkale Tıp Dergisi*, cilt 4, sayı 1, Ocak 2011. <https://doi.org/10.31362/patd.718933>
- [14] Z. Workneh Bitew, T. Worku, and A. Alemu. Effects of vitamin D on neonatal sepsis: A systematic review and meta-analysis, *Food Sci. Nutr.*, vol. 9, no. 1, pp. 375–388, Nov. 2020.
- [15] T.D Thacher, Vitamin D and COVID-19, *Mayo Clin Proc*, vol. Apr. 96 (4), pp. 838-840, 2021. doi: 10.1016/j.mayocp.2021.02.014
- [16] C.S. Stokes, F. Lammert and D. A. Volmer, Analytical Methods for Quantification of Vitamin D and Implications for Research and Clinical Practice, *Anticancer Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 1137-1144, Feb. 2018.
- [17] D. C. Gheorghe, R.L. Stefan-van Staden and J. K. F. van Staden, Mini-Review: Electrochemical Sensors Used for the Determination of Water- and Fat-Soluble Vitamins: B, D, K, *Crit Rev Anal Chem.*, pp. 1-10, Feb. 2022.
- [18] Y. Yu, C. Li, C. Chen, H. Huang, C. Liang, Y. Lou, X. Chen, Z. Shi, S. Geng, Saccharomyces-derived carbon dots for biosensing pH and vitamin B 12, *Talanta*, vol. 195, pp. 117-126, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.11.010>
- [19] O. N. Oliveira, Jr, F. Marystela, F. Leite and A. L. Róz, *Nanoscience and its Applications*, 1st Edition, (Online), Dec. 2016.
- [20] V. Dhinakaran and M. V. Shree, Chapter Ten - Point-of-care applications with graphene in human life, *Comprehensive Analytical Chemistry*, vol. 91, pp. 235-262, 2020. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2020.08.009>
- [21] S. Menon and K. G. Kumar, Chapter 21 - Carbon nanomaterial-based sensors: Emerging trends, markets, and concerns, *Carbon Nanomaterials-Based Sensors*, pp. 347-379, 2022. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91174-0.00008-1>
- [22] L. Huan, S. Tuan, W. Zhao K. Liui and J. Guo, Electrochemical vitamin sensors: A critical review, *Talanta*, vol. 222, Jan. 2021.
- [23] M. H. Parvin, J. Y. Lee, γ -Al₂O₃ nanoparticle catalyst mediated polyaniline gold electrode biosensor for vitamin E, *Catalysis Communications*, vol. 110, pp. 59-63, May. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2018.03.009>
- [24] T. Sha, Green and Low-cost Synthesis of Nitrogen-Doped Graphene-like Mesoporous Nanosheets from the Biomass Waste of Okara for the Amperometric Detection of Vitamin C in Real Samples, *Talanta*, vol. 200, pp. 300-306, August 2019.
- [25] V. Ruiz, V. Montiel, J. Wang, J. R. Sempionatto, Decentralized vitamin C & D dual biosensor chip: Toward personalized immune system support”. *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 194, Dec. 2021.
- [26] S. Kia, S. Bahar and S. Bohlooli, A novel electrochemical sensor based on plastic antibodies for vitamin D3 detection in real samples, *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, pp. 4752 – 4757, March 2019.
- [27] S. Kia, A new Voltametric sensor, based on molecularly imprinted polymer (MIP) for vitamin D3 Detection. *International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA)*, IEEE, Nov. 2019.
- [28] D. Chauhan, R. Kumar, A K.Panda, P. R.Solanki, An efficient electrochemical biosensor for Vitamin-D3 detection based on aspartic acid functionalized gadolinium oxide nanorods, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, pp. 5490-5503, Nov.2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.017>
- [29] J. Tavakoli and Y. Tang, Hydrogel Based Sensors for Biomedical Applications: An Updated Review, *Polymers*, vol.9, no. 8, Aug. 2017. <https://doi.org/10.3390/polym9080364>
- [30] L. L. Jiang, X. Lu, C. Xie, G. Wan, H. Zhang and T. Youhong, Flexible, Free-Standing TiO₂-Graphene-Polypyrrole Composite Films as Electrodes for Supercapacitors, *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no.8, pp. 3903–3910, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1021/jp511022z>
- [31] Y. Qiu, K. Park, Environment-sensitive hydrogels for drug delivery, *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol.53, pp. 321-339, Dec. 2001.
- [32] A. Yalçın, F. Damin, E. Özkumur, G. Carlo, M. Chiari, M. S. Unlü, Direct observation of conformation of a polymeric coating with implications in microarray applications, *Analytical chemistry*, vol. 81, no. 2, pp. 625-630, Dec. 2009. <https://doi.org/10.1021/ac801954x>
- [33] H. J. Hwang, M. Y. Ryu, C. Y. Park, J. Ahn, H. G. Park, C. Choi, S. Ha, T. J. Park, J.P. Park, High sensitive and selective electrochemical biosensor: Label-free detection of human norovirus using affinity peptide as

- molecular binder, *Biosens. Bioelectron.*, vol. 87, pp. 164-170, Jan. 2016.
- [34] H.R. Culver, J. R. Clegg and N. A. Peppas, Analyte-responsive hydrogels: Intelligent materials for biosensing and drug delivery, *Acc. Chem. Res.*, pp. 170-178, Feb. 2017.
- [35] W. Lu, X. Le, J. Zhang, Y. Huang, and T. Chen, Supramolecular shape memory hydrogels: A new bridge between stimuli-responsive polymers and supramolecular chemistry, *Chem. Soc. Rev.*, vol. 50, no. 2, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1039/C6CS00754F>
- [36] J. Tavakoli, E. Jabbari, M. E. Khosroshahi, and M. Boroujerdi, Swelling characterization of anionic acrylic acid hydrogel in an external electric field, *Iran. Polym. J.*, vol. 115, Nov. 2006.
- [37] H. Linden, S. Herber, W. Olthuis and P. Bergveld, Stimulus-sensitive hydrogels and their applications in chemical (micro)analysis, *Analyst*, vol. 128, no. 4, pp. 325-331, Feb. 2003. <https://doi.org/10.1039/B210140H>
- [38] F. Wahid, X. Zhao, S. Jia, H. Bai, C. Zhong, Nanocomposite hydrogels as multifunctional systems for biomedical applications: Current state and perspectives, *Composites Part B: Engineering*, vol. 200, Nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108208>
- [39] E. Pavón, R. M. Rodríguez, A. C. Perdigón and M. Alba, New Trends in Nanoclay-Modified Sensors, *Inorganics*, vol. 9 (6), Jun. 2021. <https://doi.org/10.3390/inorganics9060043>
- [40] B. Benli, Nanoteknoloji ve antik çağlara uzanan killi nanoyapılar, *Kibited*, vol. 1 (3) pp. 143-162, Jan. 2009.
- [41] F. Bergaya, G. Lagaly, Chapter 1- General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science Developments in Clay Science, vol. 1, pp. 1-18, 2006. [http://dx.doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
- [42] B. Benli, Effects of humic acid release from sepiolite on the interfacial and rheological properties of alkaline dispersions, *Applied Clay Science*, vol. 102, pp. 1-7, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.10.004>
- [43] J. D. D. Moraes, S. R. A. Bertolino, S. L. Cuffini, D. F. Ducart, P. E. Bretzke, G. R. Leonardi, Clay minerals: Properties and applications to dermocosmetic products and perspectives of natural raw materials for therapeutic purposes-A review, *Int J Pharm.*, vol. 534(1-2), Oct. 2017.
- [44] C. Mousty. Sensors and biosensors based on clay-modified electrodes- New trends, *Applied Clay Science*, vol. 27, pp. 159-177, Dec. 2017.
- [45] C. Mousty, Biosensing applications of clay-modified electrodes: A review, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 396, pp. 315-325, Nov. 2010.
- [46] O. Akbal, G. Bolat, S. Abacı, Clay-Protein Nanocomposite Based Electrochemical Sensor for the Determination of Ascorbic Acid, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt. 24, sayı. 1, pp. 80-89, Nisan 2020. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.562072>
- [47] P. Thoniyot, M. J. Tan, A. A. Karim, D. J. Young and X. J. Loh, Nanoparticle-Hydrogel Composites: Concept, Design, and Applications of These Promising, Multi-Functional Materials, *Advanced Science*, vol. 2, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1002/advs.201400010>
- [48] C. Muderrisoglu, M. Saveleva, A. Abalymov, L. Meeren, A. Ivanova, V. Atkin, B. Parakhonskiy and A. Skirtach, "Nanostructured Biointerfaces Based on Bioceramic Calcium Carbonate/Hydrogel Coatings on Titanium with an Active Enzyme for Stimulating Osteoblasts Growth, *Advanced Materials Interfaces*, vol. 5, Jan. 2018. <https://doi.org/10.1002/admi.201800452>
- [49] X. Sun, S. Agate, K. S. Salem, L. Lucia, and L. Pal, Hydrogel-Based Sensor Networks: Compositions, Properties, and Applications—A Review. *ACS Applied Bio Materials*, vol. 4, no. 1, pp. 140-162, Nov. 2020.
- [50] S. Utech, and A. R. Boccaccini, A review of hydrogel-based composites for biomedical applications: enhancement of hydrogel properties by addition of rigid inorganic fillers, *Journal of Materials Science*, vol. 51(1), pp. 271-310, Sep. 2016.
- [51] L. Lin, L. Shen, J. Zhang, Y. Xu, Z. Fang, P. Müller-Buschbaum, and Q. Zhong, Ionic Hydrogels Based Wearable Sensors to Monitor the Solar Radiation Dose for Vitamin D Production and Sunburn Prevention, *Applications Of Polymer, Composite, And Coating Materias*, vol. 13, no. 38, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13027>
- [52] A.S. Finny, C. Jiang, and S. Andreescu, 3D Printed Hydrogel-based Sensors for Quantifying UV Exposure, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 12, no. 39, Sep. 2020.
- [53] T. Anusha, K. S. Bhavani, J. V. S. Kumar, P. K. Brahman, Designing and fabrication of electrochemical nanosensor employing fullerene-C60 and bimetallic nanoparticles composite film for the detection of vitamin D3 in blood samples, *Diamond and Related Materials*, vol. 104, Apr. 2020.
- [54] T. Anusha, K. S. Bhavani, J. V. S. Kumar, P. K. Brahman, Synthesis and characterization of novel lanthanum nanoparticles-graphene quantum dots coupled with zeolitic imidazolate framework and its electrochemical sensing application towards vitamin D3 deficiency, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 611, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125854>
- [55] T. Anusha, K. S. Bhavani, J. V. S. Kumar, A. Bonanni, P. K. Brahman, Fabrication of handmade paper sensor based on silver-cobalt doped copolymer-ionic liquid composite for monitoring of vitamin D3 level in real samples, *Microchemical Journal*, vol. 161, Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105789>
- [56] T. Anusha, K. S. Bhavani, J. V. S. Kumar, A. Bonanni, P. K. Brahman, R. Y.A. Hassan, Fabrication of electrochemical immunosensor based on GCN-β-CD/Au nanocomposite for the monitoring of vitamin D


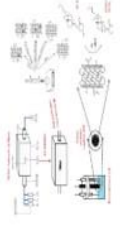
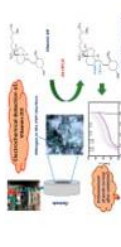
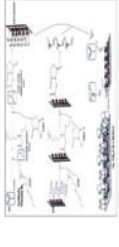


- deficiency, *Bioelectrochemistry*, vol. 143, Feb. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107935>
- [57] S. Wadhwa, A. T. John, S. Nagabooshanam, A. Mathur, J. Narang, Graphene quantum dot-gold hybrid nanoparticles integrated aptasensor for ultra-sensitive detection of vitamin D3 towards point-of-care application, *Applied Surface Science*, vol. 521, August 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146427>
- [58] A.D Durovic, Z. S. S. Stojanović, S. Ž. Kravić, T. Ž. Brezo-Borjan, J. J. Kos, Unmodified glassy carbon electrode as a reliable sensor for sensitive voltammetric quantification of vitamin D3, *Acta Periodica Technologica*, pp. 111-118, Jan. 2020.
- [59] A.Durovic, Z. Stojanovic, S. Kravic, J. Kos, L. Richtera, Electrochemical Determination of Vitamin D3 in Pharmaceutical Products by Using Boron Doped Diamond Electrode Electroanalysis, vol. 32, pp. 741-748, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1002/elan.201900532>
- [60] T. K. S. Fathima, S. Ramaprabhu, Evaluating the origin of the electrocatalytic activity of multiwalled carbon nanotubes towards Vitamin D3 oxidation *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 911, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116215>
- [61] H. Bora, D. Mandal, and A. Chandra, High-Performance, Nitrogen-Doped, Carbon-Nanotube-Based Electrochemical Sensor For Vitamin D3 Detection, vol. 5 (4), pp. 1721–1730, March 2022. <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00094>
- [62] T.C. Canevari, F. H. Cincotto, R. Landers, S. A.S. Machado, Synthesis and characterization of α -nickel (II) hydroxide particles on organic-inorganic matrix and its application in a sensitive electrochemical sensor for vitamin D determination, *Electrochimica Acta*, vol. 147, pp. 688-695, Nov. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.10.012>
- [63] T. Sarkar, T. K. Dhiman, R. K. Sajwan, S. Sri, P. R. Solanki, Studies on Carbon quantum dots embedded Iron Oxide Nanoparticles and their Electrochemical response, *Nanotechnology*, 31(35), 355502, Aug. 2020.
- [64] T.Sarkar, H. B. Bohidar, P. R. Solanki, Carbon dots-modified chitosan based electrochemical biosensing platform for detection of vitamin D, *International Journal of Biological*
- [65] H.Teymourian, M. Parrilla, J. R. Sempionatto, N. F. Montiel, A. Barfidokht, R. V. Echelpoel, K. Wael, and J. Wang, Wearable Electrochemical Sensors for the Monitoring and Screening of Drugs, vol. 5(9), *ACS Sensors*, pp. 2679-2700, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c01318>
- [66] J. R. Sempionatto, V. Montiel, Eva Vargas, H. Teymourian, and J. Wang, Wearable and Mobile Sensors for Personalized Nutrition, *ACS Sensors*, vol. 6(5), pp. 1745-1760, May. 2021 <https://doi.org/10.1021/acssensors.1c00553>
- [67] A.Kumari, V. Vyas, and S. Kumar, Advances in electrochemical and optical sensing techniques for vitamins detection: a Review, *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, pp. 329-34, Dec. 2022.

Tablo 1.a. D vitamini tespitine yönelik elektrokimyasal sensörlerin özeti (2019-2022)

Vitamin	Method	Doğrusal Aralık	LOD	Şematik	Ref
VD ₃	Elektrot: MIP/SPCE Teknik: SWV Elektrolit: NR pH: NR	1×10^{-11} M- 2×10^6 M	1×10^{-12} M		[26]
VD ₃	Elektrot: MIP/MWCNT/CPE Teknik: SWV Elektrolit: HClO ₄ in 70% methanol pH: 3	5×10^{-8} M- 7×10^6 M	3×10^{-8} M		[27]
VD ₃	Elektrot: BSA/Ab-VD ₃ /Asp-Gd ₂ O ₃ NRs/ITO Teknik: DPV Elektrolit: PBS pH: 7	10–100 ng mL ⁻¹	0.1 ng/mL		[28]
VD ₃	Elektrot: CuNPs-NINPs@reduced-fullerene-C60/GCE Teknik: SWV Elektrolit: LiClO ₄ in 60% ethanol	1.25–475 µM	0.0025 µM		[53]
VD ₃	Elektrot: Glassy Carbon Teknik: CV, EIS, SWV Elektrolit: 0.1 M LiClO ₄ pH: 7	0.00625 µM- 1.25 µM	0.00610 µM		[54]
VD ₃	Elektrot: Co-Ag/PANI-PPY/IL@GCE Kâğıt elektrot Teknik: SWV Elektrolit: 39.8 ml LiClO ₄ pH: 7	0.0125–22.5 µM 0.025–0.125 µM	0.0073 µM- 0.015 µM		[55]
VD ₃	Elektrot: BSA/Ab-25(OH)D ₃ /EDC-NHS/GCN-b-CD@Au/GCE Teknik: EIS, DPV	0.1–500 ng/ml	0.01–0.025 ng/mL		[56]

Tablo 1.b. D vitamini tespitine yönelik elektrokimyasal sensörlerin özeti (2018-2022)

Vitamin	Method	Doğrusal Aralık	LOD	Şematik	Ref
VD ₃	Elektrot: Au-µE/MU: MUA/EDC-NHS/GQD Au/Aptamer Elektrolit: PBS pH: 7	1 – 500 nM	0.70 nM		[57]
VD ₃	Elektrot: Unmodified glassy carbon Techniques: SWV Elektrolit: 0.05 mol/L solution of H ₂ SO ₄	1.25-105 µM	0.24- 0.73 µM		[58]
VD ₃	Elektrot: Boron-doped diamond electrode Teknik: SWV Elektrolit: in 0.02 mol dm ⁻³ %50 etanol içinde hazırlanan Britton-Robinson tamponu	2 -200 µM	0.17 µM		[59]
VD ₃	Elektrot: Acid treated-MWCNT/GCE Teknik: EIS, CV Elektrolit: PBS pH:7	20-350 µM	9.3 µM		[60]
VD ₃	Elektrot: NCNT/GCE Teknik: EIS, CV pH: 7	0-9 nM	16 pM		[61]
VD ₂	Elektrot: Fe ₃ O ₄ - CHIT/ITO Teknik: PV pH: 7	10-100 ngmL ⁻¹	2.46 ng. mL ⁻¹		[63]
VD ₂	Elektrot: BSA/AbVD ₂ /CD-CH/ITO Teknik: DPV Elektrolit: PBS	10-50 ng mL ⁻¹	1.35 ng mL ⁻¹		[64]





Havadan-havaya ısı geri kazanımında levhalı ısı değiştirici akış düzenlemesinin sayısal incelenmesi ve karşılaştırılması

Numerical investigation and comparison of plate heat exchanger flow arrangement in air-to-air heat recovery

Murat Ünverdi¹ , Hasan Küçük^{2,*} 

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 09010, Aydın, Türkiye

² Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

Öz

Isı geri kazanımlı (IGK) havalandırma sistemleri, kirli havayı dış ortama atarken, eşit debide taze havanın (dengelenmiş havalandırma) iç ortama sürekli beslenmesi amacıyla kullanılmaktadır. IGK havalandırma sistemleri, iç ortamın ısıl konfor koşullarından ödün vermeden, hava kalitesini iyileştirmektedir. Bu çalışmanın amacı, küçük bir konutun taze hava ihtiyacını karşılayacak havadan havaya zıt-yarı çapraz akışlı (ZYÇA) bir levhalı ısı değiştiriciyi (LID) sayısal tasarlamaktır. ZYÇA LID'nin ısıl ve hidrodinamik performansı; temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç, duyulur ısıl etkenlik, ortalama ısı akısı, özgül ısıl güç (ÖİG), özgül fan gücü (ÖFG) ve hidrodinamik-ısıl büyüme oranı (HIBO) için değerlendirilmiştir. ZYÇA LID'nin ısıl ve hidrodinamik performansı, yarı-çapraz akışlı (YÇA) ve çapraz akışlı (ÇA) LID'lerin ısıl ve hidrodinamik performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Küçük bir konutun taze hava ihtiyacı olan 125 m³/h debiye kadar, LID tasarımına zıt akış bölgesinin eklenmesi; geri kazanılan ısıl gücü ve basınç düşümünü çok fazla etkilemezken, ortalama ısı akısı ve ÖİG'ü olumsuz etkilemiştir. Ancak, zıt akış bölgesi LID'nin ısıl etkenliğini artırarak, ÖFG ve HIBO'nı iyileştirmiştir.

Anahtar kelimeler: Isı geri kazanımlı havalandırma, Levhalı ısı değiştirici, Akış düzenlemesi, Isıl ve hidrodinamik performans

1 Giriş

Kapalı ortamlarda, farklı kaynaklardan yayılan ve iç hava kalitesini bozan kirletici salınımları uzaklaştırıp azaltmada, mekanik havalandırma kullanılır. Merkezi havalandırma sistemleri (MHS), en yaygın kullanılan mekanik havalandırma yöntemidir. MHS'lerinde; tek bir merkezde şartlandırılan taze dış hava, uzun kanallarla, bağımsız kapalı ortamlara dağıtılır. İnsanlardan ve diğer kaynaklardan yayılan salınımlarla kirlenen kapalı ortamların havası ise egzoz kanalları ile havalandırma santralinde toplanıp, dış ortama atılır. MHS'lerinde; farklı bağımsız hacimlere gönderilen hava debilerinin, istenilen ısıl koşullar ve iç hava kalitesi korunarak, kontrolü (dengelenmesi) en önemli problemlerdendir. MHS'lerindeki diğer önemli bir problem,

Abstract

Heat recovery (HR) ventilation systems are used to constantly supply an equal flow rate of fresh air to the indoors (balanced ventilation) while exhausting the stale air. HR ventilation systems help improve air quality without compromising the thermal comfort of the indoors. This study aimed to numerically design an air-to-air quasi-counter flow (QCOF) plate heat exchanger (PHE) for the fresh air requirement of a small residence. The study evaluated the thermal and hydrodynamic performance of the QCOF-PHE for the recovered thermal power on the fresh side, sensible thermal effectiveness, average heat flux, specific thermal power (STP), specific fan power (SFP), and hydrodynamic-thermal amplification ratio (HTAR). The study compared the thermal and hydrodynamic performance of the QCOF-PHE with that of the quasi-cross flow (QCRF) and cross-flow (CF) PHEs. The addition of a counter flow area to the PHE design did not affect the recovered thermal power and pressure drop much but negatively affected the average heat flux and STP, up to 125 m³/h flow rate, which is the fresh air requirement of the residence. However, the counter flow area increased the thermal effectiveness of the PHE, improving the SFP and the HTAR.

Keywords: Heat recovery ventilation, Plate heat exchanger, Flow arrangement, Thermal and hydrodynamic performance

çok uzun gidiş ve dönüş kanallarındaki (sürtünme) basınç kayıplarından kaynaklı yüksek işletme (fanlarda tüketilen elektrik enerjisi) maliyetleridir. Ayrıca, herhangi bir kapalı ortamda oluşan kirleticilerin, diğer bağımsız hacimlere yayılması da, baypas havalı veya IGK çalıştırılan MHS'lerinin zayıf yönleri arasında sayılabilir [1].

MHS'lerinde karşılaşılan bu problemler nedeniyle, her bir hacmin bağımsız havalandırıldığı yerel havalandırma sistemleri (YHS), mekanik havalandırmada alternatif olabilir. YHS'lerinde, herhangi bir hacimden kaynaklı kirleticilerin diğer bağımsız hacimlere yayılması engellendiği gibi, uzun kanalların neden olduğu aşırı yüksek elektrik tüketimi de ortadan kalkar. Ayrıca YHS'leri ile her bir kapalı hacimde, iç hava kalitesinin ve ısıl koşulların

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kucuk@sakarya.edu.tr (H. Küçük)

Geliş / Received: 04.07.2022 Kabul / Accepted: 30.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1140364

bağımsız kontrolü de mümkündür. Üstelik YHS'lerinde, egzoz havasının taşıdığı duyulur ve gizli ısının geri kazanılması, MHS'lerine göre daha kolaydır. IGK-YHS ile ısıtma ve soğutma sezonlarında, filtrelenmiş, taze ve temiz dış havaya, ön ısıtma veya ön soğutma uygulanarak, ısıtma, soğutma ve elektrik enerjisi maliyetlerinin düşürülmesi mümkündür. Bu nedenle IGK-YHS'leri, konutlar başta olmak üzere, kullanımı en fazla yaygınlaşan mekanik havalandırma yöntemlerindedir [2, 3].

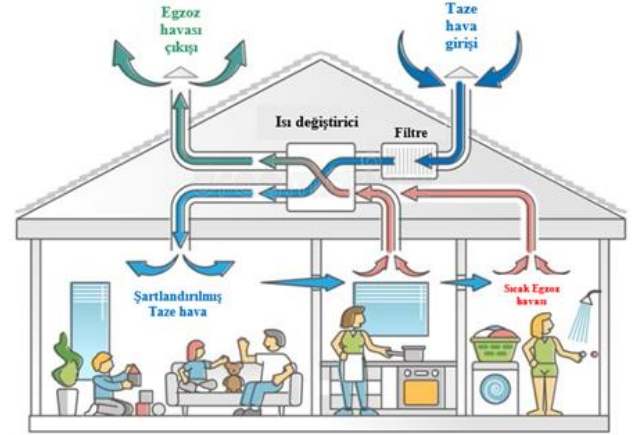
IGK mekanik havalandırma, yaklaşık 50 yıldır bilinmektedir. Ancak şehirlerde nüfusun artmasıyla, ısıtma sistemlerinden kaynaklı emisyonların yakın çevrede ve küresel ölçekli olumsuz etkileri önem kazanmıştır. Bu nedenle, baca gazı salınımlarına ve enerji tüketimine yasal kısıtlar getirilmiştir. Bunlara ek olarak, enerji maliyetlerindeki sürekli ve aşırı artış, dış kabuğu ısı yalıtımlı ve hava sızdırmaz binaları yaygınlaştırmıştır. Tüm bu gelişmelerle, IGK havalandırma sistemleri yeniden gündeme gelmiştir. Isı yalıtımsız bir binanın ısıtma ve soğutma amaçlı yıllık enerji tüketimi, IGK havalandırma ile yaklaşık %30 azaltılabilir. Isı yalıtımlı ve hava sızdırmaz dış cepheli binalarda ise IGK havalandırma ile ısıtma amaçlı enerji tüketiminin ve sera gazı salınımlarının daha yüksek (%80'e varan) oranlarda azaltılabileceği bildirilmiştir [4].

IGK-YHS genellikle; bir levhalı ısı değiştirici, taze hava ve egzoz havası kanalları ile fanlardan oluşur. Kapalı hacimde kirlenen iç ortam (egzoz) havası, iklim koşullarına ve mevsime göre; ya ısının çekileceği (geri kazanılacağı) kaynaktır ya da atık ısının verileceği (atılacağı) kaynak olur. IGK havalandırma ile, egzoz havasının ısı potansiyelinin yaklaşık %60-95'ini geri kazanmak ve konutların enerji verimliliğini artırmak mümkündür [5].

IGK-YHS, iç hava kalitesinin korunması için ihtiyaç duyulan şartlandırılmış taze dış havayı, kapalı ortamın sıcaklığını da koruyarak, sağlamak üzere tasarlanır. Başka bir ifadeyle, IGK havalandırmanın amacı, iç ortamda kirlenen hava ile dış ortamdan alınan taze hava arasında, duyulur ve gizli ısı (entalpi) alış-verişini sağlamaktır (Şekil 1) [6, 7]. Bu amaçla tasarlanan çok farklı IGK havalandırma sistemleri bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanları; ısı tekerli (rotary thermal wheel), levhalı ısı değiştiricili (plate heat exchanger) ve ısı borulu (heat pipe), sistemlerdir. Sayılan sistemlerin her birinin kendine has özellikleri, üstünlükleri ve zayıf yönleri vardır. Sistem seçimi, uygulamanın yapılacağı binanın özelliklerine, büyüklüğüne ve varsa diğer özel isteklere uygun yapılır. Tablo 1'de uygulamada yaygın kullanılan IGK havalandırma sistemlerinin özellikleri verilmiştir [7].

Binalar, şehir hayatının tüm dünyada yaygınlaşmasıyla, ilişkili diğer tüm alanlarda olduğu gibi enerji tüketiminde de büyük önem kazanmıştır. Binalarındaki (inşa, kullanım, bakım ve geri dönüşüm) enerji tüketimlerinin, küresel toplam enerji tüketimindeki payı yaklaşık %40'tır [8, 9]. Isıtma, havalandırma ve iklimlendirmenin (Heating Ventilating and Air Conditioning-HVAC), binaların enerji tüketimindeki payı da %40-60 mertebesinde [7, 10]. Bu başlık altında sadece havalandırmanın payı ise %20-30'ları bulmaktadır [11]. Binaların ısıtma ve soğutma amaçlı enerji tüketimi, bina kabuğunun ısı yalıtımı ve hava sızdırmazlığı

iyileştirilerek, azaltılabilir. Bu önlemler, binanın dış ortama ısı alış-verişini azalttığı gibi iç ortam ile dış ortam arasındaki kontrolsüz hava sızıntısını da azaltır. Başka bir ifadeyle, binada ısı konfor amaçlı enerji tüketimi azaltılırken, iç hava kalitesinin kısa sürede bozulması, mekanik havalandırma zorunlu hale getirir. Çünkü iç hava kalitesinin korunması, hem binayı kullanan insanların sağlığı ve performansları bakımından önemlidir, hem de binanın bakım ve onarım giderleri ile binanın kullanım ömrü üzerinde etkilidir [12, 13].



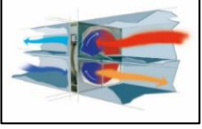
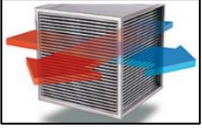
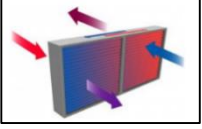
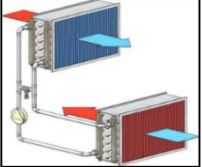
Şekil 1. Isı geri kazanımlı havalandırma sistemi örneği (şematik gösterim) [6]

IGK-YHS'lerinin önemi, 2019'da ortaya çıkıp hızla tüm dünyada yayılan ve Koronavirüs (COVID-19) pandemisi olarak bilinen şiddetli akut solunum sendromu ile daha da artmıştır. Hastalık, insanların nefes alıp verirken, konuşurken, öksürürken, hapşırırken havaya yaydıkları ve uzun süre havada asılı kalabilen damlacıkları (aerosol), diğer insanların solunmasıyla bulaşmaktadır. Hastalığın, özellikle toplu bulunan ve uzun zaman geçirilen kapalı ortamlarda daha fazla yayıldığı bilinmektedir. Kapalı ortamların havalandırılması, enfeksiyonun yayılmasını azaltmak için uygulanabilecek en önemli tedbirler arasındadır. Ancak, baypas havalı ya da kirli ve temiz havanın karışmasının engellenemediği ısı geri kazanım cihazlarının kullanıldığı MHS'leri, tam tersine, hastalığın yayılmasını artırıcı etki yapmaktadır. Bu nedenle, MHS'lerinin, %100 dış havayla ya da egzoz ve dış hava akımlarının karışmasına neden olan ısı geri kazanım cihazları iptal edilerek kullanılması önerilmiştir. Dolayısıyla COVID-19 pandemisi, egzoz havası ile temiz hava arasında karışmanın olmadığı (ya da en az düzeyde olacağı), IGK-YHS'lerinin önemini bir kez daha gündeme getirmiştir [14, 15].

Küçük bir konutun IGK havalandırma ve iklimlendirme sisteminde kullanılmak üzere tasarlanan, ZYÇA LID ile sayısal performansları karşılaştırılan YÇA ve ÇA LID'lere yakın kapasitelerdeki LID'lerin, ısı ve hidrodinamik performansının sayısal ve deneysel yöntemlerle incelendiği çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Zhang [16] ZYÇA (quasi-counter flow) LID'nin 3-boyutlu sayısal modelini oluşturarak, modelin geçerliliğini deneysel incelemiştir. ZYÇA LID'nin, zıt akış bölgesinin

Tablo 1. Yaygın kullanılan ısı geri kazanımlı havalandırma sistemlerinin özellikleri [7]

Isı geri kazanımlı havalandırma sistemi	Üstünlükler	Zayıflıklar	Performans değişkenleri	Verim (%)	Basınç düşümü (Pa)	Nem kontrolü
Isı tekeri (Rotary thermal wheel) 	-Yüksek verim, -Duyulur ve gizli ısı geri kazanımı, -Kompakt tasarım, -Donma kontrolü mümkün.	-Egzoz havası ve temiz hava karışır, -Bitişik hava akımları gerekir, -Mekanik tahrik için enerji gerekir.	-Dönme hızı, -Hava hızı, -Isı tekerinin gözenekliliği.	80+	4–45	Evet
Levhali ısı değiştirici (Plate heat exchanger) 	-Haraketli parça yok, -Yüksek ısı taşınım katsayısı, -Hava akımları karışmaz, -Duyulur ve gizli ısı kazanımı, -Donma kontrolü mümkün.	-Isı değiştiricide yüksek basınç kaybı, -İki ayrı hava akımı gerekir, -Yoğuşma riski, -Soğuk iklimlerde donma riski.	-Levha malzemesi, -İşletme basıncı, -Sıcaklık, -Akış düzenlemesi.	70–90	7-30	Evet
Isı borusu (Heat pipes) 	-Haraketli parça yok, -Hava akımları karışmaz, -Düşük basınç kaybı, -Kompakt tasarım, -Her iki yönde ısı geri kazanımı mümkün.	-Hava akımları yakın olmalı, -Isı taşıyan aracı akışkan, yerel iklim koşullarına uygun olmalı.	-Isı taşıyan aracı akışkan, -Temas süresi, -Konumlandırma, -Yapısal tasarım.	80	1–5	Hayır
İkincil akışkan döngüsü (Run-around) 	-Hava akımları ayrı olabilir, -Hava akımları karışmaz, -Düşük basınç kaybı, -Farklı kaynaklardan ısı geri kazanımı mümkün.	- İkincil akışkanı taşımak için birden fazla pompa gerekli, -Mevcut sistemlere uyumu zor, -Düşük verim, -Yüksek maliyet.	-Isı değiştirici türü, -İkincil akışkan türü, -Isı kaynağı.	50–80	~1	Hayır

uzunluğu ve genişliği 185x185 mm, kanal yüksekliği 4 mm, toplam kanal sayısı 114 ve tepe açısı 90°'dir. Egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8°C'dir. Araştırmacı, 40–200 m³/h debi aralığında; ZYÇA LID'nin duyulur ısıl etkenliğinin %84.7–%52.5 ve basınç düşümünün 1.5–6.5 Pa olduğunu elde etmiştir. Duyulur ısıl etkenliğin, eklenen yarı çapraz akış bölgesiyle, ÇA LID'e göre ortalama %5 iyileştiği belirtilmiştir.

Zhang vd. [17] 150 m³/h havalandırma debisi için farklı levha malzemeleriyle tasarladıkları, ÇA LID'lerin duyulur ısıl etkenliklerini deneysel incelemişler ve sonuçları sayısal model tahminleriyle karşılaştırmışlardır. ÇA LID'lerin; levha boyutları 185x185 mm, kanal yükseklikleri 2 mm, toplam kanal sayıları 230 ve tepe açısı 90°'dir. Egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark 8°C'dir. Araştırmacılar, LID'lerin deneysel duyulur ısıl etkenliklerinin, levha malzemesinden bağımsız olarak; 100–200 m³/h debi aralığında %80–%65, tasarım debisi olan 150 m³/h'de ise %75 olduğunu elde etmişlerdir. Ancak çalışmada basınç düşümü ile ilgili bir sonuç bildirilmemiştir.

AL-Waked vd. [18] 3-boyutlu sayısal LID modelleriyle; kanal yüksekliği (hidrolik çap), Reynolds sayısı ve akış düzenlemesinin (zıt, çapraz, yarı çapraz ve aynı yönlü) ısıl etkenliğe etkilerini, 100–200 m³/h debi aralığında, incelemişlerdir. ZYÇA LID'nin geometrik özellikleri ve

hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark, Zhang vd. [17]'nin incelediği LID ile aynıdır. Araştırmacılar, sayısal modellerinin geçerliliğini, Zhang vd. [17]'nin deneysel duyulur ısıl etkenlik sonuçlarıyla doğrulamışlardır. ÇA LID'de duyulur ısıl etkenliğin %77–%67 ve basınç düşümünün 200–450 Pa olduğu, debi arttıkça ısıl etkenliğin azaldığı ve kanal hidrolik çapı arttıkça aynı hacimsel debide akış hızının azalmasından dolayı basınç düşümünün de azaldığı belirtilmiştir.

Lee vd. [19], levha boyutları 319x319 mm, kanal yükseklikleri 2 mm ve 2.6 mm olan iki farklı ÇA LID prototipinin, ısıl etkenliğini deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, geliştirdikleri yarı-ampirik ısı geçişi modeli ile deneysel sonuçları doğrulamışlardır. Deneylerde hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark; yaz koşullarında 11°C iken, kış koşullarında 20°C'dir. Araştırmacılar 150, 250 ve 350 m³/h debiler için yaptıkları deneylerde; kanal yüksekliği 2 mm olan LID'nin, ısıl etkenliğinin ve basınç düşümünün %82–%72 ve 35–95 Pa, kanal yüksekliği 2.6 mm olan LID'nin ısıl etkenliğinin ve basınç düşümünün %78–%68 ve 25–60 Pa aralığında olduğunu elde etmişlerdir.

Nasif vd. [20], levha boyutları 720x300 mm ve kanal yüksekliği 6 mm olan, 98 kanallı, akışın levhalar arasına yerleştirilen akış bölücülerle Z şeklinde (sırasıyla; çapraz, paralel ve zıt yönlerde) düzenlendiği özel tasarım LID'nin

ısı performansını 0.3–3 m/s aralığında deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, 0.3–3 m/s aralığındaki duyulur ısıl etkenliğin %75–%40 ve 0.3–2 m/s aralığındaki basınç düşümünün ise 25–375 Pa olduğunu elde etmişlerdir.

Mardiana-Idayu ve Riffat [21] genişliği-uzunluğu 545x645 mm ve zıt akış bölgesi uzunluğu 245 mm olan ZYÇA LID'nin performansını deneysel incelemişlerdir. Kanal yüksekliğinin belirtilmediği 56 kanallı LID'de, 1–3 m/s hız aralığında duyulur ısıl etkenlik ve basınç düşümünün incelendiği deneylerde, egzoz ve taze hava giriş sıcaklıkları arasındaki fark $\sim 7^{\circ}\text{C}$ 'dir. Araştırmacılar, ısıl etkenliğin %65–%47 ve basınç düşümünün 8–30 Pa olduğunu bildirmişlerdir.

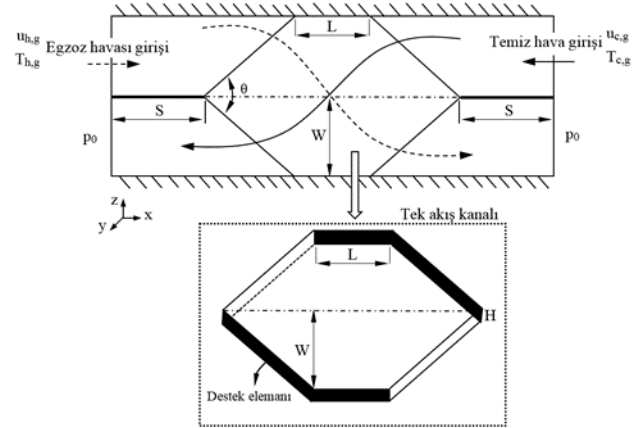
Bu çalışmada, üç-beş kişinin yaşadığı bir konutun, 50–200 m³/h aralığındaki taze hava ihtiyacını karşılayacak, IGK–YHS'lerinde kullanılmak üzere, havadan havaya, ZYÇA LID tasarlanmıştır. Tasarlanan LID'nin, ısı geçişi ve basınç düşümü performansı sayısal yöntemle incelenmiştir. LID'ye eklenen zıt akış bölgesiyle; ısı geri kazanım cihazından LID kanallarına ve LID kanallarından ısı geri kazanım cihazına geçişte, akıştaki yön değişimlerinin yumuşatılması, LID kanallarındaki ortalama akış hızları düşürülerek havanın LID'de kalma süresinin artırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla, LID'ye eklenen zıt akış bölgesinin, hem ısıl hem de hidrodinamik performansta hedeflenen iyileşmeye etkileri değerlendirilmiştir. ZYÇA LID'nin sayısal çözüm sonuçları, aynı amaca yönelik olarak ancak farklı akış düzenlemeleriyle tasarlanmış LID'lerin performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Performansı karşılaştırılan ısı değiştiriciler; bu çalışmada ele alınan ZYÇA (quasi-counter flow) LID'le, daha önce sayısal incelenen [22] YÇA (quasi-cross flow) ve ÇA (cross flow) LID'lerdir. LID'lerin performansları, 6 farklı ısıl ve hidrodinamik performans parametresi ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

2 Problemin tanımı, sayısal tasarım, analiz ve sınır şartları

ZYÇA LID'nin tasarımında, küçük kapasiteli IGK–YHS'leri için geçerli debi aralığı (50–200 m³/h) seçilmiştir. Performansı incelenen ZYÇA LID ve karşılaştırmada kullanılan diğer iki LID'nin; kanal yükseklikleri (H=2 mm), toplam kanal sayıları (N=100), levha genişlikleri (W=70.7 mm) ve levha kalınlıkları (t=0.2 mm) eşittir. Ayrıca tüm LID'lerde levha malzemesi kâğıt seçilmiştir. Performansı incelenen ZYÇA LID'nin, zıt akış bölümünün uzunluğu L=43 mm'dir. LID'nin giriş ve çıkışında akış kesitinin ani değişiminden kaynaklanacak yerel basınç kayıplarını da dikkate almak üzere, sayısal modelde, temiz hava ve egzoz havası girişindeki-çıkışındaki akış hacimleri uzatılmıştır (S=50 mm). Uzatılan bu giriş ve çıkıştaki akış hacimleri, adyabatik kabul edilmiştir. LID kanallarında laminar akış koşullarına uygun ortalama akış hızları seçilerek, havanın LID'de kalma süresinin artırılması, yüksek basınç kaybının ve aşırı gürültünün engellenmesi hedeflenmiştir. Adyabatik giriş bölgesinden LID kanallarına girişte ve LID kanallarından adyabatik çıkış bölgesine genişlemede, ani kesit değişimine bağlı oluşacak türbülans etkileri nedeniyle, sayısal çözümde, Standart k-ε türbülans

modeli seçilmiştir. Sayısal çözümlerde, ılıman iklim kış (ısıtma) koşullarına uygun olarak, temiz hava giriş sıcaklığı (283K) ve egzoz havası sıcaklığı (298K) arasındaki fark, 15K seçilmiştir. En uygun çapraz akışlı LID tasarımında, Taguchi yöntemi ve sayısal çözümlerin kullanıldığı çalışmada, levha malzemesinin ısıl performansa etkisinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirlenmiştir [23]. Bu nedenle tüm ısı değiştiricilerde, işlenmesi ve geri dönüşümü daha kolay olan kağıt (k=0.09 W/mK), levha malzemesi olarak seçilmiştir. Böylece LID'nin imalat, bakım ve çevresel etki maliyetleri en düşük seviyede olacaktır. Sayısal çözümlerde akış hızları, dengelenmiş havalandırmaya (temiz hava ve egzoz havasının hacimsel debileri eşit) uygun seçilmiştir.

3-boyutlu sayısal LID modeli; ısıl koşullar ve akış koşulları bakımından periyodik tekrarlanan akış bölgeleri ile sınırlandırılmıştır. Başka bir ifadeyle, LID'nin temiz hava ve egzoz havası kanallarının orta düzleminde simetrik akış sınır şartı kullanılarak, çözüm süreleri kısaltılmıştır. Havanın termodinamik özellikleri Kaynak [24]'den alınmıştır. Sayısal çözümlerden; temiz hava ve egzoz havasının LID'den çıkış sıcaklıkları ile temiz hava ve egzoz havası tarafında oluşacak basınç düşümleri elde edilmiştir. Sayısal çözümler, sürekli akış koşullarında (zamandan bağımsız) yapılmıştır. Çözüm bölgesine (uzatılmış giriş hacimlerine) giriş kesitlerindeki akış hızları, düzgün yayılı (üniform) ve yatay doğrultudadır.



Şekil 2. ZYÇA LID'nin şematik resmi, boyutları ve sınır şartları

Çıkış kesitlerinde (uzatılmış çıkış hacimlerinden), sabit çıkış basıncı sınır şartı (atmosfer basıncı) seçilmiştir. Akışkanların termo-fiziksel özellikleri, LID'ye giriş sıcaklıklarında sabit kabul edilmiştir. Sayısal çözümlerde; yerçekimi etkisi, dış kuvvetler, ışımla ısı geçişi ve nem geçişi ihmal edilmiştir. Tasarımı yapılan ZYÇA LID'nin şematik resmi, boyutları ve sayısal çözümlerde uygulanan sınır şartları Şekil 2'de verilmiştir. Sıkıştırılamaz kabul edilen hava akışı için Navier–Stokes ve türbülans modeli denklemleri, Ansys–Fluent sonlu hacimler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodları ile ayrıklaştırılmış ve çözülmüştür. Denklemlerin ayrıklaştırılmasında, ikinci mertebeden ileri farklar (Second Order Upwind) kullanılmıştır. Hız–basınç ikilisi arasındaki dönüşüm için

SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritması seçilmiştir. Sayısal çözüm bölgelerinin girişlerindeki türbülans yoğunlukları, %7'de sabit tutulmuştur. Sayısal çözümde yakınsama ölçütleri için geçerli (default) değerler (basınç: 0.3, momentum: 0.7, türbülans kinetik enerjisi: 0.8 ve türbülans yıkım oranı: 0.8 ve enerji: 1.0) kullanılmıştır. Tüm denklemler için sayısal yakınsama şartı 10^{-3} ve enerji denklemi için 10^{-6} 'dır. Sayısal çözümler, ortalama 250 iterasyonda tamamlanmıştır.

Bu çalışmadaki sayısal çözümler, daha önce ele alınan [22] YÇA ($\theta=60^\circ$) ve ÇA ($\theta=90^\circ$) LID'lerden farklı tepe açısı (θ) ile tasarlanan, ZYÇA ($\theta=70^\circ$) LID için yapılmıştır. Tasarımda, tepe açısı değiştirilerek LID'ye eklenen zıt akış bölgesiyle; ısı geri kazanım cihazından LID kanallarına ve LID kanallarından ısı geri kazanım cihazına geçişte (hava akımlarının) yön değişimlerinin yumuşatılması ve LID kanallarındaki ortalama akış hızları düşürülerek de havanın LID'de kalma süresinin artırılması hedeflenmiştir. Dolayısıyla, LID'ye eklenen zıt akış bölgesinin, hem ısı hem de hidrodinamik performansta hedeflenen iyileşmeye etkileri değerlendirilmiştir.

Sayısal çözüm için yapılan kabullere göre temiz hava ve egzoz havası tarafı için kütle ve enerjinin korunum denklemleri Denklem (1) ve (2)'de verilmiştir.

$$\dot{m}_{giren} = \dot{m}_{çıkan} \quad (1)$$

$$\dot{E}_{giren} = \dot{E}_{çıkan} \quad (2)$$

Sayısal çözümlerin sonuçları, 6 farklı performans parametresi ile değerlendirilmiştir. LID'lerin ısı ve hidrodinamik performansının değerlendirilmesinde kullanılan parametreler ve performans ölçütleri; (1) temiz tarafta geri kazanılan ısı güç- \dot{Q}_{gk} , (2) duyulur ısı etkenlik- ε , (3) ortalama ısı akısı- $q_{ort.}$, (4) özgül ısı güç- \dot{OIG} , (5) özgül fan gücü- $\dot{ÖFG}$ ve (6) hidrodinamik-ısı büyüme oranı-HIBO'dır. Geri kazanılan ısı güç:

$$\dot{Q}_{gk} = \dot{m}c_p(T_{c,\varphi} - T_{c,g}) \quad (3)$$

Burada; \dot{Q}_{gk} (W) ısı güç, \dot{m} (kg/s) kütleli debiye, c_p (kJ/kgK) sabit basınçtaki özgül ısıya, $T_{c,\varphi}$ ($^\circ\text{C}$) temiz hava çıkış sıcaklığına ve $T_{c,g}$ ($^\circ\text{C}$) temiz hava giriş sıcaklığına karşılık gelmektedir. Duyulur ısı etkenlik:

$$\varepsilon = \dot{Q}_{gk} / \dot{Q}_{mak.} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{mak.} = \dot{m}c_p(T_{h,g} - T_{c,g}) \quad (5)$$

Burada; $\dot{Q}_{mak.}$ (W) ulaşılabilir maksimum ısı güç ve $T_{h,g}$ ($^\circ\text{C}$) egzoz havası giriş sıcaklığına karşılık gelmektedir. Ortalama ısı akısı:

$$q_{ort.} = \dot{Q}_{gk} / A_{top.} \quad (6)$$

Burada; $q_{ort.}$ (W/m^2) ısı akısına ve $A_{top.}$ (m^2) LID'nin toplam alanına karşılık gelmektedir. Özgül ısı güç- \dot{OIG} :

$$\dot{OIG} = \dot{Q}_{gk} / V_{top.} \quad (7)$$

Burada; \dot{OIG} (W/m^3) özgül ısı güç ve $V_{top.}$ (m^3) LID'nin toplam hacmine karşılık gelmektedir. Fan gücü:

$$\dot{W}_{fan} = 2 \times \left(\frac{\dot{V}}{3600} \times \Delta p \right) \quad (8)$$

Özgül fan gücü- $\dot{ÖFG}$:

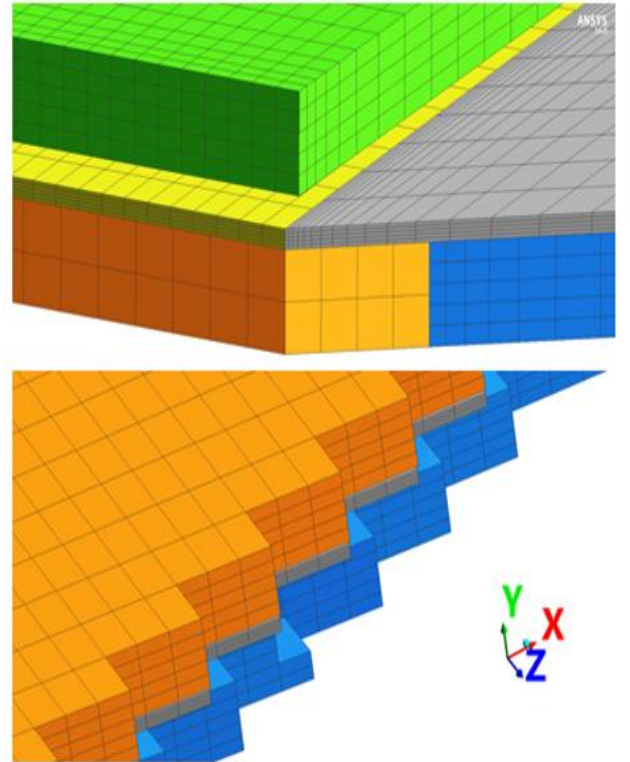
$$\dot{ÖFG} = \dot{W}_{fan} / \dot{V} \quad (9)$$

Burada; \dot{W}_{fan} (W) fanlardan hava akımlarına verilmesi gereken hidrodinamik güç, \dot{V} (m^3/h) hacimsel debiye, Δp (Pa) basınç düşümüne ve $\dot{ÖFG}$ ($\text{W}/\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) özgül fan gücüne karşılık gelmektedir. Hidrodinamik-ısı büyüme oranı (HIBO):

$$HIBO = \frac{\dot{Q}_{gk}}{\dot{W}_{fan}} \quad (10)$$

2.1 Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması

LID'nin 3-boyutlu sayısal modellerinde; temiz hava ve egzoz havası kanallarında, ısı geçiş levhasında ve destek elemanlarında yapısal ağ kullanılmıştır (Şekil 3). LID akış kanallarında; levha yüzeyine ve destek elemanlarına yakın akış bölgelerinde laminer alt tabakanın ($y^+ < 5$) çözümünde iyileştirilmiş duvar fonksiyonu (Enhanced Wall Treatment) kullanılmıştır.



Şekil 3. ZYÇA LID'nin ağ yapısı

9 farklı ağ yoğunluğundaki sayısal modellerle, ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ile hesaplanan egzoz ve temiz hava taraflarındaki sıcaklık farklarının ve basınç düşümlerinin neredeyse sabit kaldığı elde edilmiştir. Parametrik sayısal çözümler, temiz hava ve egzoz havası tarafında sıcaklık farkındaki ve basınç düşümündeki değişimlerin %1'den küçük olduğu, 2,155,926 eleman sayılı ağ yapısında yapılmıştır. Tablo 2’de ağ yapısı eleman sayıları, sıcaklık farkları ve basınç düşümleri verilmiştir.

Tablo 2. Ağ yapısı eleman sayısından bağımsızlık çalışması

Ağ yapısı eleman sayısı	Temiz hava tarafı		Egzoz havası tarafı	
	Sıcaklık farkı (K)	Basınç düşümü (Pa)	Sıcaklık farkı (K)	Basınç düşümü (Pa)
1,327,692	7.81	78.10	7.81	78.32
1,505,352	7.64	75.14	7.63	75.27
1,699,932	7.48	72.42	7.48	72.44
1,791,300	7.46	71.90	7.46	72.04
1,846,290	7.44	71.69	7.44	71.79
1,991,802	7.40	71.07	7.40	71.18
2,088,390	7.40	71.10	7.40	70.71
2,155,926	7.39	71.21	7.39	70.80
2,223,462	7.39	71.20	7.39	70.78

3 Sonuçlar ve tartışma

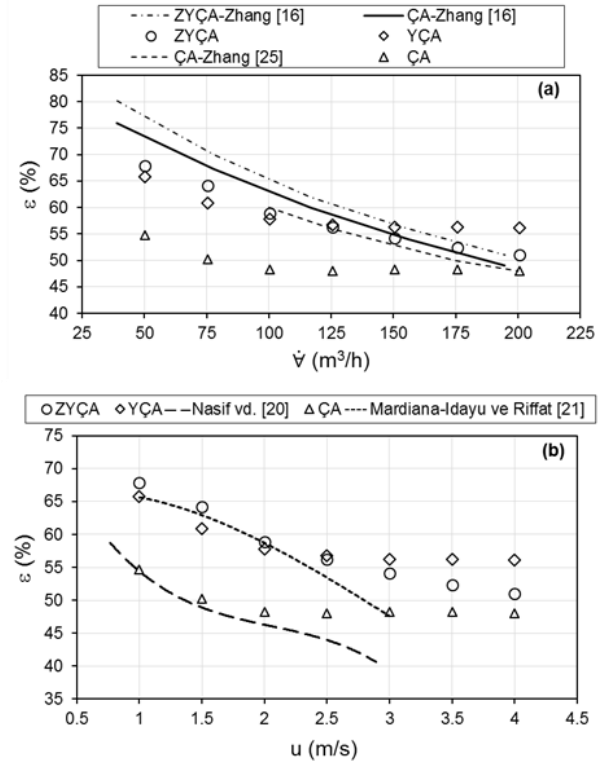
Havadan havaya LID’lerin kullanıldığı IGK–YHS’leri, kapalı mahaldeki kirlenmiş iç havayı süpürerek değiştiren temiz hava akımı oluşturarak, iç hava kalitesinin korunmasını sağlar. Aynı zamanda bu sistemler, kapalı hacimde ısı konforun sürdürülmesi amacıyla tüketilen ısı enerjisinin geri kazanılmasında (azaltılmasında) önemli rol oynar. %100 taze havayla beslenen IGK–YHS’leriyle, iç ortamdaki kirli hava emilerek dış ortama atılır. Dış ortamdan alınan temiz ve filtrelenmiş taze hava da kapalı ortama gönderilir. Bu sayede, mahal havasında bulunan kirletici salınımların ve istenmeyen zararlı asılı damlacıkların azaltılması sağlanır. Yani, kapalı ortamda kirlenmiş egzoz havası, temiz dış ortam havası ile karıştırılmadan, kapalı ortamdaki kirletici ve zararlı salınımların derişikliği azaltılır. Aynı zamanda LID ile yapılan ısı geri kazanımıyla, kapalı (sıcak/soğuk) ortamın sıcaklık kontrolü daha az enerji ile sağlanarak, ısı konfor şartları da korunabilir. Böylece, COVID–19 ve influenza gibi damlacıklar ve hava yoluyla bulaş riski oluşturabilecek hastalıkların yayılması, enerji maliyetlerini artırmadan engellenebilecektir.

Bu çalışmada, 50–200 m³/h aralığında havalandırma ihtiyacını karşılayacak, havadan havaya ZYÇA ($\theta=70^\circ$) LID’nin tasarımı yapılmış ve tasarlanan ısı değiştiricinin ısı geçişi ve basınç düşümü performansı HAD analizleri ile sayısal incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, 6 farklı ısı ve hidro dinamik performans parametresi (temiz tarafta geri kazanılan ısı güç, duyulur ısı etkenlik, ortalama ısı akısı, ÖİG, ÖFG ve HİBO) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca $\theta=60^\circ$ olan YÇA ve $\theta=90^\circ$ olan ÇA LID’ler için (daha önce sunulan) [22] elde edilen sayısal sonuçlar, $\theta=70^\circ$ derece olan ZYÇA LID’nin (bu çalışmada sunulan) sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde ve

çalışmanın devamında, daha kısa olması nedeniyle, sayısal çözümleri yapılan LID’lerin tanımlanmasında, ısı değiştiricilerin tepe açısını (θ) temsil eden 60° , 70° ve 90° sırasıyla; YÇA (Yarı Çapraz Akışlı), ZYÇA (Zıt-Yarı Çapraz Akışlı) ve ÇA (Çapraz Akışlı) olarak adlandırılacaktır.

3.1 Sayısal modellerin geçerliliği

Sunulan çalışmadaki sayısal LID modellerinin doğrulanmasında, duyulur ısı etkenlik kullanılmıştır. Çünkü ısı etkenlik; gerçek LID’de ideal koşullardaki sonuçlara ne kadar yaklaşılabildiğini göstermektedir. Yani, hedeflenen sonuca ulaşmadaki başarının bir ölçütüdür. Akış düzenlemesi, ısı değiştiricilerin ısı etkenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle; ZYÇA, YÇA ve ÇA LID’lerin sayısal modellerinin geçerliliği, literatürdeki Zhang [16, 25]’in deneysel ve sayısal, Nasif vd. [20]’nin deneysel ve Mardiana-Idayu ve Riffat [21]’in deneysel ısı etkenlikleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 4’de hem hacimsel debiye hem de kanallardaki ortalama akış hızına bağlı etkenlik sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Sayısal LID modellerinin etkenlik sonuçlarıyla, literatürde farklı geometrik boyutlarda ve farklı işletme koşullarında elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

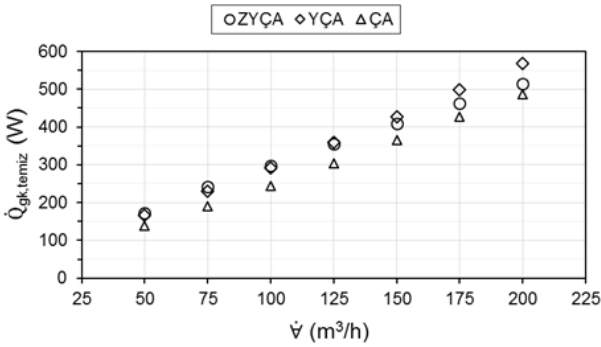


Şekil 4. Sayısal LID modellerinin etkenliklerinin (a) hacimsel debiye ve (b) ortalama akış hızına bağlı değişimleri ve literatürle karşılaştırılması

3.2 Sayısal çözüm sonuçları

Tepe açıları değiştirilerek elde edilen ZYÇA/YÇA/ÇA LID’lerdeki üç farklı akış düzenlemesi, 6 farklı ısı ve hidro dinamik performans ölçütüyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 5’de LID’lerin temiz hava tarafında geri kazanılan ısı gücünün hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerde temiz tarafta geri kazanılan ısı gücü artmıştır. ZYÇA LID’de, ÇA LID’ye göre ortalama ~%17 daha fazla ısı gücü geri kazanılmaktadır. ZYÇA ve YÇA LID’lerde, 150 m³/h debiye kadar, temiz tarafta geri kazanılan ısı güçleri hemen hemen eşittir. 150 m³/h debinin üzerinde ise, YÇA LID’de, ZYÇA LID’ye göre ortalama ~%7.5 daha fazla ısı gücü geri kazanılmıştır. Temiz tarafta geri kazanılan ısı gücü bakımından karşılaştırıldığında, YÇA ve ZYÇA LID’ler, ÇA LID’ye göre daha avantajlıdır.



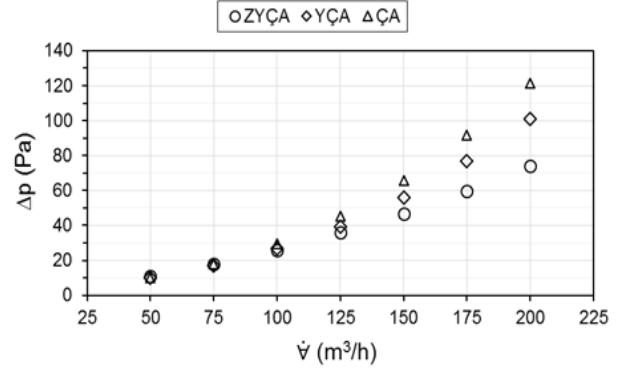
Şekil 5. Temiz tarafta geri kazanılan ısı gücünün hacimsel debiye bağlı değişimleri

Şekil 6’da LID’lerin temiz hava tarafındaki basınç düşümlerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerin temiz hava tarafındaki basınç düşümü de artmıştır. LID’lerin tamamında, 100 m³/h debiye kadar, çok yakın basınç düşümleri elde edilmiştir. Ancak 100 m³/h debinin üzerinde; ÇA ve YÇA LID’lerde, ZYÇA LID’ye göre sırasıyla ortalama ~%46 ve ~%24 daha yüksek basınç düşümleri elde edilmiştir. 100 m³/h üzerindeki hacimsel debilerde, basınç düşümü bakımından, ZYÇA LID’yi kullanmak daha avantajlı, ÇA LID’yi kullanmak dezavantajlıdır.

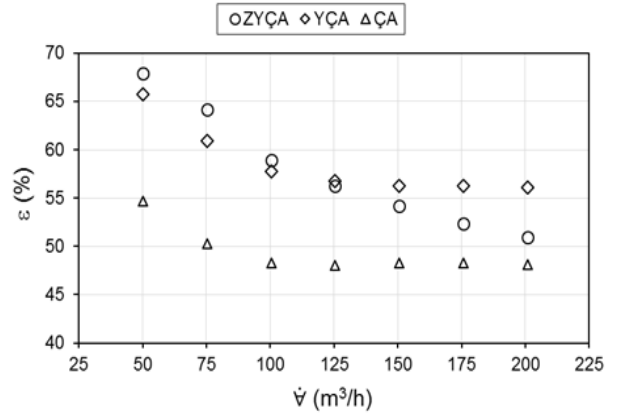
Hem geri kazanılan ısı gücü hem de basınç düşümü sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; tasarıma zıt akış bölgesinin eklendiği ZYÇA LID’de, 125 m³/h hacimsel debinin üzerinde geri kazanılan ısı güçteki artış devam ederken, basınç düşümü ÇA ve YÇA LID’lerdeki kadar artmamıştır. Yani, LID kanallarına eklenen zıt akış bölgesinin LID’nin ısı ve hidrodinamik performansına etkisi olumludur.

Şekil 7’de performansları incelenen LID’lerin, duyulur ısı etkenliklerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, ~125m³/h’e kadar tüm LID’lerde duyulur ısı etkenlikleri azalmıştır. YÇA ve ÇA LID’lerde ısı etkenlikleri, 125 m³/h’in üzerinde sırasıyla ~%56 ve ~%48’de sabitlenmiştir. ZYÇA LID’deki zıt akış bölgesi, özellikle 125 m³/h debinin altında, ısı etkenliği olumlu etkilemiştir. 50-100 m³/h debi aralığında, ZYÇA LID’de, YÇA LID’ye göre ortalama ~%3.5 ve ÇA LID’ye göre de ortalama ~%25 daha yüksek duyulur ısı etkenlikleri elde edilmiştir. 125 m³/h debide YÇA ve ZYÇA LID’lerin ısı etkenlikleri eşit ve ~%56’dır. 125 m³/h debinin üzerinde, YÇA

LID’nin ısı etkenliği, ZYÇA ve ÇA LID’lerin etkenliklerinden, sırasıyla ortalama ~%7 ve ~%16.5 daha yüksektir. LID’lerin tasarım koşulları (3–5 kişinin taze hava ihtiyacı ≤125 m³/h) dikkate alındığında; ZYÇA LID, duyulur ısı etkenlik bakımından, YÇA ve ÇA LID’lere göre daha avantajlıdır.



Şekil 6. Temiz taraftaki basınç düşümünün hacimsel debiye bağlı değişimleri

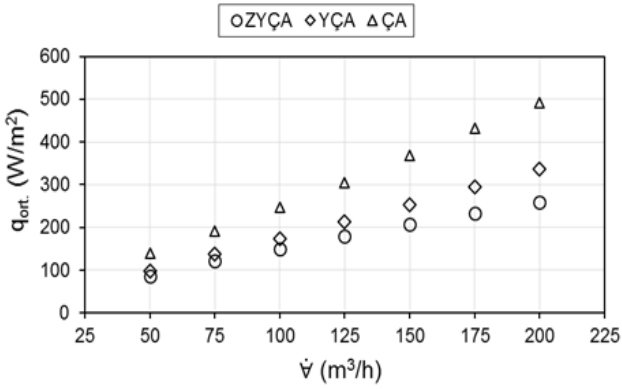


Şekil 7. Isıl etkenliğin hacimsel debiye bağlı değişimleri

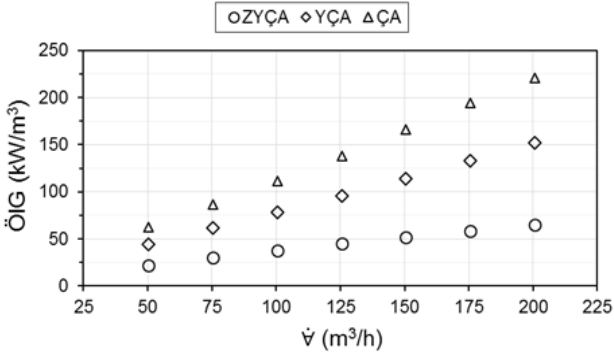
Şekil 8’de LID’lerdeki ortalama ısı akısının hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID’lerin ortalama ısı akısı artmıştır. ÇA LID’de en yüksek ortalama ısı akısı elde edilmiştir ve ortalama ısı akısındaki artış diğer LID’lere göre daha yüksektir. ÇA LID’nin ortalama ısı akısı, YÇA ve ZYÇA LID’lere göre sırasıyla ortalama ~%43 ve ortalama ~%72 daha fazladır. YÇA ve ZYÇA LID’lerin ortalama ısı akıları, 125m³/h debiye kadar birbirine yakın değerler almıştır. 125 m³/h üzerinde, YÇA LID’nin ortalama ısı akısı, ZYÇA LID’ye göre ortalama ~%26 daha yüksektir. Ortalama ısı akısı bakımından değerlendirildiğinde; ÇA LID, YÇA ve ZYÇA LID’lere göre daha avantajlıdır.

Şekil 9’da LID ÖİG’lerinin hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça, tüm LID’lerin ÖİG’ü artmıştır. Ortalama ısı akısı sonuçlarına benzer olarak, ÇA LID’de daha yüksek ÖİG elde edilirken, YÇA ve ZYÇA LID’lerin ÖİG’leri daha düşüktür. ÇA LID’nin ortalama ÖİG’ü YÇA ve ZYÇA LID’lere göre sırasıyla, ortalama ~1.5 kat ve ~3 kat daha yüksektir.

Ortalama ısı akısına benzer şekilde, ÖİG bakımından yapılan değerlendirmeye göre de, ÇA LID diğer LID'lerden daha avantajlıdır.



Şekil 8. Ortalama ısı akısının hacimsel debiye bağlı değişimleri



Şekil 9. ÖİG'nin hacimsel debiye bağlı değişimleri

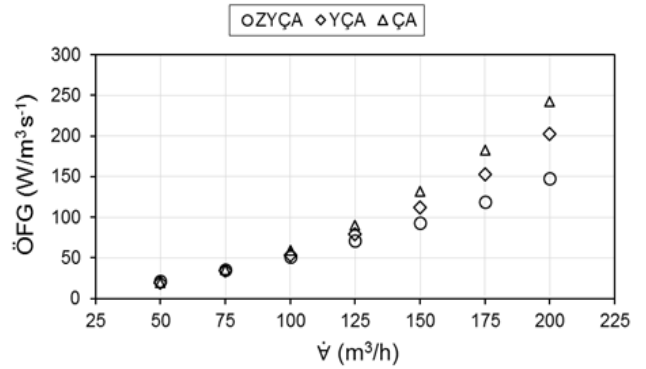
Şekil 10'da LID'lerde harcanan ÖFG'nün hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID'lerde akışın devamı için gerekli ÖFG'ü artmıştır. 125 m³/h debiye kadar LID'lerin tamamında ÖFG'leri arasında çok önemli bir fark görülmemektedir. Ancak ZYÇA LID'de, zıt akış bölgesinin etkisiyle, 125 m³/h debinin üzerinde ÖFG'ündeki artış, ÇA ve YÇA LID'lere göre daha düşüktür. 125–200 m³/h debi aralığında, ZYÇA LID'nin ÖFG'ü, YÇA ve ÇA LID'ye göre sırasıyla ~%23 ve ~%46 daha düşüktür. ÖFG'ü bakımından değerlendirildiğinde; LID'de zıt akış bölgesinin oluşturulduğu, ZYÇA LID tasarımı, YÇA ve ÇA LID tasarımlarına göre daha avantajlıdır.

Şekil 11'de LID'lerin HIBO'larının hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. Hacimsel debi arttıkça tüm LID'lerde HIBO azalmıştır. ZYÇA LID'nin HIBO, genel olarak diğer LID'lere göre daha yüksektir. ZYÇA LID'nin HIBO, YÇA ve ÇA LID'ye göre sırasıyla ortalama ~%10 ve ~%47 daha yüksektir. Zıt akış bölgesi LID'nin HIBO'nı olumlu etkilediğinden, ZYÇA LID tasarımı, YÇA ve ÇA LID tasarımlarına göre daha avantajlıdır.

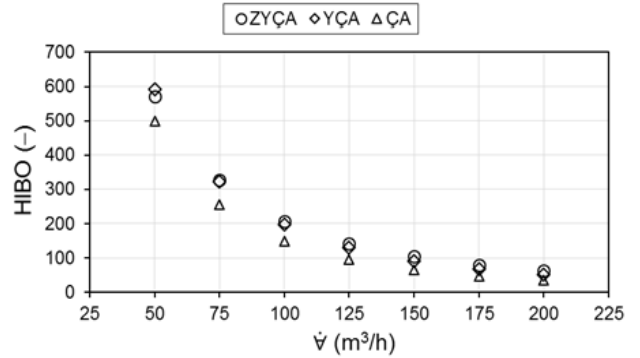
125 m³/h debide; HIBO'nına göre sadece LID'de oluşan basınç kayıpları dikkate alındığında, IGK yerel havalandırma ile akışın devamı için harcanan hidrodinamik

güç, ÇA, YÇA ve ZYÇA LID'lerde sırasıyla 96, 130 ve 140 kat ısıl gücün geri kazanılmasını sağlamaktadır.

Şekil 12'de 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin temiz hava tarafı simetri düzlemlerindeki (giriş ve çıkış kanalları dahil) hız dağılımları verilmiştir. ZYÇA LID'de, diğer LID tasarımlarına göre daha düzgün (üniform) hız dağılımı elde edilmiştir. LID'de zıt akış bölgesinin oluşturulmasıyla, LID akış kanalında ortalama akış hızının düştüğü ve akış boyunca akış en-kesitinde daha düzgün hız dağılımı sağlandığı, dolayısıyla da LID hidrodinamik performansının iyileştiği değerlendirilmektedir. Bu nedenle ZYÇA LID'de, 125m³/h debiye kadar, yaklaşık aynı basınç düşümünde (Şekil 6), diğer LID'lere göre temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç (Şekil 5) daha fazladır. Bu da yaklaşık aynı ÖFG'ünde (Şekil 10), ZYÇA LID'nin duyulur ısıl etkinliğini (Şekil 7) ve HIBO'nı (Şekil 11) diğer LID'lere göre yükseltmiştir.



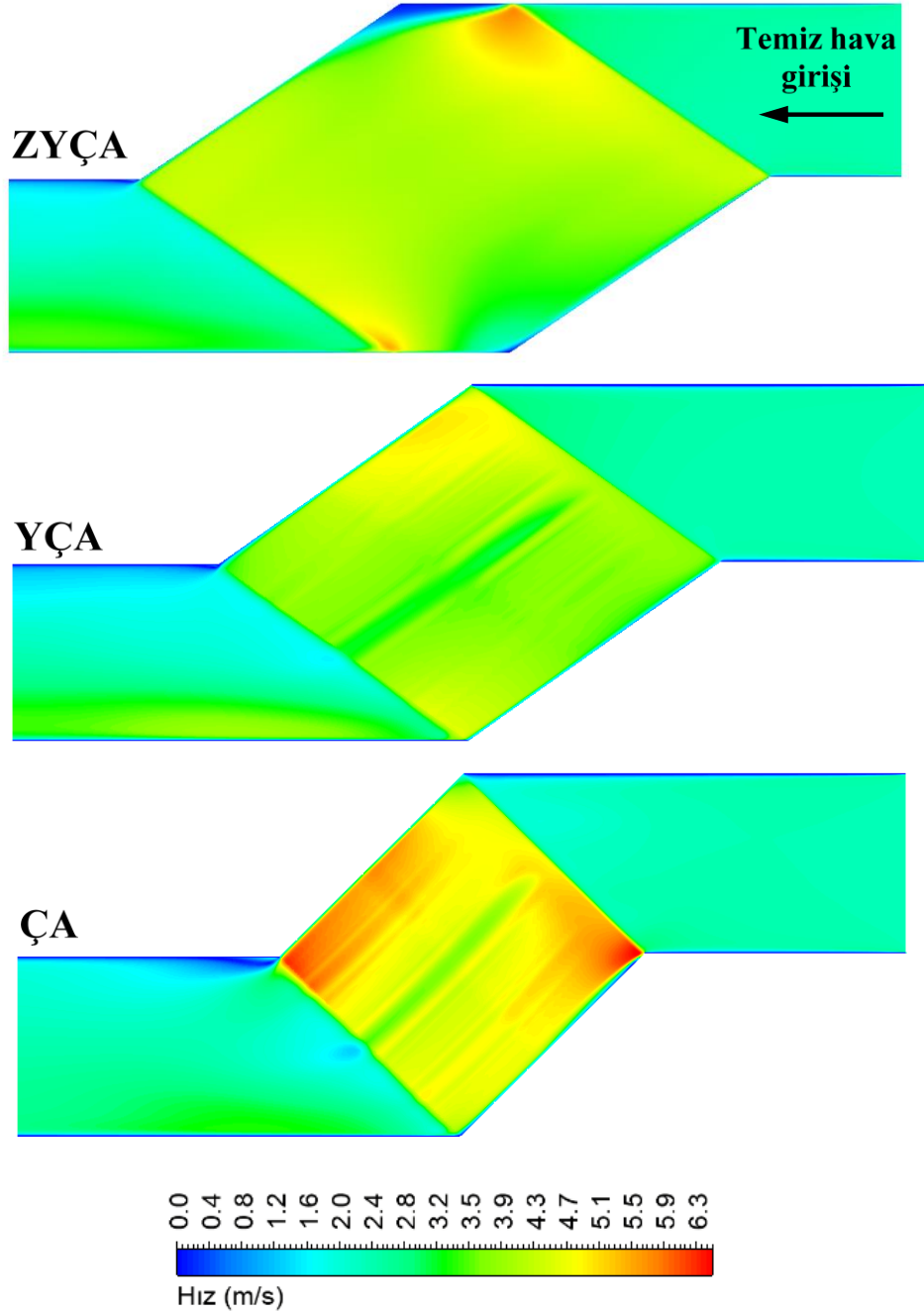
Şekil 10. ÖFG'nün hacimsel debiye bağlı değişimleri



Şekil 11. HIBO'nun hacimsel debiye bağlı değişimleri

125m³/h'in üzerinde YÇA LID'de temiz tarafta geri kazanılan ısıl güç, ZYÇA LID'ye göre biraz daha yüksektir (Şekil 5). Ancak hidrodinamik performansının üstünlüğü nedeniyle, ZYÇA LID'nin ÖFG'ü artışı (Şekil 10), diğer LID'lere göre daha düşük olduğundan, ZYÇA LID, 125m³/h'in üzerinde de HIBO bakımından avantajlıdır (Şekil 11).

Şekil 13'de 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin levhalarındaki sıcaklık dağılımları, levha düzlemindeki egzoz ve temiz hava tarafı giriş ve çıkış kanalları ile birlikte verilmiştir.



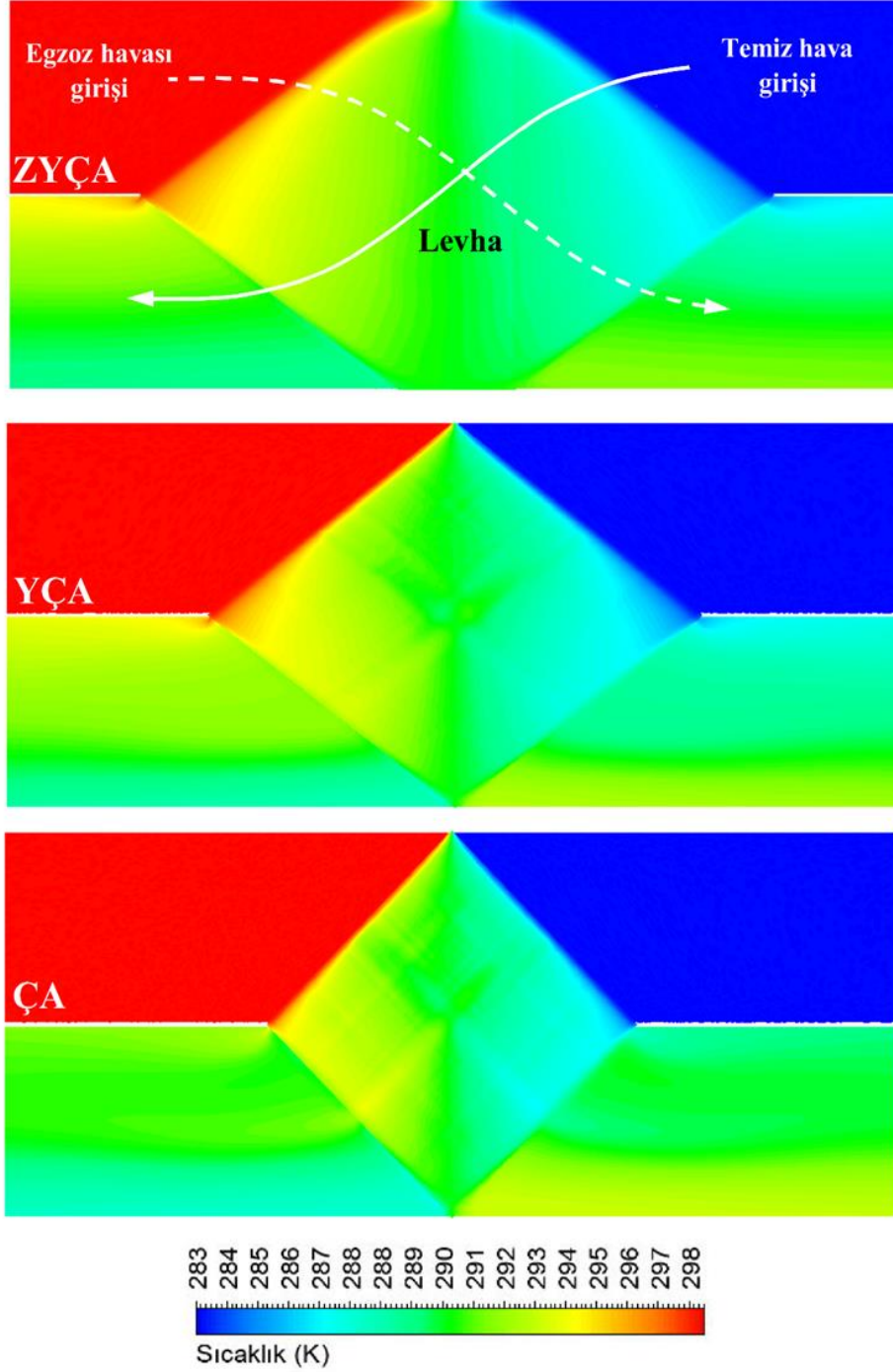
Şekil 12. 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin temiz hava tarafı simetri düzlemindeki hız dağılımları

Şekil 13'de görüldüğü gibi ZYÇA LID'nin levha yüzeyinde, akış doğrultusunda konuma bağlı sıcak farkları (değişimleri), daha azdır. Başka bir deyişle; ZYÇA LID'nin levha yüzeyinde sıcaklık daha düzgün dağılırken, diğer ısı değiştiricilerde levha yüzeyinde sıcaklık dağılımı daha düzensizdir. Ayrıca temiz hava ve egzoz havası çıkış kanallarındaki sıcaklık dağılımlarının da ZYÇA LID'de, diğer LID'lere göre daha üniform olduğu görülmektedir.

Şekil 12'de verilen simetri düzlemindeki hız dağılımı sonuçlarında olduğu gibi, levha yüzeyindeki ve çıkış kanallarındaki sıcaklık dağılımları da, ZYÇA LID'nin ısı ve

hidrodinamik performans bakımından daha avantajlı olduğunu gösteren sonuçları desteklemektedir.

Şekil 14'de ZYÇA, YÇA ve ÇA LID'lerin 125 m³/h debide, temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde, levha yüzeyinde girişten-çıkışa yerel ısı taşınım katsayılarının ve yerel hız profillerinin konuma (L/D_h) bağlı değişimleri verilmiştir. Bu değişimler, temiz taraf akış kanalında hız dağılımı bakımından benzer karakteristikleri gösteren bölgeler dikkate alınarak, akış doğrultusunda seçilen akış kesiti boyunca verilmiştir.

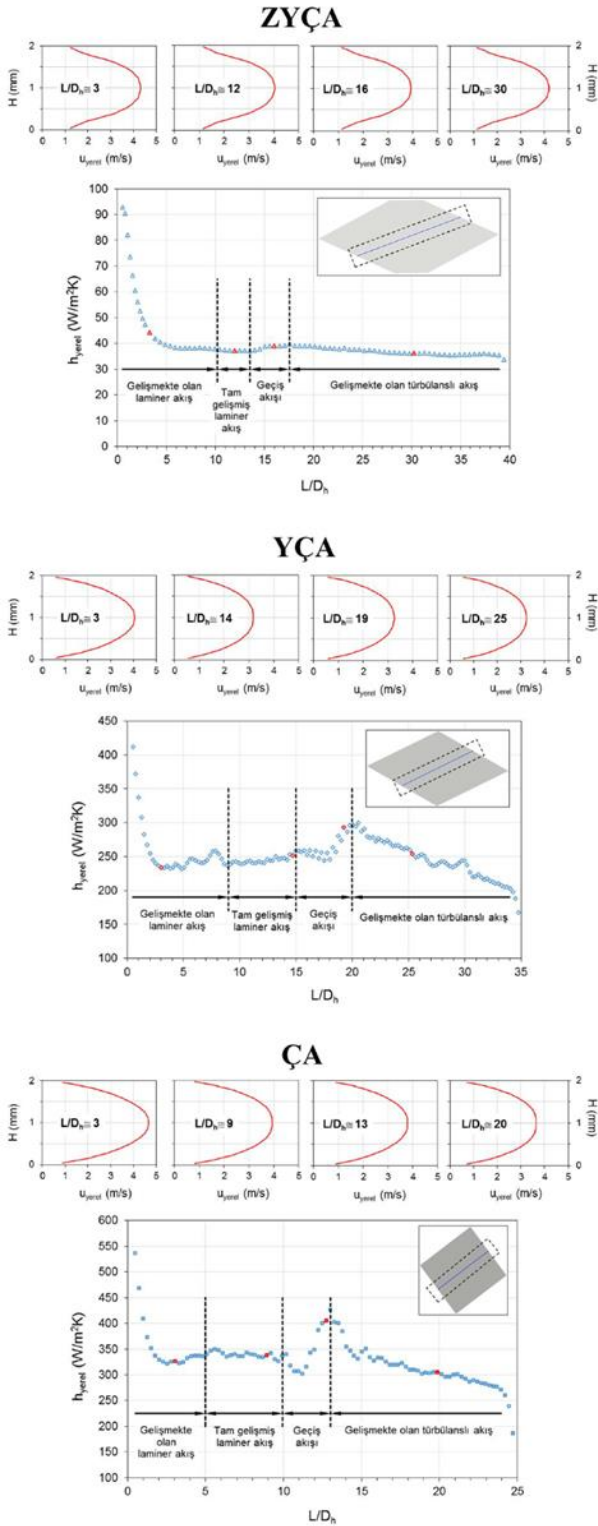


Şekil 13. 125 m³/h hacimsel debide, LID'lerin levhalarında ve egzoz–temiz hava tarafı giriş–çıkış kanallarında sıcaklık dağılımları

Şekil 14'e göre ZYÇA, YÇA ve ÇA ısı değiştiricilerde, akış doğrultusunda dört farklı akış bölgesi bulunmaktadır. Birinci bölgede; giriş ve gelişmekte olan laminer akış etkileri, ikinci bölgede; tam gelişmiş laminer akış, üçüncü bölgede; geçiş akışı ve dördüncü bölgede; gelişmekte olan türbülanslı akış ve çıkış etkileri görülmektedir. Şekil 14'de akış doğrultusundaki hız profillerinin alındığı boyuna akış en-kesitleri sağ üst köşede ve bu kesitlerde yerel hız

profillerinin alındığı akış en-kesitlerinin konumları da, grafiklerdeki kırmızı sembollerle gösterilmiştir.

125 m³/h debide; farklı L/D_h için YÇA ve ÇA LID'lerin hız profilleri, ZYÇA ısı değiştiriciyle karşılaştırıldığında daha paraboliktir. Diğer bir deyişle, ZYÇA ısı değiştiricide akışa dik doğrultuda hızdaki değişim daha az olduğundan, sınır tabaka daha kalındır. Bu nedenle, YÇA ve ÇA LID'lerde daha yüksek yerel ısı taşınım katsayıları elde edilmiştir.



Şekil 14. 125 m³/h debide temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde yerel ısı taşınım katsayıları ve yerel hız profillerinin akış doğrultusunda seçilen akış kesiti boyunca değişimleri

Sayısal çözüm sonuçları, aynı zamanda tasarım koşulları olan 3–5 kişinin yaşadığı bir konuttaki taze hava ihtiyacı (kişi başına 20–25 m³/h) dikkate alınarak, 125 m³/h debi için **Tablo 3**'de özetlenmiştir.

Tablo 3. 125 m³/h debide, LID performans sonuçlarının karşılaştırılması

Performans değişkenleri	LID tasarımı-(θ°)		
	ZYÇA-(70°)	YÇA-(60°)	ÇA-(90°)
Q _{gk,temiz} (W)	356	359[♣] (+%1)	303 (-%14.9)
ε (%)	56.2	56.7[♣] (+%1)	48 (-%14.6)
Δp (Pa)	35.9[♣]	39.4 (+%9.7)	45.4 (+%26.5)
q _{ort} (W/m ²)	180	213 (+%18.3)	306[♣] (+%70)
ÖİG (kW/m ³)	44.74	95.93 (+%114.4)	137.73[♣] (+%207.8)
ÖFG (W/(m ³ s ⁻¹))	71.9[♣]	78.9 (+%9.7)	90.7 (+%26.1)
HİBO (-)	142[♣]	130 (-%9.7)	96 (-%32.4)
h _{ort} (W/m ² K)	130	153 (+%17.7)	230[♣] (+%76.9)

Notlar:

- Parantez içerisindeki sonuçlar, ZYÇA LID ile karşılaştırılarak elde edilmiştir.
- LIDler için en yüksek performans sonuçları [♣] ile gösterilmiştir.

4 Değerlendirme

Bu çalışmada, küçük kapasiteli (50–200 m³/h) IGK–YHS'lerinde kullanılmak üzere ZYÇA LID tasarlanmıştır. Tasarlanan ısı değiştiricinin sayısal çözümleri Fluent ile yapılmıştır. ZYÇA LID'nin sayısal çözümlerle elde edilen performans sonuçları (temiz hava tarafında geri kazanılan ısı güç, ısı etkenlik, basınç düşümü, ortalama ısı akısı, ÖİG, ÖFG, HİBO), daha önceki çalışmalarımızda sunulan YÇA ve ÇA LID performans sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, 3–5 kişinin taze hava ihtiyacı olan 125 m³/h debide; temiz hava tarafı simetri düzlemindeki hız dağılımları, LID levhalarında ve egzoz–temiz hava tarafı giriş–çıkış kanallarında sıcaklık dağılımları, temiz taraf akış kanalı simetri düzleminde yerel ısı taşınım katsayıları ve yerel hız profillerinin akış doğrultusundaki değişimleri karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

–Geri kazanılan ısı güç ve basınç düşümü sonuçları bakımından tasarıma zıt akış bölgesinin eklenmesi (ZYÇA) 125 m³/h'e kadar LID performansını çok fazla etkilememiştir. Ancak, 125 m³/h'in üzerinde ZYÇA LID'nin basınç düşümü ÇA ve YÇA LID'lerdeki kadar artmamıştır. Diğer bir deyişle, zıt akış bölgesinin LID'nin ısı ve hidro dinamik performansına etkisi olumludur.

–Hacimsel debi arttıkça, 125m³/h'e kadar tüm LID'lerin ısı etkenliği azalmıştır. 50–100 m³/h aralığında, ZYÇA ve YÇA LID'lerin ısı etkenliği, ÇA LID'ye göre yaklaşık %20–25 daha yüksektir. Zıt akış bölgesi, 125 m³/h'in altında, ısı etkenliği artırmıştır. ÇA LID'ye zıt akış bölgesinin eklenmesi ısı etkenliği ortalama ~%17 iyileştirmiştir.

–Ortalama ısı akısı ve ÖİG bakımından; ÇA LID, ZYÇA ve YÇA LID'ye göre daha avantajlıdır. Zıt akış bölgesi nedeniyle, artan toplam ısı geçiş alanı ve toplam hacim, LID performansını olumsuz etkilemiştir.

–ÖFG ve HİBO bakımından; zıt akış bölgesi LID performansını olumlu etkilemiştir. 125 m³/h debide, ÇA, YÇA ve ZYÇA LID'lerde akışın sürdürülebilmesi için gerekli hidro dinamik gücün, sırasıyla 96, 130 ve 140 katı ısı güç temiz hava tarafında geri kazanılmıştır.

Zıt akış bölgesi, LID'nin toplam ısı geçiş alanını artırır. Bu tasarım değişikliği, ısı değiştirici üretim maliyetlerinde

artışa neden olacaktır. Ancak, üretim ve işletme maliyetleri birlikte değerlendirildiğinde; işletme (elektrik enerjisi) maliyetlerindeki azalma ile üretim maliyetindeki artış kısa zaman içerisinde geri ödenecektir. IGK merkezi ve yerel havalandırma sistemlerinin karşılaştırılmasında; LID sürtünme basınç kayıplarına, cihaz ve kanallardaki diğer basınç kayıpları da eklenip, kullanılan birincil enerji kaynaklarının tamamı hesaba katılarak, daha gerçekçi bir değerlendirme yapılabilir.

Semboller ve indisler

A	–alan (m ²)
Ė	–enerji (kJ/s)
ε	–ısıl etkenlik (%)
c _p	–özgül ısı (kJ/kgK)
h	–ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
H	–kanal yüksekliği (mm)
θ	–tepe açısı (°)
k	–ısı iletim katsayısı (W/mK)
L	–zıt akış bölgesi uzunluğu (mm)
L/D _h	–hidrolik çapa bağlı konum (–)
ṁ	–kütlesel debi (kg/s)
N	–toplam kanal sayısı (adet)
p ₀	–atmosfer basıncı (Pa)
Δp	–basınç düşümü (Pa)
q	–ısı akısı (W/m ²)
Q̇	–geri kazanılan ısı gücü (W)
S	–giriş-çıkış akış hacmi uzunluğu (mm)
T	–sıcaklık (K)
t	–levha kalınlığı (mm)
u	–hız (m/s)
V	–hacim (m ³)
Ṡ	–hacimsel debi (m ³ /h)
W	–levha genişliği (mm)
Ẇ _{fan}	–fan gücü (W)

Alt indisler

c,ç	–soğuk çıkış
c,g	–soğuk giriş
gk	–geri kazanılan
h,g	–sıcak giriş
mak.	–maksimum
ort.	–ortalama
top.	–toplam

Kısaltmalar

ÇA	–çapraz akışlı
HIBO	–hidrodinamik-ısıl büyüme oranı
IGK	–ısı geri kazanımlı
LID	–levhalı ısı değiştirici
MHS	–merkezi havalandırma sistemi
ÖFG	–özgül fan gücü
ÖIG	–özgül ısıl güç
YÇA	–yarı çapraz akışlı
YHS	–yerel havalandırma sistemi
ZYÇA	–zıt-yarı çapraz akışlı

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 1

Kaynaklar

- [1] H. Goodfellow and Y. Wang, Industrial ventilation design guidebook Volume 1: Fundamentals. Elsevier, United Kingdom, 2020.
- [2] Z. Lu, Z. Xie, Q. Lu and Z. Zhao, An encyclopedia of architecture & civil engineering of China. China Architecture & Building Press, Beijing, 2000.
- [3] H. Goodfellow and Y. Wang, Industrial ventilation design guidebook Volume 2: Engineering Design and Applications. Elsevier, United Kingdom, 2021.
- [4] E. Zender-S'wiercz, A review of heat recovery in ventilation. *Energies*, 14, 1759, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061759>.
- [5] A. Mardiana-Idayu and S.B. Riffat, Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2), 1241–1255, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.026>.
- [6] Heat Recovery Ventilation. <https://www.zephyrventilation.net.au/heat-recovery-ventilation/>, Accessed 1 May 2022.
- [7] D. O'Connor, J.K.S. Calautit and B.R. Hughes, A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1481-1493, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.039>.
- [8] B.D. Ghida, Heat recovery ventilation for energy-efficient buildings: Design, Operation and Maintenance. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), 3713–3715, 2019. [doi:10.35940/ijitee.A4795.119119](https://doi.org/10.35940/ijitee.A4795.119119).
- [9] A. Meiss, M.Á. Padilla-Marcos, I. Poza-Casado and A.A. Álvaro-Tordesillas, Graphical Tool to Estimate the Air Change Efficiency in Rooms with Heat Recovery Systems. *Sustainability*, 12(3), 1031, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12031031>.
- [10] V. Misevičiūtė, V. Motuzienė and K. Valančius, The application of the Pinch method for the analysis of the heat exchangers network in a ventilation system of a building. *Applied Thermal Engineering*, 129, 772–781, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.051>.
- [11] O. Hänninen, National Institute for Health and Welfare (THL), Health Vent Health-Based Ventilation Guidelines for Europe Project; Deliverable 8: Report on the impact of guideline implementation on health and energy. National Institute for Health and Welfare, Kuopio, Finland, December 2012.
- [12] D. Mumovic, J. Palmer, M. Davies, M. Orme, I. Ridley, T. Oreszczyn, C. Judd, R. Critchlow, H.A. Medina, G. Pilmoor and et al., Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England. *Building and Environment*, 44 (7), 466–1477, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.014>.

- [13] A. Mikola, T. Kalamees and T.-A. Kõiv, Performance of ventilation in Estonian apartment buildings. *Energy Procedia*, 132, 963–968, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.681>.
- [14] T.C. Aile, Çalışma ve Sosyal Hizmetler Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü ve Türkiye Kimya, Petrol, Lastik ve Plastik Sanayii İşverenleri Sendikası (KİPLAS). COVID-19 döneminde havalandırma ve klima sistemleri rehberi, 2021. <https://www.csgeb.gov.tr/media/68337/kiplas-covid-19-doneminde-havalandirma-ve-klima-sistemleri-rehberi-26022021.pdf>, Accessed 10 May 2022.
- [15] DSÖ'nün Covid-19 ortam havalandırması yol haritası. <https://yetkinreport.com/2021/04/19/dsonun-covid-19-ortam-havalandirmasi-yol-haritasi/>, Accessed 11 May 2022.
- [16] L-Z. Zhang, Heat and mass transfer in a quasi-counter flow membrane-based total heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 23–24, 5478-5486, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.009>.
- [17] L-Z. Zhang, C.-H. Liang, L-X. Pei, Heat and moisture transfer in application scale parallel-plates enthalpy exchangers with novel membrane materials. *Journal of Membrane Science*, 325(2): 672–682, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.08.041>.
- [18] R. Al-Waked, M. S. Nasif, G.Morrison, M. Behnia, CFD simulation of air to air enthalpy heat exchanger: Variable membrane moisture resistance. *Applied Thermal Engineering*, 84, 301–309, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.067>.
- [19] E-J. Lee, J. P. Lee, H.M. Sim, N.H. Kim, Modeling and verification of heat and moisture transfer in an enthalpy exchanger made of paper membrane. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 20(3): 1250015, 2012. <https://doi.org/10.1142/S2010132512500150>.
- [20] M. Nasif, , R. Al-Waked, G.Morrison, M. Behnia, Membrane heat exchanger in HVAC energy recovery systems, systems energy analysis. *Energy and Buildings*, 42(10): 1833–1840, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.020>.
- [21] A. Mardiana-Idayu, S. B. Riffat, An experimental study on the performance of enthalpy recovery system for building applications. *Energy and Buildings*, 43(9): 2533–2538, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.009>.
- [22] M. Ünverdi and H. Kucuk, Comparison of hydraulic and thermal performance of small capacity air to air cross and semi-cross flow plate heat exchangers using CFD analysis. 18th International Conference on Latest Trends in Engineering and Technology, pp. 50–57, İstanbul, Türkiye, 2018 March 21-23.
- [23] M. Ünverdi and H. Küçük, Taguchi yöntemi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak tasarlanan levhalı ısı değiştiricilerin performanslarının karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 373–386, 2019. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.35493>.
- [24] Y. Çengel, *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*. McGraw-Hill, USA, 2007.
- [25] L-Z. Zhang, Progress on heat and moisture recovery with membranes: From fundamentals to engineering applications. *Energy Conversion and Management*, 63, 173–195, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.033>.





Dizel yakıtı-bitkisel yağ-dietilen glikol dimetil eter karışım yakıtlarının bir dizel motorun performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi

An investigation of effects of diesel fuel-vegetable oil-diethylene glycol dimethyl ether fuel blends on performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine

Mert Gülüm^{1,*} 

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

Öz

Dizel yakıtı-bitkisel yağ-dietilen glikol dimetil eter karışım yakıtlarının tek silindirli bir dizel motorda tam gaz ve farklı devirlerde (1000-2200 devir/dakika) kullanılmasının performans, yanma ve emisyonlara etkileri incelenmiştir. Maksimum silindir sıcaklığı değerleri ile maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerleri interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Silindir sıcaklığının devir sayısı ve krank mili açısına göre değişimi için en küçük kareler regresyonu yardımıyla 3-boyutlu bir denklem elde edilmiştir. Dizel yakıtı kullanımına göre, karışım yakıtları kullanıldığında ortalama olarak tutuşma gecikmesi, maksimum silindir sıcaklığı, egzoz gazı sıcaklığı ve emisyonlar azalmış, fakat özgül yakıt tüketimi artmıştır. Hacimsel olarak %4 oranında dietilen glikol dimetil eter içeren karışım için efektif verim (%1.49), efektif güç (%2.56), maksimum silindir basıncı (%2.04) ve maksimum ısı yayılımı oranı (%7.68) artmıştır. Elde edilen 3-boyutlu denklem yardımıyla yakıt karışımları için hesaplanan silindir sıcaklığı değerlerinin hata oranları %5'in altında kalmıştır.

Anahtar kelimeler: İçten yanmalı motorlar, Alternatif yakıtlar, Performans, Yanma, Dietilen glikol dimetil eter

1 Giriş

Fosil kökenli yakıtların sınırlı olan rezervlerinin gün geçtikçe azalması ve fiyatlarındaki dalgalanmalar, dünya çapında ekonomik ve siyasi sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca fosil kökenli yakıtların içten yanmalı motorlarda kullanılması durumunda ortaya çıkan zararlı egzoz gazları, çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Söz konusu olumsuzlukları gidermek amacıyla alternatif yakıt ve yakıt katkılarına (bitkisel yağlar, biyodizel, alkoller, eterler, vb.) yönelik araştırma çalışmalarının önemi gün geçtikçe artmaktadır.

Bitkisel yağların yakıt olarak kullanımı dizel motorun icadına kadar uzanmaktadır. Dizel motorun mucidi Rudolf Diesel, 1900 yılında Paris Fuarı'nda sergilediği motorunu fındık yağı ile çalıştırmıştır [1]. Ülkemizde ise bitkisel

Abstract

The effects of diesel fuel-vegetable oil-diethylene glycol dimethyl ether blends on combustion, performance and emissions of a single-cylinder diesel engine are investigated at full throttle position and different engine speeds (1000-2200 rpm). Maximum cylinder temperature and the crank angle giving maximum cylinder temperature are predicted for fuels using interpolation and extrapolation methods. A 3-dimensional equation is derived using the least-squares regression for variation of cylinder temperature depending on engine speed and crank angle. The use of blends results in a decrease in ignition delay, maximum cylinder temperature, exhaust gas temperature and emissions, while an increase in specific fuel consumption. The use of the blend including 4% diethylene glycol dimethyl ether (v/v) causes an increase in effective efficiency (1.49%), effective power (2.56%), maximum cylinder pressure (2.04%) and maximum heat release rate (7.68%). The errors between measured and calculated cylinder temperature values from the 3-dimensional equation are lower than 5% for different fuels.

Keywords: Internal combustion engines, Alternative fuels, Performance, Combustion, Diethylene glycol dimethyl ether

yağların dizel motorlarda kullanımı, cumhuriyetin ilk yıllarına dayanmaktadır. 1931 yılında yapılan Birinci Ziraat Kongresi'nde, yerel kaynaklardan biyoyakıt üretimi gündeme gelmiştir. Ayrıca, 1934 yılında Mustafa Kemal Atatürk tarafından, "Bitkisel Yağların Tarım Traktörlerinde Kullanımı" isimli bir çalışma başlatılmıştır [2]. Bitkisel yağların en önemli avantajlarından bazıları; yenilenebilir olmaları, biyolojik olarak ayrışabilmeleri ve kimyasal yapılarında oksijen bulundurmalarıdır [3]. Fakat viskozitelerinin yüksek olması ve bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yetersizliği (ısı değerinin düşük, soğukta akış özelliklerinin kötü, kaynama noktası sıcaklığının yüksek olması, vb.) nedeniyle, bitkisel yağların dizel motorlarda doğrudan kullanılması önemli sorunlara (motor

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gulum@ktu.edu.tr (M. Gülüm)

Geliş / Received: 24.12.2022 Kabul / Accepted: 14.02.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1223930

performansının azalması, filtre tıkanması, vb.) neden olabilir [4].

Biyodizel, bitkisel veya hayvansal yağlardan transesterifikasyon reaksiyonuyla üretilen yağ asidi esterleri olarak tanımlanır [5]. Biyodizel, dizel motorlarda kullanılabilen yenilenebilir alternatif yakıtların başında gelmektedir. Biyodizelin en önemli avantajları; yenilenebilir olması, moleküler yapısında kütlece yaklaşık %10-12 oranlarında oksijen bulunması, dizel yakıtıyla her oranda karışabilmesi ve parlama noktasının yüksek olmasıdır. Üretim maliyetinin (günümüz şartlarında) yüksek olması, ısıl değerinin (35-40 MJ/kg) düşük olması ve viskozitesinin yüksek olması biyodizelin en önemli yetersizlikleridir [6].

Alkoller, tarım ürünlerinin fermantasyonu sonucu veya sentetik (yapay) olarak birçok değişik kaynaktan elde edilebilen alternatif yakıtlardır [7]. Yapılarında oksijen bulunur. Buharlaştırma ısıları ve oktan sayıları yüksektir [8]. Yüksek oktan sayıları, buji-ateşlemeli motorlarda daha yüksek sıkıştırma oranlarının seçilebilmesine ve dolayısıyla verimin yükselmesine olanak sağlamaktadır [7]. Buji-ateşlemeli ve dizel motorlarda petrol esaslı yakıtlara düşük oranlarda karıştırılarak motor üzerinde herhangi bir yapısal değişiklik yapılmadan kullanılabilirler [9]. Diğer taraftan, ısıl değerleri benzin ve dizel yakıtına göre daha düşüktür. Ayrıca, alkoller, su çekme özelliği nedeniyle bir miktar su içerirler. Bu nedenle de benzin ile her zaman tam olarak homojen karışım oluşturamayabilir (faz ayrışması sorunu) [7, 10].

Eterler (R-O-R), yapısındaki her iki hidrojenin yerini alkil gruplarının (R) aldığı bir su (H-O-H) türevi olarak dikkate alınabilirler. Alkil grupları aynı olabileceği gibi farklı da olabilir [11]. Dietilen glikol dimetil eter (DGDE) renksiz, dizel yakıtıyla karışabilen ve toksik etkisi nispeten düşük olan bir eterdir. DGDE, yüksek setan sayısı (126), oksijen içeriği (kütlece %35.7) ve buharlaştırma ısısı (322 kJ/kg) ile düşük is eğilimi nedeniyle oksijenli yakıt katkısı olarak kullanımına duyulan ilgi son yıllarda artmıştır [12, 13]. Asidik veya bazik katalizörlerin varlığında etilen oksit ve metanolden sentezlenebilir [14].

Yukarıda bahsi geçen alternatif yakıtların ve oksijenli yakıt katkılarının dizel yakıtıyla oluşturdukları ikili veya üçlü karışımların motor performans parametrelerine, yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına olan etkilerinin incelendiği çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Varuvel ve diğ., tarafından gerçekleştirilen çalışmada [15], hacimsel olarak 50:50 oranında kauçuk tohumu yağı ve babassu yağı içeren ikili karışıma, hacimsel olarak %20 oranında DGDE ilave edilmiştir. İkili karışıma kıyasla, DGDE ilavesiyle efektif verimin (%6), azotoksit emisyonunun (%8), maksimum silindir basıncının (%5) ve maksimum ısı yayılımı oranının (%8.3) arttığı belirlenmiştir.

Ashok ve diğ., tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada [16], Calophyllum Inophyllum bitkisi tohumundan biyodizel (CIBD) üretilmiştir. Oksijenli yakıt katkı maddesi olarak 1-oktanol, hacimsel olarak %10 (CIBD90O10), %20 (CIBD80O20), %30 (CIBD70O30), %40 (CIBD60O40) ve %50 (CIBD50O50) oranlarında üretilen biyodizel ile karıştırılmıştır. Deneyler 1500 devir/dakikada ve farklı yüklerde gerçekleştirilmiştir. Tam yük durumunda, karışım

içerisindeki 1-oktanol miktarı arttıkça maksimum silindir basıncının arttığı ve tutuşma gecikmesinin uzadığı belirlenmiştir.

Devarajan tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen çalışmada [17], badem yağından biyodizel üretilmiştir. Oksijenli yakıt katkısı olan dimetil karbonat (DMK), hacimsel olarak %10 ve %20 oranlarında üretilen biyodizele eklenmiştir. Dizel yakıtının, badem yağı biyodizelinin (BYBD) ve biyodizel-DMK karışımlarının (BYBD90DMK10 ve BYBD80DMK20), bir dizel motorun yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına olan etkileri incelenmiştir. Tam yükte, BYBD, BYBD90DMK10 ve BYBD80DMK20 kullanıldığında, dizel yakıtına göre maksimum silindir basıncı (sırasıyla %37.16, %27.81 ve %21.87 oranlarında) artmış, fakat ısı yayılımı oranı (sırasıyla %25.31, %18.94 ve %13.20 oranlarında) azalmıştır.

Nabi ve diğ., tarafından 2019 yılında gerçekleştirilen çalışmada [18], DGDE, dizel yakıtı-hindistan cevizi yağı biyodizeli karışımına eklenmiştir. Karışımlardaki dizel yakıtının, DGDE'nin ve biyodizelin hacimsel oranları sırasıyla 70:20:10 ve 70:10:20 şeklindedir. Elde edilen iki farklı üçlü karışım, altı silindri ve turboşarjlı bir dizel motorda test edilmiştir. Deneyler 1500 devir/dakikada ve dört farklı yükte (%25, %50, %75 ve %100) gerçekleştirilmiştir. Biyodizelin ve DGDE'nin yapısında bulunan oksijen nedeniyle, bütün yüklerde dizel yakıtı kullanımına göre azotoksit emisyonu artmış, is emisyonu azalmıştır.

Ali ve Swaminathan tarafından 2020 yılında gerçekleştirilen çalışmada [19], atık kızartma yağından biyodizel üretilmiştir. Hacimsel olarak %80 dizel yakıtı, %15 atık kızartma yağı biyodizeli ve %5 oksijenli yakıt katkısı (1-oktanol, dibutil eter ve 2-etilheksanol) içeren üçlü karışımlar (OTN5, DBE5 ve EHS5) hazırlanmıştır. Tam yükte EHS5 kullanıldığında, maksimum silindir basıncının dizel yakıtına göre %1.29 oranında arttığı belirlenmiştir. Diğer karışımların kullanılması durumunda ise maksimum basınç azalmıştır.

Simsek ve Uslu tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışmada [20], oksijenli yakıt katkısı olarak 1-pentanol, hacimsel olarak %5, %10 ve %20 oranlarında dizel yakıtına ilave edilmiştir. Deneyler tam yükte ve farklı devir sayılarında (1400-3200 devir/dakika) gerçekleştirilmiştir. 1-pentanol miktarı arttıkça, güç ve döndürme momenti azalırken, özgül yakıt tüketiminin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, 1-pentanol miktarı arttıkça, hidrokarbon, karbonmonoksit ve is emisyonları azalırken, azotoksit emisyonlarının arttığı vurgulanmıştır.

Anwar ve diğ., tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışmada [21], hacimsel olarak %5 oranında DGDE, %20 oranında papaya tohumu yağı biyodizeli ve %75 oranında dizel yakıtı içeren üçlü karışımın, dizel motorun performans parametrelerine ve egzoz emisyonlarına olan etkileri incelenmiştir. Dizel yakıtı kullanımına göre DGDE içeren üçlü karışım kullanıldığında, ortalama olarak efektif güç (%1.79), döndürme momenti (%1.2), özgül yakıt tüketimi (%0.48), azotoksit emisyonu (%0.64), hidrokarbon emisyonu (%32.4), karbonmonoksit emisyonu (%61) azalmış, fakat efektif verim (%3.25) artmıştır.

Bhatt ve Shrivastava tarafından 2022 yılında gerçekleştirilen çalışmada [22], atık kızartma yağından biyodizel üretilmiştir. 1-hekzanol, hacimsel olarak %20 ve %40 oranlarında dizel yakıtına eklenerek ikili karışımlar elde edilmiştir. 1-hekzanol oranı arttıkça, dizel yakıtı kullanımına göre, özgül yakıt tüketiminin arttığını, fakat efektif verimin, karbonmonoksit, is ve hidrokarbon emisyonlarının azaldığını belirtmişlerdir.

Yage ve diğ., tarafından 2022 yılında gerçekleştirilen çalışmada [13], beş farklı dizel yakıtı-DGDE ve dizel yakıtı-atık kızartma yağı biyodizeli karışımlarının etkileri incelenmiştir. Karışımlar kütleli olarak %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında oksijen içermektedir. İncelenen her bir yükte, karışımdaki DGDE veya biyodizel oranı arttıkça is emisyonunun azaldığı belirlenmiştir.

Özetlenen çalışmalar [13, 15-22] ile birlikte konuyla ilgili son yıllarda yayınlanmış diğer çalışmalar [23-25] da dikkate alındığında, alternatif yakıt ve yakıt katkısı olarak biyodizelin, alkollerin ve DMK'nın daha fazla kullanıldığı ve incelendiği tespit edilmiştir. Biyodizel, dizel yakıtı, alkoller ve DMK ile kıyaslandığında daha yüksek setan sayısına (126) sahip olan DGDE ile ilgili deneysel çalışmaların daha az olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri görece basit, kullanışlı ve güvenilir olmasına rağmen, bunların yanma parametreleri için kullanıldığı sayısal çalışmalara da pek rastlanmamıştır.

Yukarıda bahsedilen eksiklikleri gidermek için sunulan bu çalışmada, dizel yakıtı (DY)-bitkisel yağ-DGDE karışımlarının, tek silindri bir dizel motorun performans parametrelerine, yanma karakteristiklerine ve egzoz emisyonlarına olan etkileri farklı devirlerde (1000-2200 devir/dakika) incelenmiş ve DY ile kıyaslanmıştır. Motor elemanlarının tasarımında kritik öneme sahip olan silindir sıcaklığı değerleri ile maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerleri, interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri kullanılarak tüm test yakıtları için tahmin edilmiştir. Ayrıca, silindir sıcaklığının devir sayısı ve krank mili açısına göre değişimi için 3-boyutlu bir denklem elde edilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Test yakıtları ve özellikleri

Sunulan çalışmada kullanılan üçlü karışımların birinci bileşeni DY, ikinci bileşeni bitkisel yağ ve üçüncü bileşeni DGDE'dir. Motor testlerinde referans yakıt olarak kullanılan DY, Trabzon'da yerel bir petrol istasyonundan satın alınmıştır. Bitkisel yağ öğrenci kantininden, DGDE ise (% 99 saflıkta) Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir. Dizel yakıtının ve DGDE'nin bazı önemli fiziksel ve kimyasallar özellikleri sırasıyla **Tablo 1** ve **Tablo 2**'de verilmiştir. DGDE'nin özellikleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [26, 27]. Bitkisel yağın 15 °C'de yoğunluğu (TS EN ISO 12185) 921.8 kg/m³ ve üst ısıl değeri (DIN 51900-2) 38850 kJ/kg olarak KTÜ Prof. Dr. Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüştür. Bitkisel yağın diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri literatürdeki çalışmalardan alınmıştır [28, 29].

Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 8 Mayıs 2003 tarihli ve 2003/30/EC sayılı Direktifinde, "Saf bitkisel yağ, kullanımının ilgili motor tipi ve ilgili emisyon gereksinimleri ile uyumlu olduğu belirli durumlarda biyoyakıt olarak kullanılabilir." önerisi getirilmiştir [30]. Yine aynı direktife göre, Avrupa Birliği enerji arz güvenliği için 2020 yılına kadar karayolu taşımacılığı sektöründe, fosil kökenli yakıtların yerine %20 oranında alternatif yakıtların kullanılması hedeflenmiştir [30]. Ayrıca, Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin 14 Temmuz 2021 yılında yayınlanan 2021/0218 sayılı Direktifinde, 2030 yılına kadar yenilenebilir enerji kullanımı hedefinin %38-40'a kadar artırılması gerektiği vurgulanmıştır [31]. Yukarıda bahsi geçen direktifler dikkate alınarak, üçlü karışım yakıtlarını hazırlamadan önce, bitkisel yağ ile DY hacimsel olarak 20:80 oranında karıştırılmıştır. Daha sonra, DY-bitkisel yağ ikili karışımına, hacimsel olarak %4, %6, %8, %10, %15 ve %20 oranlarında DGDE ilave edilmiştir. DGDE'nin piyasadaki birim fiyatı dikkate alınarak %20'den daha yüksek oranlar tercih edilmemiştir. Üçlü karışımlar sırasıyla DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 olarak isimlendirilmiştir. Bütün karışımlar, 30 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Üçlü karışımlar laboratuvar şartlarında 2 hafta bekletilmiş ve herhangi bir faz ayrımının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Fakat yine de, motor deneylerinden önce üçlü karışımlar bir süre manyetik karıştırıcıda tekrar karıştırılmıştır.

Tablo 1. Dizel yakıtının bazı önemli yakıt özellikleri

Özellik*	Birim	Ölçüm yöntemi	DY
15 °C'de yoğunluk	kg/m ³	TS EN ISO 12185	835.7±0.2
40 °C'de kinematik viskozite	mm ² /s	EN ISO 3104 DIN	3.033 ±0.012
Üst ısıl değer	MJ/kg	51900-2	45.360±0.12
Alt ısıl değer	MJ/kg	-	42.5383
Parlama noktası	°C	TS EN ISO 2719	68±1.5
Toplam kirlilik	mg/kg	TS EN 12662	6.6±1.2
Soğuk filtre tıkanma noktası	°C	TS EN 116	-12±1
Oksidasyon kararlılığı	g/m ³	TS EN ISO 12205	20.6±10.3
Setan sayısı	-	EN ISO 5165	min. 51
Setan indisi	-	TS EN ISO 4264	53.9
Yağlama özelliği	µm	TS EN ISO 12156-1	216±22
Damıtma	250 °C (% v/v)	TS EN ISO 3405	34.2±1.4
	350 °C (% v/v)		340.3
	% 95 (v/v)		340.3

*: Setan sayısı hariç bütün özellikler KTÜ Prof. Dr. Saadettin GÜNER Yakıt Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ölçtürülmüştür.

Sunulan çalışmada kullanılan karışım yakıtlarının bazı önemli yakıt özellikleri **Tablo 3**'te verilmiştir. Bitkisel yağın ve DGDE'nin yoğunlukları daha yüksek, ısıl değerleri daha

Tablo 2. DGDE'nin bazı önemli yakıt özellikleri

Özellik	Birim	DGDE
Kimyasal formül	-	C ₆ H ₁₄ O ₃
Yoğunluk	kg/m ³	945
40 °C'de kinematik viskozite	mm ² /s	1.09
Alt ısııl değer	kJ/kg	24500
Buharlaşma ısısı	kJ/kg	322
Setan sayısı	-	126
Parlama noktası	°C	67
Oksijen içeriği	% m/m	35.77
Hidrojen içeriği	% m/m	10.52
Karbon içeriği	% m/m	53.71
Stokiyometrik hava/yakıt oranı	-	8.2

düşüktür. Bu yüzden, dizel yakıtına kıyasla; DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20'nin sırasıyla yoğunlukları %2.5013, %2.7216, %2.9420, %3.1624, %3.7133 ve %4.2642 daha fazla; setan sayıları %0.6494, %3.6996, %6.7498, %9.8000, %17.4255 ve %25.0510 daha fazla; ve alt ısııl değerleri %4.8420, %5.7036, %6.5614, %7.4154, %9.5347 ve %11.6319 daha düşüktür.

Tablo 3. Karışım yakıtlarının bazı önemli yakıt özellikleri

Yakıt	Yoğunluk (kg/m ³)	Setan sayısı	Alt ısııl değer (MJ/kg)
DGDE4	856.6032	51.3312	40.4786
DGDE6	858.4448	52.8868	40.1121
DGDE8	860.2864	54.4424	39.7472
DGDE10	862.1280	55.9980	39.3839
DGDE15	866.7320	59.8870	38.4824
DGDE20	871.3360	63.7760	37.5903

Karışım yakıtlarının yoğunlukları ($\rho_{\text{karışım}}$), setan sayıları ($SS_{\text{karışım}}$) ve alt ısııl değerleri ($H_{u,\text{karışım}}$) aşağıdaki denklemler yardımıyla belirlenmiştir [32]:

$$\rho_{\text{karışım}} = \sum_{i=1}^3 \chi_i \cdot \rho_i \quad (1)$$

$$SS_{\text{karışım}} = \sum_{i=1}^3 \chi_i \cdot SS_i \quad (2)$$

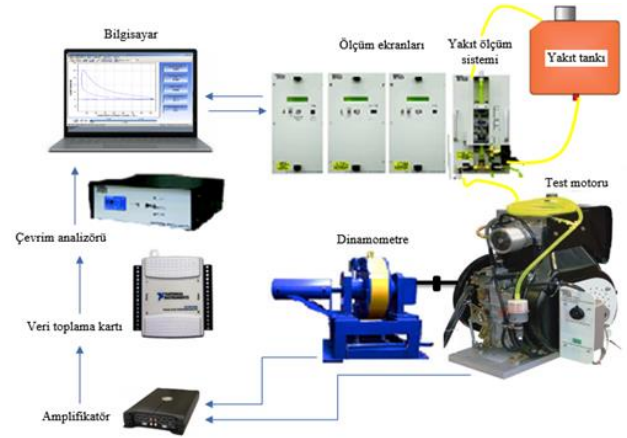
$$H_{u,\text{karışım}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \chi_i \cdot \rho_i \cdot H_{u,i}}{\sum_{i=1}^3 \chi_i \cdot \rho_i} \quad (3)$$

burada i alt indisi karışım bileşenini (DY, bitkisel yağ ve DGDE), χ ise karışım bileşeninin hacimsel oranını (%) temsil etmektedir. Örneğin, ρ_1 ve $H_{u,1}$ sırasıyla dizel yakıtının yoğunluğunu ve alt ısııl değerini ifade etmektedir.

2.2 Performans parametrelerinin ve yanma karakteristiklerinin hesabı

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Otomotiv Laboratuvarı'nda hazır bulunan ve TecEquipment firması tarafından üretilmiş olan TD 300 rejeneratif motor test düzeneğinde motor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlamadan önce motor yağı değiştirilmiştir. Motor üzerinde ve yakıt sisteminde herhangi

bir değişiklik yapmadan deneyler, tam gazda (tam püskürtme durumu) ve farklı devir sayılarında (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) gerçekleştirilmiştir. İncelenen devir sayıları, düşük (1000 devir/dakika), orta (1600 devir/dakika) ve yüksek (2200 devir/dakika) devir sayılarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir. Ölçümler alınmadan önce motor, test edilecek yakıt ile yaklaşık olarak 15 dakika çalıştırılmıştır. Ölçümler, motor kararlı çalışma durumuna ulaştıktan sonra alınmıştır. Ölçümler alınıp deneyler bittikten sonra yakıt hattını temizlemek için her defasında motor bir müddet dizel yakıtıyla çalıştırılmıştır. Test düzeneğinde; doğal emişli, direkt-püskürtmeli ve dört-zamanlı bir dizel motor, çevrim analizörü, yakıt tankı, elektrikli dinamometre, yakıt ölçüm sistemi ve verilerin okunduğu ekranlar bulunmaktadır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Deneylerde kullanılan HATZ marka dizel motorun bazı teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik resmi

Tablo 4. Test motorunun bazı teknik özellikleri

Silindir hacmi	462 cm ³
Silindir sayısı	1
Strok (kurs)/çap oranı	76/88
Biyel kolu uzunluğu	124 mm
Sıkıştırma oranı	20.5:1
Enjektör açılma basıncı	220 bar
Enjektör delik sayısı/çapı	5/0.162 mm
Soğutma sistemi	Hava

Egzoz gazı sıcaklığı ölçümünde K-tipi termokupullar kullanılmıştır. Motora ilk hareketin verilmesinde ve motorun yüklenmesinde (devir sayısının değiştirilmesinde) DC elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Motor çalıştıktan sonra dinamometre, jeneratör görevi görmektedir. Dinamometrenin yan tarafında bulunan bir yük hücresi ve dinamometre şaftının üzerinde bulunan (HENGSTLER marka) optik enkoderden gelen sinyaller işlenerek, motorun devir sayısı (n , devir/dakika) ve döndürme momenti (M_d , Nm) dolayısıyla efektif gücü (N_e , kW) belirlenmiştir [33]:

$$N_e = M_d \cdot \omega \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

$$\omega = (\pi \cdot n) / 30 \quad (5)$$

burada ω krank milinin açısal hızıdır (1/s). Optik sensör, solenoid ve ölçekli kaptan meydana gelen hacimsel yakıt tüketimi ölçüm cihazı yardımıyla, ΔV (8 mL) hacimdeki yakıtın tükenme süresi (Δt , dakika) otomatik olarak ölçülerek, toplam yakıt tüketimi (B, kg yakıt/saat),

$$B = \frac{\Delta V \cdot 10^{-6} \cdot 60}{\Delta t} \cdot \rho_{yakıt} \quad (6)$$

denklemlerle hesaplanmıştır. Burada, ρ dizel yakıtının veya karışım yakıtlarının yoğunluğudur (kg/m^3). Toplam yakıt tüketimi (B, kg yakıt/saat) ve efektif güç (N_e , kW) belirlendikten sonra özgül yakıt tüketimi ($b_{e,yakıt}$, kg yakıt/kWsaat),

$$b_{e,yakıt} = B/N_e \quad (7)$$

denklemlerle hesaplanmıştır. Özgül enerji tüketimi ($b_{e,enerji}$, MJ/kWsaat), özgül yakıt tüketimi ($b_{e,yakıt}$, kg yakıt/kWsaat) ile alt ısı değer (H_u , kJ/kg) çarpılarak belirlenmiştir:

$$b_{e,enerji} = b_{e,yakıt} \cdot H_u \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

Efektif verim (η_e) ise,

$$\eta_e = \frac{3600}{H_u \cdot b_{e,yakıt}} \quad (9)$$

denklemlerle hesaplanmıştır [34]. Ölçüm aralığı 0-300 bar olan KISTLER marka piezoelektrik basınç transdüser ile silindir basıncı ölçülmüş ve indikatör diyagramı elde edilmiştir. Basınç transdüseri, motor kafasına monte edilmiştir. Yakıtlar kullanıldığında elde edilen silindir basıncı değerleri, tam gazda ve farklı devirlerde her bir krank mili açısı için kaydedilmiştir. Krank mili açısının belirlenmesinde HENGSTLER marka ve çözünürlüğü 1° (derece) olan optik enkoder kullanılmıştır. Çevrimsel farklılıkların etkisini azaltmak için ardışık 50 çevrimin ortalaması alınmıştır. Silindir basıncı verileri, veri toplayıcı sistem yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Basınç verileri kullanılarak ve bazı kabuller (silindir içindeki gaz karışımının ideal gaz davranışına uyduğu, kütle ve gaz kaçaklarının ihmal edildiği, vb.) altında termodinamiğin birinci kanunu yardımıyla net ısı yayılımı oranı, krank mili açısına bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [35]:

$$\frac{dQ_{net}}{d\theta} = \frac{k}{k-1} \cdot P \cdot \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} \cdot V \cdot \frac{dP}{d\theta} \quad (10)$$

burada Q_{net} (J) yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile silindir duvarlarına transfer olan ısı enerjisi arasındaki farkı, θ krank mili açısını (derece), k özgül ısıların oranını, P silindir basıncını (Pa) ve V silindir hacmini (m^3) ifade etmektedir. Yanma başlangıcı, net ısı yayılımı oranı eğrisinin negatif bölgeden pozitif bölgeye çıkarken x eksenini kestiği krank mili açısı olarak tanımlanmıştır [36].

Püskürtmenin başladığı krank mili açısı değeri (1000-2200 devir/dakika aralığı için üst ölü noktadan 13° krank mili açısı önce) ile yanmanın başladığı krank mili açısı değeri arasındaki fark tutuşma gecikmesi olarak tanımlanmıştır. Silindir sıcaklığının krank mili açısına göre değişimi belirlenirken, silindir hacmi verileri, silindir basıncı verileri ve ideal gaz kanunu kullanılmıştır. Son olarak, egzoz emisyonlarının ölçümü için Bilsa marka bir egzoz gazı analizörü kullanılmıştır. Deneylerden önce cihazın kalibrasyonu yetkili firmada yapılmıştır. Cihazın teknik özellikleri **Tablo 5**'te verilmiştir.

Tablo 5. Egzoz emisyon cihazının bazı teknik özellikleri

Emisyon	Ölçüm aralığı	Duyarlılık
Karbonmonoksit	0-%10	%0.001
Hidrokarbon	0-10000 ppm	1 ppm
İs (K)	0.00-9.99 m^{-1}	0.01 m^{-1}
Azotoksit	0-5000 ppm	1 ppm

2.3 Belirsizlik analizi

Motor performans parametreleri için ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin anlamlılıklarını ve güvenilirliklerini irdelemek adına Kline ve McClintock [37] tarafından önerilen yöntem kullanılarak belirsizlik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde göre, ölçülen veya hesaplanan hedef fiziksel büyüklük R ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ ise,

$$R = R(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n) \quad (11)$$

yazılabilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ise R büyüklüğünün belirsizliği w_R ,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_1} \cdot w_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

şeklinde hesaplanabilir. Hedef fiziksel büyüklükler, **Denklemler (4-9)** yardımıyla hesaplanan motor performans parametreleridir. Bunların hesaplanmasında kullanılan cihazların belirsizlikleri; devir sayısı için ± 1 devir/dakika, döndürme momenti için ± 0.1 Nm ve yakıt tüketimi için ± 0.1 mL/dakika olarak hesaba katılmıştır. Verilerin güvenilirliğini arttırmak ve belirsizliklerini azaltmak adına tüm ölçümler, her bir yakıt için 20 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Tüm yakıtlar için efektif güç, özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi ve efektif verimdeki belirsizlik aralıkları (minimum ve maksimum belirsizlikler) sırasıyla % 0.43292-% 0.51224, % 0.59242-% 1.12357, % 0.59242-% 1.12356 ve % 0.59239-% 1.12371 olarak hesaplanmıştır. Böylece hesaplanan büyüklüklerin güvenilir olduğu söylenebilir. Ayrıca, silindir basıncı için ardışık 50 çevrimin ortalamasının alınması, optik enkoderin hassasiyetinin 1° krank mili açısı olması ve piezoelektrik basınç transdüserinin doğrusallık (linearity) değerinin ± 0.4 'ten küçük olması nedeniyle yanma karakteristikleri için elde edilen değerlerin de güvenilir ve hassas olduğu söylenebilir. Egzoz gazı sıcaklığı ± 1 °C hassasiyetinde ölçülmüştür.

2.4 İnterpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemi

$n + 1$ adet (x_0, x_1, \dots, x_n) değerlerine karşılık gelen (y_0, y_1, \dots, y_n) değerleri deneysel olarak belirlenmiş ise, bu (x_i, y_i) noktalarından geçen polinomun belirlenmesinin yanında x_0 ile x_n arasında herhangi bir x değerine karşılık gelen y değerinin hesaplanması (tahmin edilmesi) işlemi interpolasyondur [38]. x_0 ile x_n aralığının dışında herhangi bir x değerine karşılık gelen y değerinin hesaplanması (tahmin edilmesi) işlemi ise ekstrapolasyondur. Newton, Gauss, Lagrange, Hermit ve sonlu fark interpolasyonları, sıklıkla kullanılan interpolasyon yöntemlerindedir. Sonlu fark interpolasyonunda, fonksiyonun farkları, ileriye doğru, geriye doğru ve merkezi olmak üzere üç şekilde yazılabilir [39]. x_0 noktasını başlangıç alan Gauss ileriye doğru fark denklemi ile x_1 noktasını başlangıç alan Gauss geriye doğru fark denkleminin toplamının ortalaması alındığında, herhangi bir x noktasına karşılık gelen interpolasyon değeri (y_p) için Bessel interpolasyon denklemi aşağıdaki gibi elde edilir [40]:

$$y_p = \frac{y_0 + y_1}{2} + (p - 0.5) \cdot \Delta y_0 + \frac{p \cdot (p - 1)}{2!} \cdot \frac{\Delta^2 y_{-1} + \Delta^2 y_0}{2} + \frac{(p - 0.5) \cdot p \cdot (p - 1)}{3!} \cdot \Delta^3 y_{-1} + \dots \quad (13)$$

Denklem (13)'ün 1. türevi alındığında,

$$\frac{dy_p}{dx} = \frac{1}{h} \cdot \left(\Delta y_0 + \frac{2p - 1}{2!} \cdot \frac{\Delta^2 y_{-1} + \Delta^2 y_0}{2} + \frac{3p^2 - 3p + 0.5}{3!} \cdot \Delta^3 y_{-1} + \dots \right) \quad (14)$$

elde edilir. Denklem (13)'ün 2. türevi alındığında,

$$\frac{d^2 y_p}{dx^2} = \frac{1}{h^2} \cdot \left[\left(\frac{\Delta^2 y_{-1} + \Delta^2 y_0}{2!} \right) + \left((p - 0.5) \cdot \Delta^3 y_{-1} + \dots \right) \right] \quad (15)$$

elde edilir. Burada,

$$p = (x - x_0)/h \quad (16)$$

$$\Delta y_i = y_{i+1} - y_i \quad (17)$$

$$\Delta y_{-1} = y_0 - y_{-1} \quad (18)$$

$$\Delta y_0 = y_1 - y_0 \quad (19)$$

$$\Delta y_1 = y_2 - y_1 \quad (20)$$

$$\Delta^2 y_{-1} = \Delta(\Delta y_{-1}) = \Delta(y_0 - y_{-1}) = \Delta y_0 - \Delta y_{-1} \quad (21)$$

$$\Delta^2 y_0 = \Delta(\Delta y_0) = \Delta(y_1 - y_0) = \Delta y_1 - \Delta y_0 \quad (22)$$

$$\Delta^3 y_{-1} = \Delta(\Delta^2 y_{-1}) = \Delta(\Delta y_0 - \Delta y_{-1}) \quad (23)$$

olarak ifade edilmektedir. Δy_{-1} , Δy_0 ve Δy_1 birinci mertebeden ileri sonlu fark ifadeleri, $\Delta^2 y_{-1}$ ve $\Delta^2 y_0$ ikinci mertebeden ileri sonlu fark ifadeleri, ve son olarak $\Delta^3 y_{-1}$ üçüncü mertebeden ileri sonlu fark ifadesidir. Ayrıca, Bessel interpolasyon denklemi, eşit aralıklı x_i noktaları için kullanıldığından,

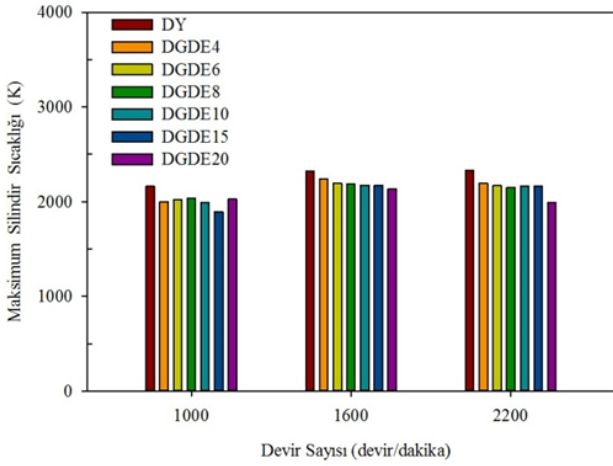
$$h = x_{i+1} - x_i \quad (24)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem (13-24), silindir sıcaklığının maksimum olduğu krank mili açısını ve maksimum silindir sıcaklığını interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri ile tahmin etmek için kullanılmıştır.

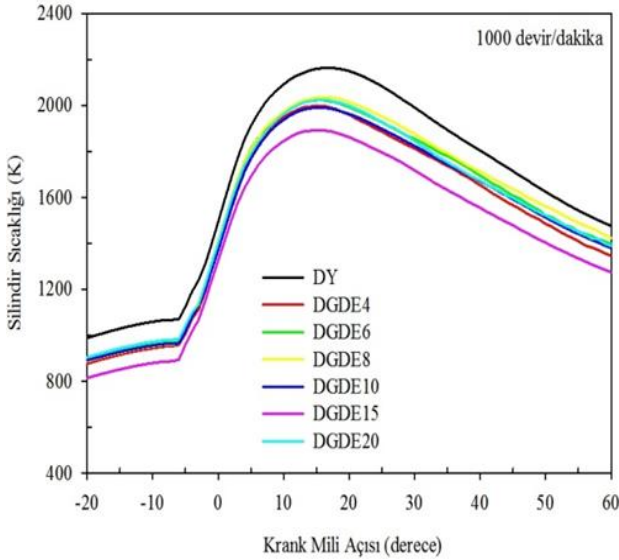
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Silindir sıcaklığı

Şekil 2'de farklı test yakıtları (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) için maksimum silindir sıcaklığının devir sayısına bağlı olarak değişimi görülmektedir. DY için devir sayısının artışıyla birlikte maksimum silindir sıcaklığı değerinin arttığı belirlenmiştir. Fakat karışım yakıtları için devir sayısının 1000 devir/dakikadan 1600 devir/dakikaya artışıyla maksimum silindir sıcaklığı değerleri artarken, devir sayısı 1600 devir/dakikadan 2200 devir/dakikaya çıkarıldığında ise maksimum sıcaklık değerleri azalmıştır. En yüksek maksimum silindir sıcaklığı değerleri DY kullanımı için 2200 devir/dakikada 2328.85 K iken DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımı için 1600 devir/dakikada sırasıyla 2239.13 K, 2195.12 K, 2188.76 K, 2174.23 K, 2172.64 K ve 2137.28 K olarak belirlenmiştir. İncelenen tüm devir sayıları ve yakıtlar göz önüne alındığında, maksimum silindir sıcaklığı değerlerinin, üst ölü noktadan 15-23° krank mili açısı sonra elde edildiği tespit edilmiştir. Maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerleri devir sayısının artışıyla tüm test yakıtları için artmıştır (üst ölü noktadan uzaklaşmıştır). DY kullanımına göre, karışım yakıtları kullanıldığında maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerlerinin az (1-2°) da olsa azaldığı (üst ölü noktaya daha yakın olduğu) belirlenmiştir. Bu sonuç, karışım yakıtlarının yapısında bulunan oksijenin yanma sürecini hızlandırmasıyla açıklanabilir. Şekil 3'te 1000 devir/dakikada silindir sıcaklığının krank mili açısına göre değişimi tüm test yakıtları için verilmiştir. Test yakıtları, krank mili açısına göre benzer sıcaklık değişimi karakteristikleri sergilemiştir. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında maksimum sıcaklık değerlerinin ortalama (devir sayısına göre) olarak sırasıyla %5.62, %6.26, %6.48, %7.14, %8.68 ve %9.59 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalma, DGDE'nin ve bitkisel yağın ısı değerlerinin düşük olmasına bağlanabilir. Ayrıca, karışımındaki DGDE miktarı arttıkça ortalama azalma oranları artmaktadır. Bu durum, DGDE'nin buharlaşma ısısının yüksek (322 kJ/kg) olmasından dolayı buharlaşırken yanma odasından daha fazla ısı çekmesine (soğutma etkisi) bağlanabilir.



Şekil 2. Devir sayısı ve yakıt türüne göre maksimum silindir sıcaklığının değişimi



Şekil 3. Silindir sıcaklığının krank mili açısına göre değişimi

3.2 Tutuşma gecikmesi, silindir basıncı ve ısı yayılımı oranı

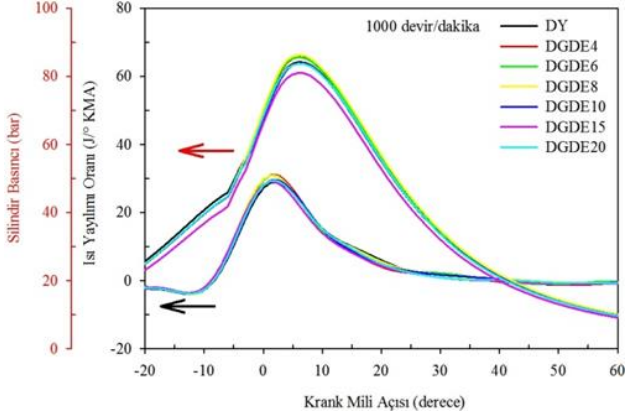
Bu kısımda, her bir yakıt (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) için farklı devirlerde (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) krank mili açısına bağlı olarak silindir basıncı ve ısı yayılımı oranı (Denklemler (10)) değerlerinin değişimi belirlenmiştir. Ayrıca, söz konusu yakıtların farklı devirlerdeki tutuşma gecikmesi süreleri ($^{\circ}$ krank mili açısı olarak) de belirlenmiştir. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında tutuşma gecikmesi ortalama (devir sayısına göre) olarak %2.63, %3.77, %4.45, %5.72, %7.76 ve %8.07 oranlarında azalmıştır. Dizel yakıtına göre karışım yakıtlarının setan sayısı daha yüksek (Tablo 3) olduğu için tutuşma gecikmesi süresi azalmıştır. Yakıt karışımındaki DGDE miktarı arttıkça karışımın setan sayısı arttığı ve viskozitesi azaldığı için tutuşma gecikmesindeki ortalama azalma artmıştır. En uzun tutuşma gecikmesi 2200

devir/dakikada, DY kullanımında yaklaşık 7° krank mili açısı olarak belirlenmiştir.

Şekil 4'te test yakıtlarının (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) krank mili açısına bağlı olarak silindir basıncı ve ısı yayılımı oranı değerlerinin değişimi 1000 devir/dakika için verilmiştir. Test yakıtları, krank mili açısına göre benzer ısı yayılımı oranı ve silindir basıncı değişimi karakteristikleri sergilemiştir. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6 ve DGDE8 kullanıldığında ortalama (devir sayısına göre) olarak maksimum silindir basıncı sırasıyla %2.04, %1.54 ve %1.07 oranlarında artmıştır. Bu artış, bitkisel yağın ve DGDE'nin yapısında bulunan oksijenin, yanma odasındaki zengin karışım bölgelerinde yanmayı iyileştirmesinden kaynaklanabilir. Ayrıca, DGDE'nin setan sayısı dizel yakıtına göre daha yüksek olduğu için söz konusu karışım yakıtları (DGDE4, DGDE6 ve DGDE8) kullanıldığında, kendi kendine tutuşma meylinin artmasıyla azalan tutuşma gecikmesi nedeniyle motorun daha kararlı çalışması (yanmanın genişleme strokunun sonlarına doğru kayması önlenerek yanmanın zamanında tamamlanması) sağlanmış olabilir. Bu durum, maksimum basıncın artmasına neden olmuş olabilir. Fakat yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça maksimum basıncındaki ortalama artış oranı azalmaktadır. Nitekim DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında maksimum silindir basıncı ortalama olarak sırasıyla %0.82, %1.92 ve %2.71 oranlarında azalmıştır. Bu azalma, söz konusu karışımların (DGDE10, DGDE15 ve DGDE20), ısıl değerlerinin dizel yakıtına göre daha düşük olmasından kaynaklanmıştır (Tablo 3). Ayrıca, yüksek oranlarda (%10, %15 ve %20) DGDE kullanımı nedeniyle setan sayısındaki artış (Tablo 3), tutuşma gecikmesi süresince yanma odasında biriken yakıt miktarının azalmasına ve dolayısıyla maksimum silindir basıncının azalmasına neden olmuş olabilir. Yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça ısıl değer azaldığı için maksimum silindir basıncındaki ortalama azalma artmıştır. Diğer bir ifade ile karışımların (DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) ısıl değerleri daha düşük olduğu için yanma sonucunda açığa çıkan enerji azalmış ve neticede maksimum basıncındaki ortalama azalma (%0.82'den %2.71'e kadar) artmıştır.

DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10 ve DGDE15 kullanıldığında maksimum net ısı yayılımı oranı ortalama (devir sayısına göre) olarak sırasıyla %7.68, %4.76, %3.84, %2.15 ve %1.18 oranlarında artmıştır. Isı yayılımı oranındaki ortalama artış, bitkisel yağın ve DGDE'nin oksijen içeriği nedeniyle yanma hızının artmasına ve yanmanın iyileşmesine bağlanabilir. Fakat ortalama artış, yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça (%7.68'den %1.18'e kadar) azalmaktadır. Nitekim DGDE20 kullanıldığında maksimum net ısı yayılımı oranı ortalama olarak %2.97 oranında azalmıştır. Bu azalma, dizel yakıtına göre DGDE'nin dolayısıyla DGDE20'nin ısıl değerinin düşük olmasına bağlanabilir. Ayrıca, DGDE ilavesiyle tutuşma gecikmesi azaldığı için kontrolsüz yanma safhasında birikmiş olan yanabilir (tutuşabilir) karışım miktarı azalacağından dolayı maksimum silindir basıncının azaldığı gibi maksimum net ısı yayılımı oranı da azalmıştır. Maksimum silindir basıncı ve maksimum net ısı yayılımı

oranındaki azalma Varuvel vd. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da tespit edilmiştir.



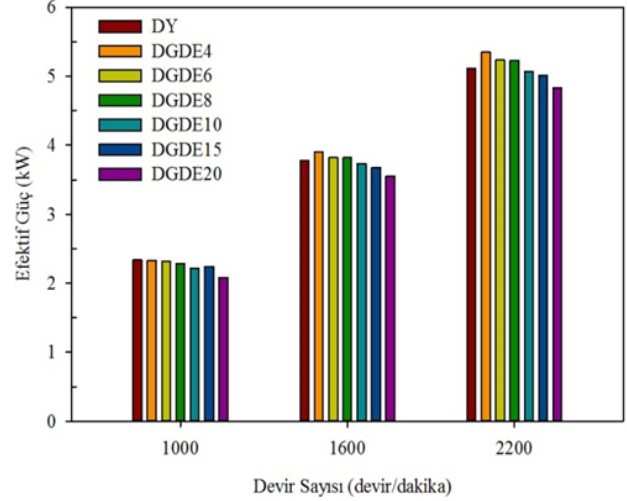
Şekil 4. Isı yayılımı oranı ve silindir basıncının krank mili açısına göre değişimi

İncelenen tüm yakıtlar ve devir sayıları dikkate alındığında, maksimum basınçların ve maksimum net ısı yayılımı oranlarının sırasıyla üst ölü noktadan 6-10° ve 1-10° krank mili açısı sonra elde edildiği belirlenmiştir. Devir sayısının artışıyla maksimum basınçların ve maksimum net ısı yayılımı oranlarının elde edildiği krank mili açısı değerleri tüm yakıtlar için artmıştır (üst ölü noktadan uzaklaşmıştır). En yüksek maksimum basınç ve en yüksek maksimum ısı yayılımı oranı değerleri sırasıyla 86.1905 bar (DGDE8) ve 31.0228 J/° krank mili açısı (DGDE4) olarak belirlenmiştir. Ayrıca, devir sayısının artışıyla birlikte yanma başlangıcı üst ölü noktaya yaklaşmıştır. Karışım yakıtları kullanıldığında DY kullanımına göre maksimum net ısı yayılımı oranının elde edildiği krank mili açısı değerleri çok fazla değişmemiştir.

3.3 Efektif güç

Şekil 5'te efektif gücün, kullanılan yakıt türüne (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) ve devir sayısına (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) göre değişimi verilmiştir. Devir sayısı arttıkça efektif güç, tüm yakıt türü için artmıştır. Maksimum efektif güç değerleri 2200 devir/dakikada, DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımı için sırasıyla 5.1104 kW, 5.3485 kW, 5.2340 kW, 5.2271 kW, 5.0659 kW, 5.0129 kW ve 4.8356 kW olarak elde edilmiştir. Yakıtların maksimum efektif güç değerleri incelendiğinde, en yüksek değer DGDE4 kullanımında (5.3485 kW) elde edildiği görülmektedir. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6 ve DGDE8 kullanıldığında ortalama (devir sayısına göre) olarak efektif güçte, sırasıyla %2.56, %0.82 ve %0.32 oranlarında artış elde edilmiştir. Bu artış, tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasından ve karışım yakıtlarının yapılarında bulunan oksijen nedeniyle yanmanın iyileşip silindir basıncı değerlerinin yükselmesinden kaynaklanmaktadır. Fakat yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça efektif güçteki ortalama artış oranı azalmaktadır. Nitekim DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımında ortalama olarak efektif güçte, sırasıyla %2.43, %2.88 ve %7.36 oranlarında azalma

tespit edilmiştir. Bu azalma, söz konusu karışımların (DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) ısı değerlerinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça ısı değer azaldığı için efektif güçteki ortalama azalma artmıştır.

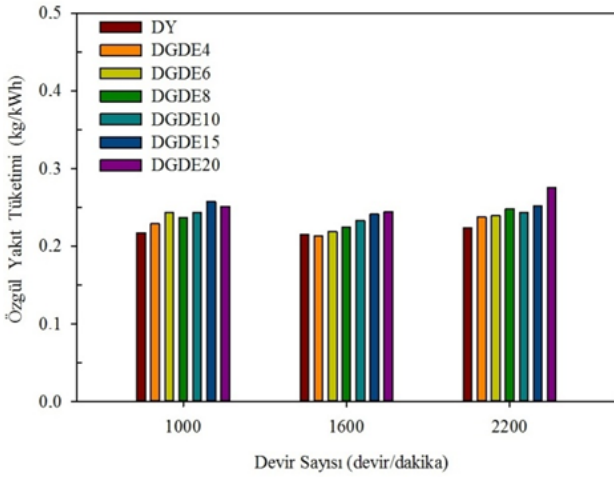


Şekil 5. Devir sayısı ve yakıt türüne göre efektif güçteki değişim

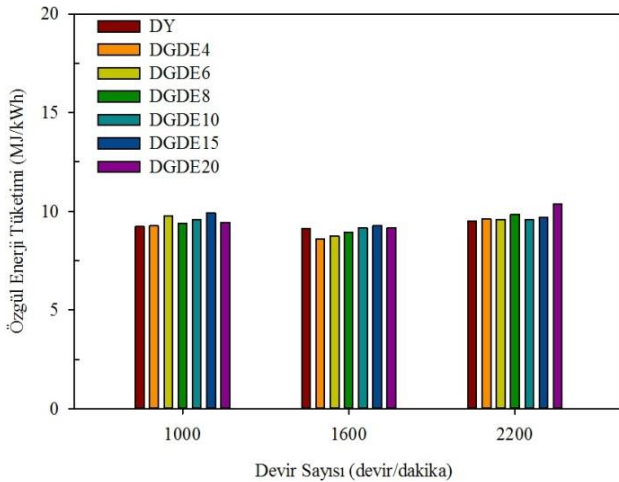
3.4 Özgül yakıt tüketimi ve özgül enerji tüketimi

Şekil 6 ve Şekil 7'de, tüm test yakıtları (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE 20) için özgül yakıt tüketiminin ve özgül enerji tüketiminin devir sayısına (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) göre değişimleri verilmiştir. Tüm test yakıtları için devir sayısının artışıyla özgül yakıt tüketiminin ve özgül enerji tüketiminin önce azalıp 1600 devir/dakikada minimum değerler aldığı belirlenmiştir. Örneğin, DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımı için sırasıyla minimum özgül yakıt tüketimi değerleri 0.2145 kg/kWh, 0.2125 kg/kWh, 0.2183 kg/kWh, 0.2248 kg/kWh, 0.2327 kg/kWh, 0.2410 kg/kWh ve 0.2439 kg/kWh olarak; minimum özgül enerji tüketimi değerleri ise 9.1266 MJ/kWh, 8.6006 MJ/kWh, 8.7551 MJ/kWh, 8.9363 MJ/kWh, 9.1647 MJ/kWh, 9.2746 MJ/kWh ve 9.1694 MJ/kWh olarak belirlenmiştir. En düşük minimum özgül yakıt tüketiminin ve özgül enerji tüketiminin, DGDE4 (0.2125 kg yakıt/kWh ve 8.6006 MJ/kWh) kullanımında elde edildiği belirlenmiştir. Devir sayısının (1600 devir/dakikadan 2200 devir/dakikaya) artışıyla birlikte özgül yakıt tüketimi ve özgül enerji tüketimi artmıştır. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında ortalama (devir sayısına göre) olarak sırasıyla özgül yakıt tüketimi %3.65, %6.98, %8.28, %9.84, %14.52 ve %17.60 oranlarında artmıştır. Karışım yakıtlarının alt ısı değerleri dizel yakıtına göre daha düşük olduğundan (Tablo 3) dolayı karışım yakıtları kullanıldığında aynı motor gücünü elde etmek için silindir içerisine daha fazla yakıt gönderilir. Ayrıca, karışım yakıtlarının yoğunlukları daha fazla olduğu için (Tablo 3) kullanıldıklarında yanma odasına kütlece daha fazla yakıt gönderilmiş olur. Bu nedenlerden dolayı DY kullanımına göre özgül yakıt tüketimi artmıştır. Ayrıca, dizel

yakıtına kıyasla, DGDE'nin ısı değeri düşük ve yoğunluğu yüksek olduğu için karışım bileşimindeki DGDE oranı arttıkça özgül yakıt tüketimindeki ortalama artış artmıştır. Özgül enerji tüketimi, özgül yakıt tüketimi ile alt ısı değerinin çarpımına eşittir. Dizel yakıtına kıyasla DGDE4 kullanıldığında, özgül yakıt tüketimi ortalama olarak %3.65 oranında artarken, DGDE4'ün alt ısı değeri %4.8420 (Tablo 3) oranında azaldığı için özgül enerji tüketimi (ortalama olarak %1.37 oranında) azalmıştır. Diğer bir anlatımla, DGDE4'ün yapısında bulunan oksijen nedeniyle yanmanın iyileştiği ve bu yüzden özgül yakıt tüketiminin (alt ısı değerinin azalmasına rağmen) çok fazla artmadığı yorumlanmıştır. Böylece DGDE4 kullanıldığında, dizel yakıtına göre özgül enerji tüketiminde ortalama olarak bir azalma görülmüştür. Diğer taraftan, DGDE'nin karışım içerisindeki yüzdesi arttıkça, özgül yakıt tüketimindeki artışın daha baskın hale gelip, özgül enerji tüketiminin sırasıyla DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımında ortalama (devir sayısına göre) olarak %0.87, %1.17, %1.69, %3.60 ve %3.92 oranlarında arttığı hesaplanmıştır.



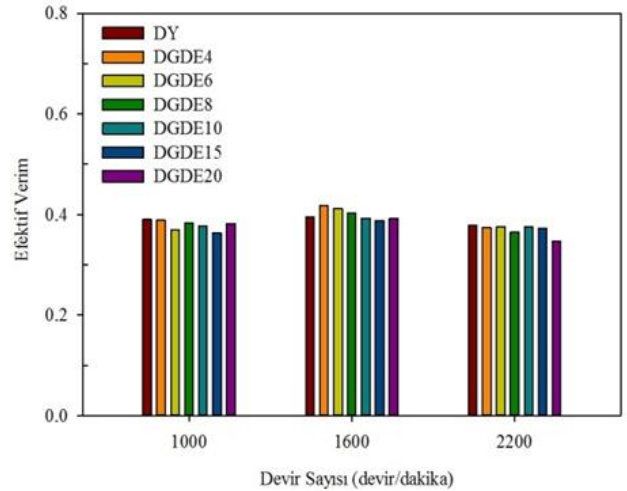
Şekil 6. Devir sayısı ve yakıt türüne göre özgül yakıt tüketimindeki değişim



Şekil 7. Devir sayısı ve yakıt türüne göre özgül enerji tüketimindeki değişim

3.5 Efektif verim

Şekil 8'de devir sayısına bağlı olarak (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) farklı test yakıtlarının (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) efektif verime olan etkileri verilmektedir. Tüm test yakıtları için efektif verimin, devir sayısının artışıyla önce arttığı ve 1600 devir/dakikada maksimum değerler aldığı tespit edilmiştir. DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımında maksimum efektif verim değerleri 0.3945, 0.4186, 0.4112, 0.4028, 0.3928, 0.3882 ve 0.3926 olarak hesaplanmıştır. En yüksek efektif verim, DGDE4 (0.4186) kullanımında elde edilmiştir. Devir sayısı 1600 devir/dakikadan 2200 devir/dakikaya artırıldığında; mekanik kayıpların artışı, yanma için daha kısa sürenin kalması, soğutmanın güçleşmesi ve nihayetinde özgül yakıt tüketiminin artışıyla (Şekil 6) efektif verim, tüm yakıtlar için azalmıştır. Deneylerde kullanılan dizel motor, DGDE4 ile çalıştırıldığında dizel yakıtına kıyasla, özgül yakıt tüketimi (ortalama olarak %3.65 oranında) artmasına rağmen, efektif verim ortalama (devir sayısına göre) olarak %1.49 oranında artmıştır. Bu artışın sebebi olarak alt ısı değerinin azalması ve DGDE4'ün yapısındaki oksijen nedeniyle yanmanın iyileşmesi gösterilebilir. Fakat DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanımı ile efektif verim ortalama olarak %0.71, %1.10, %1.64, %3.41 ve %3.65 oranlarında azalmıştır. Bu azalma daha önceden belirtilen nedenlerden dolayı özgül yakıt tüketimindeki ortalama artışın (Şekil 6) bir neticesidir. Efektif verimdeki azalma Varuvel vd. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da tespit edilmiştir.

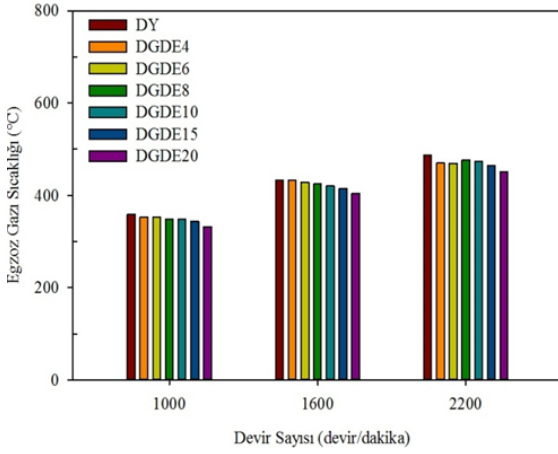


Şekil 8. Devir sayısı ve yakıt türüne göre efektif verimdeki değişim

3.6 Egzoz gazı sıcaklığı

Şekil 9'da egzoz gazı sıcaklığının devir sayısı (1000 devir/dakika, 1600 devir/dakika ve 2200 devir/dakika) ve yakıt türü (DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) ile değişimi görülmektedir. Tüm yakıt türleri için devir sayısı arttıkça egzoz gazı sıcaklığı artmıştır. Yakıtların maksimum egzoz gazı sıcaklığı değerleri incelendiğinde, en yüksek değer DY kullanımında (487.94 °C) elde edildiği belirlenmiştir. DY

kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında ortalama (devir sayısına göre) olarak egzoz gazı sıcaklığında sırasıyla %1.75, %2.21, %2.46, %3.06, %4.40 ve %7.34 oranlarında azalma tespit edilmiştir. Egzoz gazı sıcaklığındaki ortalama azalma, yakıt karışımındaki DGDE oranı arttıkça artmaktadır. Karışım yakıtları kullanıldığında silindir sıcaklığının azalmasına (Şekil 2) neden olan faktörler (ısıl değer ve buharlaşma ısısı), egzoz gazı sıcaklığının da azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, daha önceden bahsedildiği gibi, DGDE'nin setan sayısının yüksek olması nedeniyle karışım yakıtları kullanıldığında tutuşma gecikmesi süresi kısalmıştır. Bu durum, yanmanın genişleme strokunun sonlarına doğru kaymasını engellediğinden dolayı egzoz gazı sıcaklığı azalmıştır. Egzoz gazı sıcaklığındaki azalma Varuvel vd. [15] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da tespit edilmiştir.



Şekil 9. Devir sayısı ve yakıt türüne göre egzoz gazı sıcaklığındaki değişim

3.7 Maksimum silindir sıcaklığı ve ilgili krank mili açısı değerlerinin interpolasyon ve ekstrapolasyon ile tahmini

Bu kısımda, 1000 devir/dakika için tüm test yakıtlarının maksimum silindir sıcaklığı ve ilgili (silindir sıcaklığının maksimum olduğu) krank mili açısı değerleri Denklem (13-24) kullanılarak belirlenmiştir. Denklem (13-24)'te verilen (x_0, x_1, \dots, x_n) krank mili açısı değerlerini; (y_0, y_1, \dots, y_n) ise deneysel olarak belirlenen silindir sıcaklığı değerlerini temsil etmektedir. Bir fonksiyonun maksimum değer aldığı noktada 1. türevi sıfır, 2. türevi ise sıfırdan küçüktür. Dolayısıyla, Denklem (14) sifıra eşitlenmiş ve aralığı ikiye bölme yöntemiyle silindir sıcaklığının maksimum olduğu krank mili açısı değerleri (1. türevi sıfır yapan x değerleri) sayısal olarak (interpolasyon tekniği ile) belirlenmiştir. Aralığı ikiye bölme yöntemi için MATLAB yazılımında bir program yazılmış ve 10^{-11} hassasiyetinde kök değerleri (1. türevi sıfır yapan değerler) belirlenmiştir. Belirlenen krank mili açısı değerleri Denklem (15)'te kullanılarak 2. türevin sıfırdan küçük olduğu görülmüştür. Aralığı ikiye bölme yöntemiyle hesaplanan krank mili açısı değerleri Denklem (13)'te yerine yazılarak maksimum silindir sıcaklığı değerleri her bir test yakıtı için (ekstrapolasyon tekniği ile)

tahmin edilmiştir. İnterpolasyon için $12^\circ, 14^\circ, 16^\circ$ ve 18° ; ekstrapolasyon için $20^\circ, 22^\circ, 24^\circ$ ve 26° krank mili açısındaki sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Tablo 6'da 1000 devir/dakikada tüm test yakıtları için deneysel veriler (maksimum silindir sıcaklığı ve maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerleri) ile hesaplanan değerler arasındaki bağıl hatalar verilmiştir. 1000 devir/dakikadaki maksimum silindir sıcaklığı ve ilgili krank mili açısı değerleri DY, DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 için sırasıyla 2163.6345 K (17°), 1998.9235 K (15°), 2022.4433 K (16°), 2036.3711 K (17°), 1990.2303 K (16°), 1892.8093 K (15°) ve 2024.2936 K (16°) olarak deneysel belirlenmiştir. Maksimum silindir sıcaklığının ve maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısının tahmininde sırasıyla %0.9103 ve %2.5027 oranlarında ortalama bağıl hatalar hesaplanmıştır.

Tablo 6. Tüm test yakıtları için deneysel veriler ile hesaplanan değerler arasındaki bağıl hatalar

Yakıt	Gerçek bağıl hata (%)	
	Maksimum silindir sıcaklığı (K)	Krank mili açısı (derece)
	Denklem (13)	Denklem (14)
DY	0.0589	1.6618
DGDE4	1.9463	3.4907
DGDE6	0.3178	3.0644
DGDE8	1.4387	3.4571
DGDE10	0.0818	3.1225
DGDE15	0.9319	1.7240
DGDE20	1.5966	0.9981
	Ortalama: 0.9103	2.5027

3.8 Silindir sıcaklığı için 3-boyutlu denklemin elde edilmesi

Bu bölümde, DY ve (DGDE içeren) üçlü karışım yakıtları kullanıldığında elde edilen silindir sıcaklığı değerlerinin krank mili açısı ve devir sayısına göre değişimine, en küçük kareler regresyonu yöntemi yardımıyla 3-boyutlu denklem uyumlanmıştır:

$$f(x_1, x_2) = \frac{a + b \cdot x_1 \cdot x_2^2}{1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_2^2} + e \cdot x_2 \quad (25)$$

Yukarıdaki denklemde, $f(x_1, x_2)$ silindir sıcaklığını (K), x_1 devir sayısını (devir/dakika) ve x_2 krank mili açısını temsil etmektedir. Ayrıca, a, b, c, d ve e regresyon katsayılarıdır. Uyumlanan denklem için regresyon katsayıları, determinasyon katsayıları (r^2) ile ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri arasındaki gerçek (bağıl) hata oranlarının ortalamaları Tablo 7'de verilmiştir. En düşük determinasyon katsayısının 0.9299 ve en yüksek ortalama hatanın %4.9044 olduğu dikkate alındığında; uyumlanan 3-boyutlu denklemin, silindir sıcaklığının krank mili açısı ve devir sayısına göre değişimini iyi temsil ettiği söylenebilir. Farklı araştırmacılar [41-46] tarafından dizel yakıtı kullanılarak değişik çalışma koşulları için deneysel olarak belirlenen silindir sıcaklığı değerleri de 3-boyutlu denklem yardımıyla tahmin edilmiştir. Hata oranları (ölçülen sıcaklık değeri ile hesaplanan sıcaklık değeri arasındaki) hesaplanmış ve Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 7. Regresyon katsayıları, determinasyon katsayıları ve ortalama gerçek hata oranları

Yakıt	Regresyon katsayıları					Determinasyon katsayısı (r ²)	Ortalama gerçek hata oranı (%)
	a	b	c	d	e		
DY	0.1516e4	0.1873e-3	-0.2685e-1	0.7794e-3	0.7383e1	0.9609	3.5000
DGDE4	0.1426e4	0.2373e-3	-0.2868e-1	0.9077e-3	0.7251e1	0.9403	4.5476
DGDE6	0.1435e4	0.1669e-3	-0.2729e-1	0.8313e-3	0.8323e1	0.9514	3.8517
DGDE8	0.1429e4	0.1342e-3	-0.2649e-1	0.7747e-3	0.8915e1	0.9435	4.1675
DGDE10	0.1412e4	0.1846e-3	-0.2733e-1	0.8258e-3	0.761e1	0.9533	3.8581
DGDE15	0.1377e4	0.2487e-3	-0.2921e-1	0.92599e-3	0.6211e1	0.9335	4.9044
DGDE20	0.1395e4	0.1395e-3	-0.2565e-1	0.7701e-3	0.8701e1	0.9299	4.3541

Tablo 8. Ref. [41-46]'da kullanılan motorların özellikleri ve çalışma koşulları ile 3-boyutlu denklemin hata oranları

Ref.	Motorun teknik özellikleri	Devir sayısı ve yük	Krank mili açısı (derece)	Gerçek hata oranı (%)	
[41]	Tek silindirli, dört-zamanlı, doğal emişli	1500 devir/dakika, %100	62	4.1936	
[42]	Tek silindirli, dört-zamanlı, su soğutmalı, direkt-püskürtmeli	1500 devir/dakika, %100	-2 -6 -9 -8 -7 -6 11 12 13 14 15 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65	3.9020 0.2469 2.3080 0.7210 3.7436 3.4934 4.2301 2.7790 1.0649 0.8131 2.9284 3.1794 3.8556 4.3373 4.4855 4.6496 4.5023 4.5512 4.7896 4.4126 4.4589	
[43]	Tek silindirli, dört- zamanlı, su soğutmalı, doğal emişli, direkt- püskürtmeli	1000 devir/dakika, %100	15 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65	2.9284 3.1794 3.8556 4.3373 4.4855 4.6496 4.5023 4.5512 4.7896 4.4126 4.4589	
[44]	Altı silindirli, dört- zamanlı, turbo şarjlı	1400 devir/dakika	0.16 MPa ortalama efektif basınç 0.48 MPa ortalama efektif basınç 0.81 MPa ortalama efektif basınç 1.3 MPa ortalama efektif basınç	-13 -13 -12 -13 -12 -11 -10 -10 -9 -8 -11 -10 -9 -8 0 1 2 3 -13 -12 -11 -10 -9 -8 -7 7 8 9 10 11 12 13	3.4421 1.6743 4.2899 4.5445 1.8426 1.4762 4.4401 4.4695 1.7611 1.6261 4.3396 2.4575 3.4956 4.3668 3.1245 0.8950 2.0010 4.3542 2.4040 4.6403 2.4502 2.9954 3.5119 0.9652 2.8197 3.9715 2.3282 0.5911 0.2393 1.1667 3.1710 3.7548
[45]	Tek silindirli, dört-zamanlı, hava soğutmalı, direkt-püskürtmeli, doğal emişli	1500 devir/dakika	%25 %75	-13 -12 -11 -10 -9 -8 -7 7 8 9 10 11 12 13	2.4040 4.6403 2.4502 2.9954 3.5119 0.9652 2.8197 3.9715 2.3282 0.5911 0.2393 1.1667 3.1710 3.7548
[46]	Dört silindirli, dört- zamanlı, su soğutmalı, indirekt-püskürtmeli, doğal emişli	1400 devir/dakika	%100	-12 -11 -10	2.2970 0.3425 3.4340

Hata oranlarının %5'in altında kalması (en yüksek hata oranının %4.7896 olması) nedeniyle, 3-boyutlu denklemin, farklı araştırmacılar tarafından dizel yakıtı için ölçülen silindir sıcaklığı değerlerini de iyi temsil ettiği söylenebilir. Fakat **Denklem (25)**'in genel bir denklem olmadığı ve daha fazla veri ile test edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Mevcut literatürde, dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE karışımları kullanılarak farklı araştırmacılar tarafından deneysel olarak elde edilen silindir sıcaklığı verileri bulunmadığından dolayı, sadece dizel yakıtı kullanılarak farklı araştırmacılar tarafından belirlenen sıcaklık değerleri 3-boyutlu denklem yardımıyla tahmin edilebilmiştir. Diğer bir ifade ile, DGDE içeren karışımların 3-boyutlu denklem yardımıyla silindir sıcaklığı değerlerinin tahmini için sadece sunulan çalışmada elde edilen veriler kullanılabilir.

3.9 Egzoz emisyonları

Motor performansı ve yanma parametreleriyle ilgili elde edilen sonuçlar ile DGDE'nin maliyeti dikkate alınarak, DGDE4, DGDE6, DGDE8 ve DGDE10 karışım yakıtlarının egzoz emisyonları dikkate alınmıştır. DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8 ve DGDE10 kullanıldığında egzoz emisyonlarındaki ortalama (devir sayısına göre) değişimler verilmiştir. Hidrokarbon, karbonmonoksit, is ve azotoksit emisyonları DGDE4, DGDE6, DGDE8 ve DGDE10 kullanıldığında ortalama olarak sırasıyla % 13.36, % 15.04, % 20.95, % 25.24; % 10.42, % 18.14, % 21.03, % 24.64; % 4.26, % 5.22, % 6.54, % 8.25; ve % 3.33, % 5.76, % 7.37 ve % 8.25 oranlarında azalmıştır. Devir sayısının artışıyla birlikte genellikle, karbonmonoksit ve azotoksit emisyonları azalmış fakat is ve hidrokarbon emisyonları artmıştır. Karışım yakıtlarının ısıl değerleri daha düşük olduğu için yakıt tüketimleri yüksektir ve yanma odasında yakıtça zengin karışım bölgeleri meydana gelir. DGDE ve bitkisel yağın yapısında bulunan oksijen, yerel zengin karışım bölgelerinde oksitlenmeyi artırarak hidrokarbon ve karbonmonoksit emisyonlarının azalmasına neden olmuş olabilir. DGDE'nin karbon/hidrojen oranının düşük olması, bu emisyonların azalmasını diğer bir sebebi olabilir. Ayrıca, DGDE içeriğinin artması, karışımın viskozitesinin azalmasına ve atomizasyonun iyileşmesine neden olduğu için karışım yakıtları kullanıldığında karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonları ortalama olarak azalmıştır. DGDE ve bitkisel yağın oksijen içeriği, difüzyon yanma fazında daha fazla partikül maddenin oksitlenmesini sağlayarak is emisyonunun azalmasına neden olmuş olabilir. DGDE ve bitkisel yağın düşük aromatik ve sülfür içeriği nedeniyle de is emisyonunun azaldığı söylenebilir. Emisyonlardaki azalma Nabi vd. [47] tarafından gerçekleştirilen çalışmada da tespit edilmiştir. Azotoksit emisyonundaki azalma; karışımların ısıl değerlerinin düşük, setan sayılarının yüksek olmasına (tutuşma gecikmesi süresinin kısılmasına) ve karışımlar kullanıldığında silindir sıcaklığının azalmasına bağlanabilir. DGDE ve bitkisel yağın düşük aromatik içeriği, azotoksit emisyonundaki azalmanın diğer bir sebebi olabilir [12]. Azotoksit emisyonundaki azalma Referans [15] ve [48]'de verilen çalışmalarda da tespit edilmiştir.

4 Sonuçlar

DY-bitkisel yağ-DGDE üçlü karışımlarının bir dizel motorun performans, yanma ve emisyon karakteristiklerine etkileri farklı devirlerde (1000-2200 devir/dakika) deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, interpolasyon ve ekstrapolasyon teknikleri kullanılarak maksimum silindir sıcaklığı ile maksimum silindir sıcaklığının elde edildiği krank mili açısı değerleri (sayısal olarak) tahmin edilmiştir. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir:

DY kullanımına göre DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında ortalama olarak; tutuşma gecikmesi (%2.63-%8.07) kısalmış, egzoz gazı sıcaklığı (% 1.75-% 7.34) azalmış, özgül yakıt tüketimi (%3.65-%17.60) artmış ve maksimum silindir sıcaklığı (%5.62-%9.59) azalmıştır.

Maksimum silindir basıncı ve efektif güç; DGDE4, DGDE6 ve DGDE8 kullanıldığında ortalama olarak %1.07-%2.04 ve %0.32-%2.56 aralığında artmıştır. DGDE10, DGDE15 ve DGDE20 kullanıldığında ise ortalama olarak maksimum silindir basıncı (%0.82-%2.71) ve efektif güç (%2.43-%7.36) azalmıştır. DGDE4 kullanıldığında ortalama olarak, özgül enerji tüketimi (% 1.37) azalırken, efektif verim (%1.49) artmıştır. Diğer karışım yakıtları (DGDE6, DGDE8, DGDE10, DGDE15 ve DGDE20) için ise ortalama olarak, özgül enerji tüketimi (%0.87-%3.92) artarken, efektif verim (%0.71-%3.65) azalmıştır.

DGDE4, DGDE6, DGDE8, DGDE10 ve DGDE15 kullanıldığında maksimum net ısı yayılımı oranı (ortalama olarak %1.18-%7.68 aralığında) artarken, DGDE20 kullanıldığında (ortalama olarak %2.97 oranında) azalmıştır.

İnterpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleriyle maksimum silindir sıcaklığı ve ilgili krank mili açısı değerlerinin tahmininde ortalama hata oranı, %0.9103 ve %2.5027 olarak hesaplanmıştır.

DY kullanımına göre, DGDE4, DGDE6, DGDE8 ve DGDE10 kullanıldığında ortalama olarak sırasıyla hidrokarbon emisyonu %13.36, %15.04, %20.95, %25.24; karbonmonoksit emisyonu %10.42, %18.14, %21.03, %24.64; is emisyonu %4.26, %5.22, %6.54, %8.25 ve azotoksit emisyonu %3.33, %5.76, %7.37 ve %8.25 oranlarında azalmıştır.

DGDE içeren karışım yakıtları ve DY kullanıldığında elde edilen silindir sıcaklığı değerleri, 3-boyutlu denklem (**Denklem (25)**) yardımıyla hesaplanmış ve en düşük determinasyon katsayısının 0.9299 ile en yüksek ortalama hatanın %4.9044 olduğu belirlenmiştir. Farklı araştırmacılar tarafından değişik çalışma koşulları altında dizel yakıtı kullanılarak elde edilen silindir sıcaklığı değerlerinin 3-boyutlu denklem yardımıyla tahmininde ise en yüksek hata oranı %4.7896 olarak hesaplanmıştır.

DGDE4 kullanıldığında maksimum silindir basıncı, maksimum net ısı yayılımı oranı, efektif güç ve efektif verim artarken özgül enerji tüketimi, tutuşma gecikmesi ve emisyonlar azaldığı için DGDE4 dizel yakıtına alternatif bir yakıt olarak önerilebilir. DGDE4 ekonomik açıdan da diğer karışım yakıtlarına göre daha uygundur.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında; DGDE4 karışım yakıtı, taşıt motorlarında test edilebilir ve motor parçalarına olan etkileri incelenebilir. Ayrıca, sıkıştırma oranı, püskürtme avansı, püskürtme basıncı, enjektör delik çapı ve yakıt sıcaklığı gibi parametrelerin (performans, yanma ve emisyonlara) etkileri incelenerek DGDE4 için en uygun çalışma koşulları belirlenebilir.

Semboller ve kısaltmalar

a, b, c, d ve e	: Regresyon katsayıları
B	: Toplam yakıt tüketimi (kg yakıt/saat)
$b_{e,enerji}$: Özgül enerji tüketimi (MJ/kWsaat)
$b_{e,yakıt}$: Özgül yakıt tüketimi (kg yakıt/kWh)
BYBD	: Badem yağı biyodizeli
BYBD90DMK10	: Hacimsel olarak %90 BYBD ve %10 dimetil karbonat içeren yakıt karışımı
BYBD80DMK20	: Hacimsel olarak %80 BYBD ve %20 dimetil karbonat içeren yakıt karışımı
CIBD	: Calophyllum Inophyllum bitkisi tohumundan üretilen biyodizel
CIBD90O10	: Hacimsel olarak %90 CIBD ve %10 1-oktanol içeren yakıt karışımı
CIBD80O20	: Hacimsel olarak %80 CIBD ve %20 1-oktanol içeren yakıt karışımı
CIBD70O30	: Hacimsel olarak %70 CIBD ve %30 1-oktanol içeren yakıt karışımı
CIBD60O40	: Hacimsel olarak %60 CIBD ve %40 1-oktanol içeren yakıt karışımı
CIBD50O50	: Hacimsel olarak %50 CIBD ve %50 1-oktanol içeren yakıt karışımı
DBE5	: Hacimsel olarak %80 dizel yakıtı, %15 atık kızartma yağı biyodizeli ve %5 dibutil eter içeren yakıt karışımı
DGDE	: Dietilen glikol dimetil eter
DGDE4	: Hacimsel olarak %4 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DGDE6	: Hacimsel olarak %6 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DGDE8	: Hacimsel olarak %8 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DGDE10	: Hacimsel olarak %10 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DGDE15	: Hacimsel olarak %15 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DGDE20	: Hacimsel olarak %20 DGDE içeren dizel yakıtı-bitkisel yağ-DGDE yakıt karışımı
DMK	: Dimetil karbonat
DY	: (Sunulan çalışma kullanılan) dizel yakıtı
EHS5	: Hacimsel olarak %80 dizel yakıtı, %15 atık kızartma yağı biyodizeli ve %5 2 etilheksanol içeren yakıt karışımı
H_u	: Alt ısı değer (kJ/kg)

KMA	: Krank mili açısı (θ , derece)
k	: Özgül ısıların oranı
M_d	: Döndürme momenti (Nm)
N_e	: Efektif güç (kW)
n	: Devir sayısı (devir/dakika)
OTN5	: Hacimsel olarak %80 dizel yakıtı, %15 atık kızartma yağı biyodizeli ve %5 1-oktanol içeren yakıt karışımı
P	: Silindir basıncı (Pa)
R	: Ölçülen veya hesaplanan hedef fiziksel büyüklük
r^2	: Determinasyon katsayısı
SS	: Setan sayısı
V	: Silindir hacmi (m^3)
Q_{net}	: Yakıtın yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile silindir duvarlarına transfer olan ısı enerjisi arasındaki fark (J)
$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$: Belirsizlik analizi için bağımsız değişkenler
w_1, w_2, \dots, w_n	: Bağımsız değişkenlere ait belirsizlikler
w_R	: R büyüklüğünün belirsizliği
χ	: Karışım bileşeninin hacimsel oranı (%)
ω	: Krank milinin açısal hızı (1/s)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
η_e	: Efektif verim
$\Delta y_{-1}, \Delta y_0, \Delta y_1$: Birinci mertebeden ileri sonlu fark ifadeleri
$\Delta^2 y_{-1}, \Delta^2 y_0$: İkinci mertebeden ileri sonlu fark ifadeleri
$\Delta^3 y_{-1}$: Üçüncü mertebeden ileri sonlu fark ifadesi

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] G. Knothe, J.V. Gerpen, and J. Krahl, The Biodiesel Handbook. AOCS Press, Illinois (USA), 2005.
- [2] E. Aytav and G. Kocar, Biodiesel from the perspective of Turkey: past, present and future. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 335-350, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.018>.
- [3] A. E. Özçelik, M. Acaroğlu and H. Köse, Determination of combustion characteristics of olive pomace biodiesel-Eurodiesel fuel mixtures. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42, 1476-1489, 2020. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1604862>.
- [4] H. M. Mahmudul, F. Y. Hagos, R. Mamat, A. Abdul Adam, W. F. W. Ishak and R. Alenezi, Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 72, 497-509, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>.
- [5] V. Mittal, K. N. Talapatra and U. K. Ghosh, A comprehensive review on biodiesel production from microalgae through nanocatalytic transesterification process: lifecycle assessment and methodologies.

- International Nano Letters, 12, 351–378, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40089-022-00372-2>.
- [6] H. A. R. Allami and H. Nayebzadeh, The assessment of the engine performance and emissions of a diesel engine fueled by biodiesel produced using different types of catalyst. *Fuel*, 305, 121525, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121525>.
- [7] W.W. Pulkrabek, İçten Yanmalı Motorlar Mühendislik Temelleri (Çeviri Editörü: Doç. Dr. Halit Yaşar). Güven Kitabevi, İzmir, 2016.
- [8] A. Yakın, R. Behçet, H. Solmaz and S. Halis, Testing sodium borohydride as a fuel additive in internal combustion gasoline engine. *Energy*, 254, 124300, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124300>.
- [9] A. Yakın and R. Behçet, Effect of different types of fuels tested in a gasoline engine on engine performance and emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 33325-33338, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.133>.
- [10] H. Bayraktar, Experimental and theoretical investigation of using gasoline–ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy*, 30, 1733-1747, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.01.006>.
- [11] C.E. Mortimer, Modern Üniversite Kimyası, Cilt 2 (Çeviri Editörü: Prof. Dr. Turhan Altınata). Çağlayan Basımevi, İstanbul, 1999.
- [12] S. Sivanathan and H. P. Chandran, Investigation on the performance and emission characteristics of biodiesel and its blends with oxygenated additives in a diesel engine. *SAE Technical Paper*, 2014-01-1261, 1-11, 2014. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1261>.
- [13] D. Yage, Z. Junjie, C. C. Shun, M. Xuelong, Z. Jinbao, P. Haiyong and W. Tao, Comparative study on combustion and particulate emissions for diesel-biodiesel and diesel-diglyme blends. *Fuel*, 313, 122710, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122710>.
- [14] S.C. Gad, Bis (2-Methoxyethyl) Ether. In: Wexler, P. (ed.), *Encyclopedia of Toxicology* (Third Edition), Elsevier (Academic Press), pp. 509-511, 2014.
- [15] E. G. Varuvel, T. Subramanian and P. Khatri, Effect of diglyme addition on performance and emission characteristics of hybrid minor vegetable oil blends (rubber seed and babassu oil) in a tractor engine – an experimental study. *Biofuels*, 11, 829-837, 2020. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1418568>.
- [16] B. Ashok, K. Nanthagopal, V. Anand, K. M. Aravind, A. K. Jeevanantham and S. Balusamy, Effects of n-octanol as a fuel blend with biodiesel on diesel engine characteristics. *Fuel*, 235, 363-373, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.126>.
- [17] Y. Devarajan, Experimental evaluation of combustion, emission and performance of research diesel engine fuelled di-methyl-carbonate and biodiesel blends. *Atmospheric Pollution Research*, 10, 795-801, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.12.007>.
- [18] M. N. Nabi, M. G. Rasul and R. J. Brown, Influence of diglyme addition to diesel-biodiesel blends on notable reductions of particulate matter and number emissions. *Fuel*, 253, 811-822, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.072>.
- [19] S. S. Ali and M. R. Swaminathan, Effective utilization of waste cooking oil in a diesel engine equipped with CRDi system using C8 oxygenates as additives for cleaner emission. *Fuel*, 275, 118003, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118003>.
- [20] S. Simsek and S. Uslu, The effect of using amyl alcohol in a diesel engine on performance and emission parameters. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 5(1), 19-26, 2021. <http://doi.org/10.30939/ijastech..816698>.
- [21] M. Anwar, M. G. Rasul, N. Ashwath and M. M. K. Bhuiya, Ternary or binary blend? A case study using papaya seed oil biodiesel. *AIP Conference Proceedings*, 2324(050010), 1-7, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0039519>.
- [22] A. N. Bhatt and N. Shrivastava, Experimental investigation and neural network modelling of diesel engine using hexanol blended ternary waste cooking oil biodiesel with moderate preheating. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102285, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102285>.
- [23] S. Simsek, Effects of biodiesel obtained from canola, sefflower oils and waste oils on the engine performance and exhaust emissions. *Fuel*, 265, 117026, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117026>.
- [24] Q. Wang, J. Ni and R. Huang, The potential of oxygenated fuels (n-octanol, methylal, and dimethyl carbonate) as an alternative fuel for compression ignition engines with different load conditions. *Fuel*, 309, 122129, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122129>.
- [25] S. SenthilKumar and K. Rajan, Performance and emission characteristics of diesel engine using biodiesel with the effect of dimethyl carbonate (DMC) fumigation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 2986-2998, 2022. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1654565>.
- [26] M. Anwar, M. G. Rasul and N. Ashwath, The synergistic effects of oxygenated additives on papaya biodiesel binary and ternary blends. *Fuel*, 256, 115980, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115980>.
- [27] Y. Di, C. S. Cheung and Z. Huang, Experimental investigation of particulate emissions from a diesel engine fueled with ultralow-sulfur diesel fuel blended with diglyme. *Atmospheric Environment*, 44(1), 55-63, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.039>.
- [28] R. Ennetta, H. S. Soyhan, C. Koyunoğlu and V. G. Demir, Current technologies and future trends for biodiesel production: a review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 15133-15151, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-07121-9>.
- [29] A. Srivastava and R. Prasad, Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(2), 111-133, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00013-1).

- [30] Official Journal of the European Union, Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0030&from=en>, Accessed 10 November 2022.
- [31] Official Journal of the European Union, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0557>, Accessed 10 November 2022.
- [32] H. Bayraktar, An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fuelled with diesel-methanol-dodecanol blends. *Fuel*, 87(2), 158-164, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.021>.
- [33] A. Çakmak, Yakıt olarak biyodizel-dizel yakıtı karışımlarının kullanıldığı tek silindirli bir dizel motoruna ekserji analizinin uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [34] A. Çakmak, Üretilen farklı yakıt katkılarıyla bir dizel motorunun yanma, performans ve emisyon karakteristiklerinin iyileştirilmesinin deneysel incelenmesi. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [35] J.B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, Singapur, 1988.
- [36] M. K. Yeşilyurt, Dizel yakıtına farklı ağır alkoller (1-bütanol, 1-pentanol ve 1-hekzanol) ilave edilmesinin tek silindirli bir dizel motorunun performans, yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerine etkileri. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 397-426, 2020. <https://doi.org/10.29137/umagd.704961>.
- [37] J.P. Holman, Experimental Methods for Engineers 7th edition. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, New York, 2001.
- [38] İ. Karagöz, Sayısal Analiz ve Mühendislik Uygulamaları. Nobel Yayınevi, Ankara, 2014.
- [39] M. Bakioğlu, Sayısal Analiz. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2011.
- [40] M. Fogiel, The Numerical Analysis Problem Solver. Research and Education Association, New Jersey, 1993.
- [41] P. Nautiyal, K. A. Subramanian, M. G. Dastidar and A. Kumar, Experimental assessment of performance, combustion and emissions of a compression ignition engine fuelled with *Spirulina platensis* biodiesel. *Energy*, 193, 116861, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116861>.
- [42] R. S. Gavhane, A. M. Kate, A. Pawar, M. R. Safaei, M. E. M. Soudagar, M. M. Abbas, H. M. Ali, N. R. Banapurmath, M. Goodarzi, I. A. Badruddin, W. Ahmed and K. Shahapurkar, Effect of zinc oxide nano-additives and soybean biodiesel at varying loads and compression ratios on VCR diesel engine characteristics. *Symmetry*, 12(6), 1042, 2020. <https://doi.org/10.3390/sym12061042>.
- [43] W. Mitianiec, Combustion process of direct injected water-coal mixture in diesel engine. *Combustion Engines*, 164(1), 37-43, 2016. <https://doi.org/10.19206/CE-116487>.
- [44] H. Chen, J. He, Y. Chen and H. Hua, Performance of a common rail diesel engine using biodiesel of waste cooking oil and gasoline blend. *Journal of the Energy Institute*, 91, 856-866, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.10.003>.
- [45] M. Nour, A. M. A. Attia and S. A. Nada, Combustion, performance and emission analysis of diesel engine fuelled by higher alcohols (butanol, octanol and heptanol)/diesel blends. *Energy Conversion and Management*, 185, 313-329, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.105>.
- [46] M. Anwar, M. G. Rasul and N. Ashwath, Investigation on the impact of papaya biodiesel-diesel blends on combustion of an agricultural CI engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463, 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012001>.
- [47] M. N. Nabi, M. G. Rasul, S. M. A. Rahman, A. Dowell and Z. D. Ristovski, Study of performance, combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine with tea tree oil-diglyme blends. *Energy*, 180, 216-228, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.070>.
- [48] E. G. Varuvel, A. Sonthalia, T. Subramanian and F. Aloui, NOx-smoke trade-off characteristics of minor vegetable oil blends synergy with oxygenate in a commercial CI engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 35715-35724, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3484-y>.





NACA6412 uçak kanadının aerodinamik parametrelerinin araştırılması

Investigation of aerodynamic parameters of NACA6412 aircraft wing

Mustafa Başekin^{1,*} , Ramazan Selver² 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Öz

NACA kanat profilleri, NACA tarafından geliştirilen uçak kanatları için en çok tercih edilen profillerdendir. Bu çalışmada, kanadın farklı hızlardaki hareketinin yanında, hücum açılarında değişiklikler yapılarak aerodinamik parametreler tespit edilmiştir. Kanat üzerinde oluşan kaldırma kuvveti, sürüklenme kuvveti, kanat üzerine tesir eden toplam kuvvet, kanat kök bölgesinde oluşan moment, gerilim değerleri ve kanat üzerindeki sehim verileri elde edilmiştir. Kritik hücum açısından sonra kanadın tepkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, hızın ve hücum açısının artması sonucu kanadın üzerine etkileyen aerodinamik parametrelerde artış görülmüştür. Kritik hücum açısı 16 derece olarak bulunmuştur. Kritik hücum açısının üzerindeki uçuşlarda uçağın kırıma uğrama (stall) ihtimalinin arttığı, yeterli kaldırmanın gerçekleşmemesi gibi durumlar ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Kanat aerodinamiği, NACA 6412 uçak kanadı, Aerodinamik parametreler, Kaldırma katsayısı, Sürtünme katsayısı

1 Giriş

Kanat, düşük sürüklenme ile birlikte yeterli seviyelerde taşıma kuvveti üretmek, uçağın havada kalmasını sağlayan ve hava araçlarında önemli roller üstlenen aerodinamik gövdedir. Kanatlar, yeterli taşımayı elde etmek için, çalışma koşullarına göre farklı tipte kanat profillerinin kullanıldığı sistemlerdir. Çok çeşitli kanat tipleri vardır ve kendine özgü akış davranışları sergilerler. Bu sebeple sürekli olarak incelenmekte ve geliştirilmektedir. Kanat yapısının gelişimi süresince, kanat üzerinde gerekli maksimum taşımayı karşılayabilmek için kanatın alt yüzeyinde yüksek basınçlar, üst yüzey bölgelerindeki düşük basınçlar ile gerçekleşmektedir. Bu basınçlar, kanatın alt yüzey bölgelerinde hava akış hızının düşük, üst yüzey bölgelerinde ise hava akış hızının yüksek olacağını göstermektedir [1]. Kanatlar, aerodinamik, aeroelastik ve tepki kuvvetlerini içeren kompleks koşullarda çalıştırıldığı için, Optimum gereksinimleri sağlayan kanat profilinin tasarımı, günümüze kadar zorluk ortaya çıkarmıştır [2].

Havacılığa başlanan ilk yıllarda, kanat profili tasarımları deneme yanılma yaklaşımı ile oluşturulmuş ve akış alanında test işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonraki süreçte Wright Kardeşler kamburluğa sahip profiller kullanmışlardır [3]. Son zamanlarda, NACA kanat profil sistemi ile rasgele değil,

Abstract

NACA airfoils are one of the most preferred profiles for aircraft wings developed by NACA. In this study, besides the movement of the wing at different speeds, aerodynamic parameters were determined by making changes in the angle of attack. The lift force, drag force, total force acting on the wing, moment formed in the wing root region, stress values and deflection data on the wing were obtained. After the critical attack angle, the response of the wing was examined. According to the results obtained, an increase in the aerodynamic parameters acting on the wing was observed as a result of the increase in speed and angle of attack. The critical angle of attack was found to be 16 degrees. In flights above the critical angle of attack, situations such as the possibility of stalling the aircraft increased and insufficient lift could be achieved.

Keywords: Wing aerodynamics, NACA 6412 aircraft wing, Aerodynamic parameter, Lift coefficient, Drag coefficient

formüller yardımıyla kanat profili üretilmesinde yardımcı bir tanımlama sistemi üretmiştir.

NACA 4-Digit Series, kanatta kullanılan profillerin isimlendirilmesinde dört rakam ile ifade edilir. (örnek: NACA 6412). Bu rakamlardan ilki, kanatın veter doğrusunun yüzde cinsinden maksimum kamburluk değerini verir. İkinci rakam ise maksimum kamburluk konumunu, kanatın veter doğrusunun yüzdesi cinsinden belirtir. Son iki rakam ise, veterin yüzdesi cinsinden, kanatın maksimum kalınlık değerini belirtir. NACA 4412 kanat profili, açıklamalara göre incelendiğinde, birinci ve ikinci rakam 4 olduğu için kambur değeri 4'tür ve kambur konuma, hücum kenarından 4 veter uzaklıktadır. Sonuç olarak, kanat profilinde kamburluk değeri bulunup, kanat asimetrik profile sahiptir. Son hanenin 12 değerinde olması, kanatın sahip olduğu maksimum kalınlığın, veter çizgisinin %12'si olduğunu gösterir [3].

Aerodinamik performans, taşıma ve sürüklenme katsayılarının oranı olarak ifade edilir. Aerodinamik performansı artırmak, kanat profili üzerinde oluşan kaldırma kuvvetinin artırılması ve sürüklenme kuvvetinin azaltılması ile sağlanır. Kanat üzerindeki kaldırma kuvvetini arttırmak, kanat üzerindeki kaldırma kuvvetini arttırmakla sağlanabildiği gibi, kanat profili etrafında bulunan sınır

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mbasekin07@gmail.com (M. Başekin)

Geliş / Received: 04.12.2022 Kabul / Accepted: 23.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1214318

tabaka kalınlığının azaltılması yada türbülansın etkili olduğu sınır tabaka bölgesinin firar kenarına yakın bölgelere taşınması ile sağlanabilir [4]. Aerodinamik performansı arttırmak için, kanatın hücum açısı artırılabilir, kanat profilinin kamburluğu artırılabilir ya da kanatın kaldırma kuvvetini artıracak yüksek kaldırma aygıtları tercih edilebilir. Kanatın hücum açısı, hava ile etkileşimde bulunan hava aracının hız vektörleri ile kanatın veter çizgisi arasında kalan açı olarak tanımlanabilir. Kanatın hücum açısı arttıkça, kanatın kaldırma kapasitesi de artar. Fakat bu hücum açısının belirli bir değeri aşması durumunda, akım çizgileri kanat üzerinden ayrılacaktır. 0° 'lik hücum açısı bulunan bir kanat profilinin firar kenarında, akım ayrılmaları başlar ve kanat arkasında iz bölge oluşur. Hücum açısı arttıkça, kanat üzerindeki ayrılma noktası hücum kenarına doğru yaklaşır. Yaklaşık $12-16^\circ$ 'lık hücum açısı değerine ulaşıldığında, akım ayrılması başlar. Türbülansın görülmeye başladığı bu açıya stall açısı ya da kritik hücum açısı denir [5]. Hücum açısı belirtilen değerlerden fazla artırılması halinde kanatın kaldırma kuvveti azalır, sürüklenme kuvveti hızla artar. Hücum açısının küçülmesiyle azalan kaldırma kuvveti, uçak hızının artırılmasıyla yükseltilir. Bir diğer yaklaşım ise, kamburluğu yüksek olan kanat profillerinin tercih edilmesidir [6]. Uçak kanatlarında genellikle %0-5 arasında kamburluklara rastlanır. Türbin ve kompresörlerde ise uçak kanatlarına göre daha kambur profiller görmek mümkündür. Kanatın kamburluk eğrisi, kanat üst yüzeyi ile kanatın alt yüzeyi arasındaki orta noktaları birleştiren egridir. Kamburluk ise, kamburluk eğrisi ile veter çizgisi arasındaki maksimum mesafedir. Kanat profilinin kamburluğu artırılarak üst yüzeydeki alan artırmakta ve bu alanın artırılması ile kanat profilinin üzerinden geçen havanın hızının artırılması sağlanmaktadır. Havanın hızının artırılması, Bernoulli denkleminde göre, basınç değerini daha fazla düşürmektedir. Böylece kanatın alt yüzeyi ile üst yüzeyi arasında oluşan basınç farkı artmakta ve sonuç olarak kaldırma kuvvetini artırmaktadır [7].

Literatürde, değiştirilmiş kanat kesitleri ve NACA kanat sisteminin kullanıldığı kanat tiplerinin hava akışı karakteristik çalışmaları mevcuttur.

2D NACA 0012 kanat profili CFD çözücüsü kullanılarak, $0-40^\circ$ arasındaki hücum açılarının kullanıldığı kanat üzerindeki etkisi incelenmiştir. [8] NACA 0012 Kanat profilinin kullanıldığı diğer bir çalışma ise, kaldırma ve sürüklenme oranını veren aerodinamik performansı arttırmak için tasarım değişikliği içerir. [9] NACA 0012 kanat profili kullanılan bir diğer çalışmada, destek menteşe konumunun kanat profili üzerine etkisi ele alınmıştır. Analizde transport k-w türbülans modeli kullanılmıştır. Destek menteşenin dikey kullanımı ve pozisyonu, kanat profilinin firar kenarına etkisinin kaldırma kuvvetine pozitif etki ettiği sonucuna ulaşılmıştır. [10] Farklı kanat profili olan NACA 4412 nin kullanıldığı bir çalışmada, CFD kullanılarak aerodinamik katsayılar tespit edilmiştir. Akış ayrılma bölgeleri ve tutunma bölgeleri dikkate alınmıştır. Aerodinamik performansı arttırmak için ön kenarda dikdörtgen yerine kavisli bir tasarım yapılmıştır.[11] Diğer bir NACA 4412 kanat profili ile ilgili çalışmada, farklı hücum açılarında 0.6 sabit Mach hızındaki aerodinamik etkiler incelenmiştir.

Maksimum kaldırma ve kritik hücum açısı tespit edilmiştir. [12] Hücum açısının, Kaldırma, sürüklenme ve basınç dağılımı üzerine etkisi NACA 4415 Uçak kanadı için araştırılmıştır. $-6^\circ - 0^\circ$ ye kadar düşük hücum açısında akış ayrımı tespit edilirken, $12^\circ - 18^\circ$ ye kadar yüksek hücum açılarında ise tam ayrılma gözlemlenmiştir. NACA 2415 kanat profili üzerindeki akış ayrımının geciktirilmesi ve kontrol edilmesi, en iyi yuva konumunu bulmak için incelenmiştir. Kanatta kullanılan destek menteşelerin, Kanat profilinin giriş uzunluğunun 0.3 ile $0.6'$ sındaki konum, uygulama için etkili yuva konumu olduğu tespit edilmiştir. Bu slot modifikasyonu uygulanarak stall açısı 10° dan 16° ya çıkarılmıştır. [10] Ansys Workbench® statik yapısal ve modal analiz araçlarını kullanarak NACA 66-206 kanat profilinin kaldırma sürüklenme kuvvetleri gibi yapısal ve modal özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada Alüminyum 6061 karbon fiber ve güçlü tek yönlü epoksi cam kanat malzemeleri seçilmiştir. Kanat farklı hızlar için ele alınmıştır. Maksimum deformasyon için malzemeler karşılaştırılmıştır. Karbon fiber, Alüminyum ve epoksi cama göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. [13] NACA 2412 kanat profili için aerodinamik analiz yapılmıştır. Akış analizi sonucu olarak basınç ve hız konturları verilmiş ve kanat üzerinde etkili olan gerilmeler gösterilmiştir. [14] Doğrusal yüklemeye farklı olarak, kütle olarak ağır fakat yapısal olarak güçlü olarak tasarlanan bir kanadın, ağırlığını ve aeroelastik tepkisi birlikte optimize edildi. Takviye kullanılmadan önceki tasarıma göre daha hafif olmasının yanında, benzer aeroelastik davranışı sergiledi. [15] Çeşitli bombe şekilleri ile hazırlanan kanatların bir kenarının aeroservoelastik tepkisi incelenmiştir. Burkulma, kanat kök momentleri ve dalgalanmadan kaçınılırken, kanat ağırlığı optimize edilip azaltılmaya odaklanıldı [16].

Bu çalışmada, 3D NACA 6412 Uçak Kanadının Ansys Fluent® Paket programı kullanılarak $0-20$ arasındaki hücum açıları ve $Ma > 0.3$ olan 2 farklı hız değeri için hem CFD analizi, hem de Statik analiz yapıldı. Coupling çözücüsü ile kanat ağırlığı ve ortam şartlarının analize etki etmesi amacıyla değerlerin birleştirilmesi sağlanmıştır. CFD analizi ile kanat üzerindeki hava akımlarının hız dağılımı, basınç konturları, kaldırma ve sürüklenme katsayıları araştırılmıştır. Statik Analiz ile reaksiyon kuvvetleri, reaksiyon momentleri, von mises gerilmeleri, sehim değerleri, toplam kuvvet araştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

Ansys® yazılımı, akış ve statik analizleri nümerik olarak gerçekleştirilebilen yazılımdır. Ansys Fluent®, akış analizi ile farklı faz seviyelerinde materyallere sahip modellemelerin analizlerini gerçekleştirebilme yeteneğine sahip olan bir yazılımdır. Uçak kanadındaki hava akışı, endüstriyel fırınlardaki yanma, kabarcık platformlarının yağ damlacıkları, kan akışından hava akışına kadar, birçok alanda başarı seviyesini yüksek oranlarda gerçekleştiren bir çözüm paketidir. Akış analizleri ve statik analiz ile tasarımların geliştirilmesi süreçlerinde, modellemeler ve simülasyonları yapılarak, ürün geliştirme süreçlerini kısaltmak ve etkili biçimde geliştirme süreçleri ile yürütülme imkanını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, NACA kanat profilinin özelliklerini incelemek için bilgisayar destekli sayısal yöntemler kullanıldı. NACA kanat profili ailesinden 3D NACA 6412 Kanat Geometrisinin akış koşullarını incelemek için Ansys Fluent ve mekanik özelliklerini incelemek için ise Statik Structural yöntemi kullanıldı.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (1)$$

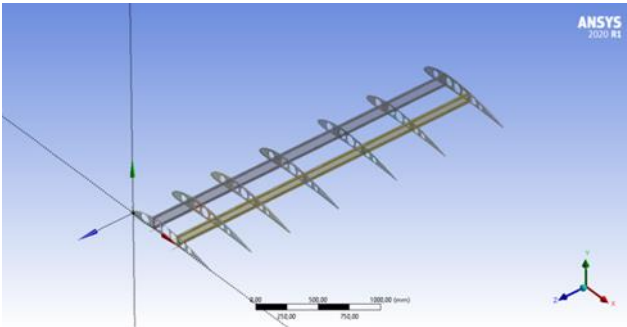
$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2)$$

Denklem (1) ve Denklem (2) Ansys Fluent®'in CFD çözücüsünde kaldırma F_L ve sürüklenme F_D katsayılarını elde etmek için kullandığı denklemlerdir. Burada ρ yoğunluk, v hız ve A alandır [7].

2.1 Kamburluk ve hücum açısı yaklaşımı

Analizi yapılması planlanan kanat profili seçiminde, kanat profili seçimi yapılırken 3 farklı kanat profili üzerinde çalışma yapıldı. Asıl amaç kamburluğu en yüksek olan kanat profilini seçmektir. Kamburluk yaklaşımı için seçilen profiller NACA4412, NACA6409, NACA6412 kanat profilleridir. Kanat profilleri, kamburluk açısından incelendiğinde, kanadın üst yüzey çizgisel uzunluğu, alt yüzeyin çizgisel uzunluğundan daha fazla olan kanatlar içerisinde NACA4412 ve NACA6412, NACA6409 gibi kanatlar öne çıkmaktadır. NACA6412'nin alt yüzey uzunluğu ise NACA4412'ye göre kısadır. Bu sebeple NACA6412'nin kamburluğu daha fazladır. Kamburluğu en fazla olan NACA6412 profili bizim analiz çalışmamız için seçilmiştir. Kamburluk değeri fazla olan profilin hücum açısı '0' olsa bile, yüksek bir kaldırma kuvvetine sahip bir kanattır.

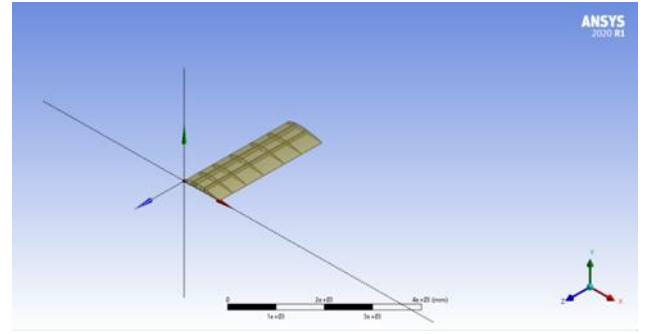
Analizi yapılması planlanan kanat profilinin malzemesi Al 2007-T3 olup eni 900 mm, uzunluğu 3 m olarak tasarım yapıldı. Yapılacak analiz, 3 boyutlu olarak çalışıldı. Analiz yaparken birtakım zorluklar olsa da daha doğru sonuç elde etmek için bu kanat tercih edildi. Hücum açıları, 0-20 arasında farklı değerlerdeki hücum açıları için farklı çözümler yapılması gerektiği kararlaştırıldı.



Şekil 1. Kanat destek profilleri ve profilleri bir arada tutan kanat destek yapısı

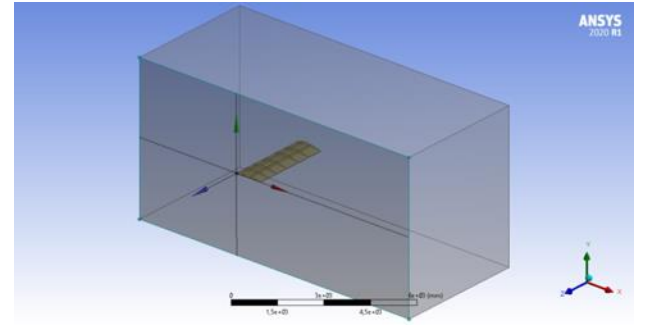
Normal bir kanat yapısında, yaklaşık olarak 15 ile 20 adet arasında kanat destek profili (konsol) bulunmaktadır. Analiz parametrelerinde gereken fazla sayıdaki kanat profilinin bir kısmı ihmal edilip, 7 adet kanat destek profili (konsol) kullanılarak bir tasarım yapıldı. Konsolların mukavemet değerleri dikkate alarak Şekil 1'de görüldüğü gibi irili-ufaklı dairesel kesitli boşluklar oluşturularak kanadın kütleli ağırlığı azaltılmıştır. Oluşturulan bu konsolları bir arada tutacak kanat destek yapısı da Şekil 1'de gösterilmiştir.

Kök kısmına yakın kısımlara daha fazla kanat konsolu eklendi. Çünkü bu kısımlar oldukça yüksek kuvvetlerin tesiri altında kalır ve bu kuvvetlerden meydana gelen gerilimler de oldukça fazla olmaktadır. Bunu düşünerek konsollar değişken aralıklarda tasarlanmıştır. Konsollar kanat profilinin giriş uzunluğunun yaklaşık 0.3 ve 0.6'sındadır [10].



Şekil 2. Kanat tasarımı

Kanat profili üzerine, yaklaşık olarak 2-3 mm et kalınlığında levha ile kaplanmakta olup, bu çalışma için kararlaştırılan kaplama kalınlığı 2 mm standartlara uygun olarak tasarlanan kanat Şekil 2'de gösterilmiştir [10].



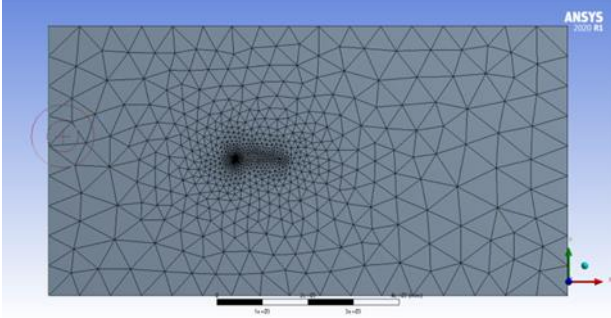
Şekil 3. Hava kanat tabaka

Şekil 3'de kanadın havada gittiği varsayılacak şekilde ve kanadın hava içerisinde kaybolacak şekilde hava tabakası (hava tüneli) oluşturulmuş hali görülmektedir.

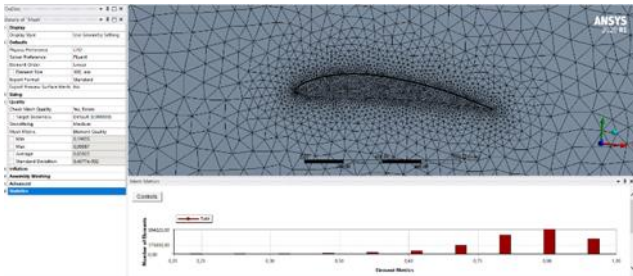
Şekil 4'de hava tabakası (hava tüneli) için; kanata yakın bölgelerde yoğun mesh ataması yapıldı. Bu bölgeler için "sizing" eklemesi yapıldı. "Element sizing" olarak 10 mm şeklinde ayarlandı ve mesh ataması yapıldı.

Şekil 4'de bulunan hava tüneli olarak tanımlanan kontrol hacminde, hava ile kanatın etkileşiminin bulunduğu bölgeler tespit edildi. Bu bölgedeki hacimler, analiz sonuçlarını doğrudan etkileyeceği için, etkileşimin az olduğu bölgelere

oranla daha ince elemanlara ayrıldı. Bu çalışmanın sahip olduğu eleman sayısı 2.811.437 dir.



Şekil 4. Hava tüneli meshing



Şekil 5. Element quality

Yapılan çalışmalardan edinilen bilgiye göre, Element Quality değerinin 0-1 arasında olması gerekmektedir. 1 değerine yakın olması durumunda kaliteli elemanların sayısının fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bu çalışma için Element Quality değeri Şekil 5'te görüldüğü 0.84'tür. Literatürden edinilen bilgiye göre, skewness değeri 0-0.25 arası mükemmel, 0.25-0.50 arası çok iyi, 0.50-0.80 iyi, 0.80-0.94 arası kabul edilebilir ve 0.95-0.97 arası ise kabul edilemezdir. Bu çalışma için skewness değeri 0.22'dir. Elde edilen veriler literatür ile karşılaştırıldığında çalışılan mesh'in kaliteli mesh olduğu sonucuna ulaşılmıştır [18].

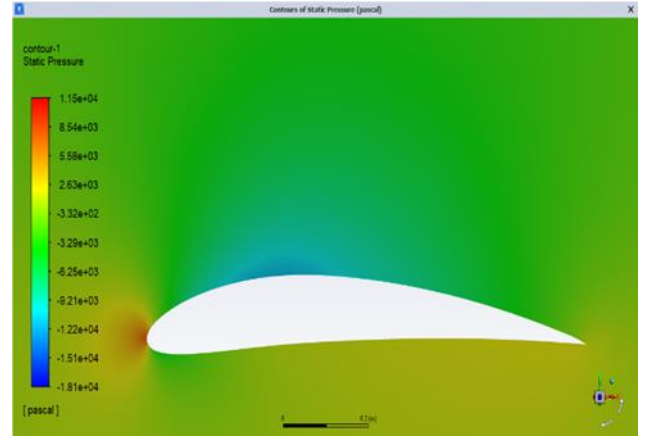
Geometri oluşturulduktan sonra, setup bölümünde kullanılan çözücü tartışıldı. Literatürde CFD de kullanılan birçok akış tipi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada, Deneysel çalışma, Spalart-Allmaras, k-w SST, Realizable k-epsilon türbülans modeli karşılaştırılmıştır. Çalışmaya göre Deneysel sonuçlar ile Realizable k-epsilon türbülans modeli birbirine en yakın değerler ile sonuçlanmıştır. [19] Akış tipi olarak "Laminer", "k-epsilon", "RNG k-epsilon" "Realizable k-epsilon" fikirleri ortaya atıldı "Laminer akış", türbülanslı bölgeler için doğru sonuçlar vermeyeceği için tercih edilmedi. Bu eldeki akış tiplerinden doğru sonucu elde edebilmek ve farklı akış tiplerindeki sonuçları görmek için "RNG k-epsilon" akış tipi seçildi.

Sınır şartları; 500 km/h ve 700 km/h hızları için ayrı ayrı ayarlanarak çözümler gerçekleştirildi. Yüksek Reynolds sayısında, 500km/h için $Re=9 \times 10^6$, 700km/h $Re=1.24 \times 10^7$ değerlerinde kullanılmıştır. [5] Kanat, deniz yüzeyine yakın [20] ve kayıpların ihmal edilebilir olduğu sabit irtifada ve sabit hızlı olarak ayarlanmıştır. Kullanılan hız değerleri $Ma > 0.3$ olduğu için sıkıştırılabilir akış sınırında bulunur. Sıkıştırılabilir akışta ise yoğunluk değişkenlik gösterir. [21]

Havanın, kanada ön kısımdan hız girişi, arka kısmından basınç çıkışı şeklinde etki etmesi ve kanadın diğer bölümlerine simetrik etki etmesi için gerekli başlangıç şartları yapıldı.

CFD çözücüsü kısmında olması gereken sayıda iterasyon gerçekleştirilmiş olup; yaklaşık olarak 25 iterasyon sayısında yakınsama değeri 10^{-4} mertebelerine düştüğü görülmüştür. Bu yakınsama rakamı iyi bir değer olduğu için çözümlerimiz 25 iterasyon değerlerine ayarlanıp CFD analizine başlandı.

CFD analizi tamamlandığında havanın, 2 farklı hız değerlerinde sonuçlar yorumlandı.

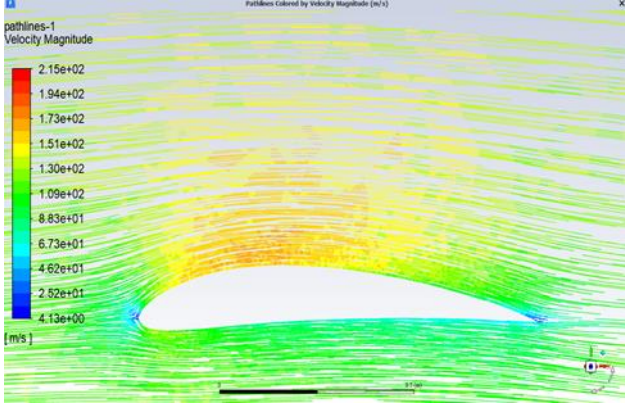


Şekil 6. Hücum açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 km/h hızına sahip NACA6412 kanatın üzerindeki ortalama basınç dağılımı

Hücum açısının $\alpha=0^\circ$ olduğu durumda durma noktasının (stagnation point noktasının) profilin hemen hücum kenarının ortalarında olduğu görülmektedir. Şekil 6'de ise yine NACA6412 kanat profili ve $\alpha=0^\circ$ hücum açısı için hücum kenarı basınç konturları verilmiştir. Şekil 6'de görüldüğü gibi, kanadın hücum kenarına doğru akış hızı azalmaktadır. Durma noktası yakınlardaki akış hızının yavaşlayarak tam durma noktasında sıfır olduğu bu noktada ise basıncın maksimum olduğu diyagramdan izlenebilmektedir. Kanadın hücum kenarındaki durma noktasındaki basınç yükselmesi şöyle izah edilebilir; bu noktaya akışkanlar mekaniğinde bilinen Bernoulli Denklemi uyarlandığında kinetik enerjinin sıfıra gitmesiyle ortada kalan bu kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüşmesine sebep olur. Bu dönüşen enerji ile birlikte kanadın hücum kenarındaki durma noktasındaki basınç yükselmesine neden olur. Bu noktadaki basınç yükselmesi Şekil 6'de görülmektedir. Spektrumda, maviye doğru olan renkler düşük basınç bölgelerini, kırmızıya doğru olan renkler ise yüksek basınç bölgelerini ifade etmektedir. Basınç konturları grafiğinden, kanat profilinin üst yüzeyinde düşük basınç bölgesi ve alt yüzeyinde ise yüksek basınç bölgesi olduğu görülmüştür. Kanat önünde (burun kenarında) ayrıca yüksek basınç bölgesi de (durma noktası) gözlenmiştir.

Şekil 6'de üstteki basınç dağılımında görüldüğü üzere, kanadın en fazla basınç ile karşılaştığı bölge kanadın hava ile ilk etkileşime başladığı ön (burun= hücum) bölgesidir. Daha sonra fazla basıncın etki ettiği bölgeler, kanadın alt kısmındadır. Alt kısmında olması dolayısıyla, kanatta taşıma gözlemlenecektir. Kanadın üst kısmındaki negatif basınç ise

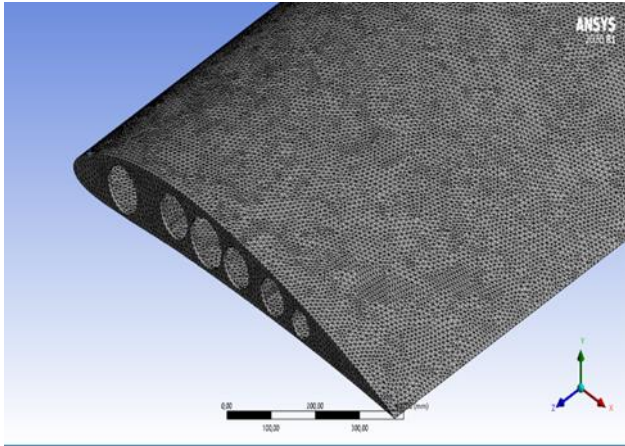
kanadı bir nevi vakum etkisiyle yukarı doğru çekecek olup, bu etki ile kanatta taşıma kapasitesinde artış gerçekleşecektir.



Şekil 7. Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 km/h hızına sahip havanın kanat ile etkileşimi sonrası hava akımlarının hız dağılımı

Şekil 7'deki hız dağılımında görüldüğü üzere; hava akımlarındaki hız dağılımları kanadın üst kısmında oldukça fazladır. Tabi bu kısımda basıncın düşük olmasından dolayı, hız değerlerinin en yüksek seviyelerde görülmesi Bernoulli denkleminin uyarlanmasından doğan bir sonuçtur. Hava akımlarındaki en düşük hız dağılımları ise, kanadın hava ile ilk etkileşimde bulunduğu ön bölgesindedir. Ön bölgedeki basınç en fazla olduğu için (akışkan partiküllerinin durgunluk noktası olduğu için) hız dağılımındaki minimum değerini alacaktır.

Kanadın Statik Yapı Çözümlemesi Bölümünde;



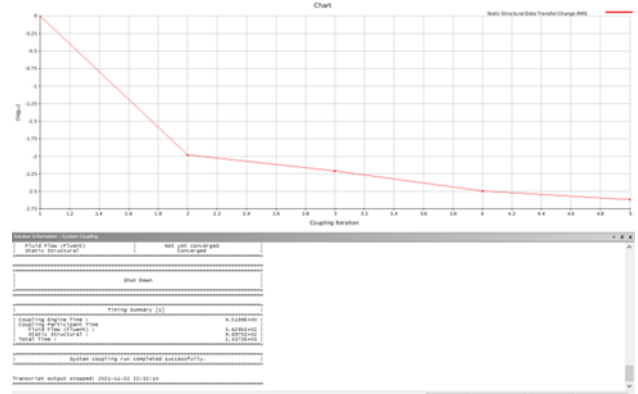
Şekil 8. Kanat yapısı meshing

- Kanat destek noktasından uçağa bağlı olması gerektiği için kanata bir destek bölge ataması yapıldı,
- Hava ile etkileşimi belirtmek için "Fluid Solid Interface" ataması yapıldı,
- Kanattaki oluşacak sehim için "Toplam Deformasyon" eklemesi yapıldı,
- Kanattaki kaldırma, sürüklenme, kök moment değerlerini elde etmek için "Kuvvet Reaksiyonları" eklemesi yapıldı,

-Kanatta oluşacak moment değerini elde etmek için "Moment Reaksiyonları" eklemesi yapıldı,

-Bu eklemelerden sonra CFD ile "Static Structural" analiz sonuçlarını birbirlerine etki etmesi için "Coupling" çözücüsü kullanıldı,

-Ayarlama yapılırken basınç kuvvetleri hava tarafından kanada etki etmesi sağlanırken kanatın hava ile etkileşiminin sağlanması için "Fluid-Solid Interface" ataması aktif edilip çözüm gerçekleştirildi.



Şekil 9. Farklı hız değerleri için analiz sistemleri bağlantı çözücü ekranı

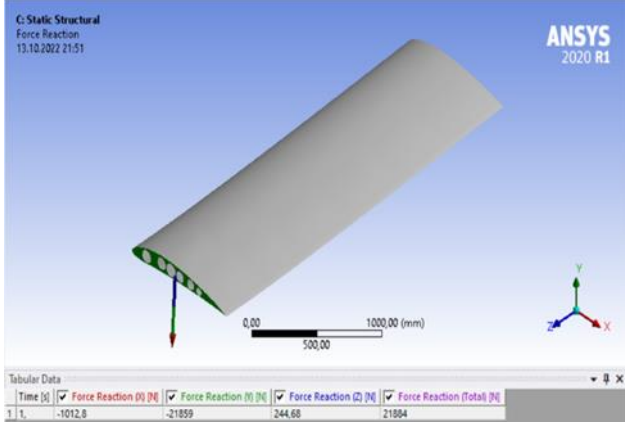
Şekil 9'de analiz sistemlerin bağlantı çözücüsü (system coupling), hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ve statik analizin model üzerine birlikte etki etmesini sağlayarak ortak bir çözüm elde edilen, işlevsel bir çözücü sonucu görülmektedir. Bu çözücüde doğruluğu yüksek olabilecek bir iterasyon sayısı belirlenerek çözüme başlanır. Bu çalışma için standart olan 5 değeri seçilmiştir. Kırmızı renkli çizgi iterasyon sayısıdır. Alt kısmındaki sayılar iterasyon sayılarını gösterirken, sol tarafındaki sayılar ise yakınsama değerini gösterir. Alt bölümdeki yazılar ise, çözümlerin tutarlı olup olmadığına dair bilgilendirmelerdir. Çözüm devam ederken belirlenen yakınsama kriterine yaklaştığında sıradaki çözüme geçecektir. Aksi durumda yakınsama değerine yaklaşılan kadar, çözüme devam edecektir. Bu çözücü, tutarlı sonuçlar elde edilmek istendiğinde kullanılır.

3 Bulgular ve tartışma

NACA 6412 kanat profilini içeren kanat yapısı, 0, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 ve 20 hücüm açıları 500 km/h ve 700 km/h hızları için Ansys Fluent ve "Static Structural" analizleri "System Coupling" çözücüsü ile birbirine etki etmesi sağlanarak bir dizi çözüm yapıldı. Bu bir dizi çözümlere göre çalışma gerçekleştirilmiştir.

İki farklı hız değerinde kanatta ortaya çıkan reaksiyon kuvvetlerinin değerleri uçağın hızına bağlı olarak değişmektedir. Reaksiyon kuvvetleri aerodinamik olarak hücüm açısına bağlı olarak değişmektedir. Uçak hızı ve hücüm açısı artarken uçak kanatlarında meydana gelen reaksiyon kuvvetlerinin değerleri de artmaktadır. Hücüm açısı 16° 'ye eriştiğinde maksimum reaksiyon kuvvetleri oluşmakta ve bundan sonra reaksiyon kuvvetlerinin değeri düşmektedir. Uçak hızı ve hücüm açısı artarken uçak kanatlarında meydana gelen reaksiyon kuvvetlerinin

değerleri hem tablo halinde hemde grafiksel olarak çalışmada gösterilmiştir.



Şekil 20. Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 km/h hızındaki kanatın reaksiyon kuvveti

Tablo 1. Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 ve 700 km/h hızlarındaki kanatın reaksiyon kuvveti değerleri tablosu

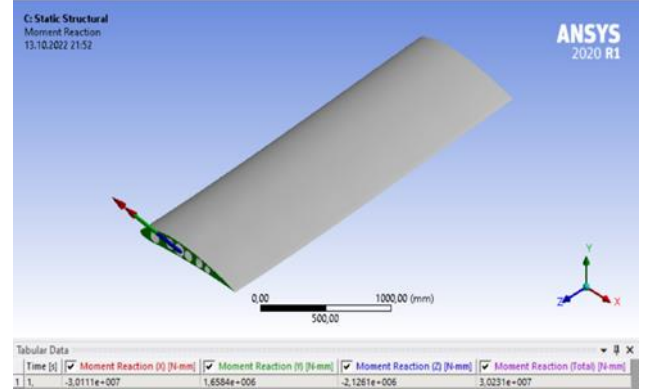
Reaksiyon Kuvveti (X) N	Reaksiyon Kuvveti (Y) N	Reaksiyon Kuvveti (Z) N	Reaksiyon Kuvveti (Total) N
500 km/h Değerleri			
-990.84	-22000	245.25	22024
700 km/h Değerleri			
-1930.5	-43427	482.52	43472

Tablo 1'deki X-yönündeki reaksiyon kuvvetleri $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında NACA6412 kanat profili üzerinde meydana gelen sürüklenme kuvvetinin, Y-yönündeki reaksiyon kuvvetleri $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında NACA 6412 kanat profili üzerinde meydana gelen kaldırma kuvvetinin, Z-yönündeki reaksiyon kuvvetleri $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında NACA6412 kanat profilinin ön tarafındaki izdüşümü (projeksiyon) alanı üzerinde havanın meydana getirmiş olduğu dinamik basınç kuvveti ve bu bileşke kuvvetlerin toplamını oluşturan toplam kuvvetlerin değerleri görülmektedir. Araştırma yapılan NACA6412 kanat profilinin, kanadın uçak gövdesine bağlandığı kök kısımdan kanat uç kısmına kadar ki kanat boyunca kanat kesit alanı eşit (sabit) bir kanat çalışıldığından Z-yönündeki reaksiyon kuvvetlerinin her hücüm açısı altında ayrı ayrı sabit olduğu görülmüştür.

Aerodinamik kuvvetler olarak bilinen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin etki ettiği nokta olarak belirlenen basınç merkezi ile kanadın bütün dinamik analizlerinin yapıldığı nokta olan ağırlık merkezi aynı nokta değildir. Bu aerodinamik kuvvetlerinde kanat dinamiğine etkisinin hesaplanması istenildiğinde bu kuvvetlerin de ağırlık merkezine taşınmalıdır. Bunun için dinamik analizin içine aerodinamik momentler girmektedir. Söz konusu olan moment ise çalışmada hesaplanan Yunuslama Momentidir. Bu momentler aerodinamik kuvvetler ile bunların ağırlık merkezine olan uzaklıklarının çarpımı ile bulunur.

Şimdi kanatta meydana gelen Yunuslama Momentinin oluşturduğu $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında 500 km/h hız

değerindeki Reaksiyon Momenti Şekil 11'da gösterilmiş ve sayısal değerleri ise Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 31. Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 km/h hızındaki kanatın reaksiyon momentleri

İki farklı hız değerinde kanatta ortaya çıkan reaksiyon momentleri uçağın hızına bağlı olarak değişmektedir. Reaksiyon momentler aerodinamik olarak incelendiğinde, hücüm açısının artışıyla birlikte değişmektedir. Hücüm açısı ve uçak hızı artarken kanatta meydana gelen reaksiyon moment değerleri de artmaktadır. Hücüm açısı 16° 'ye eriştiğinde maksimum toplam reaksiyon moment oluşmakta ve bundan sonra toplam reaksiyon moment değeri düşmektedir.

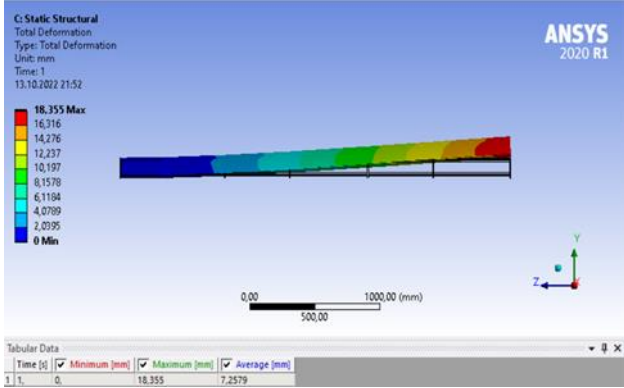
Tablo 2. Hücüm açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 ve 700 km/h hızlarındaki kanatın reaksiyon momentleri değerleri tablosu

Reaksiyon Momenti (X) Nmm	Reaksiyon Momenti (Y) Nmm	Reaksiyon Momenti (Z) Nmm	Reaksiyon Momenti (Total) Nmm
500 km/h Değerleri			
-3.024×10^7	1.642×10^6	-2.14×10^7	-3.036×10^7
700 km/h Değerleri			
-5.967×10^7	3.202×10^6	-4.227×10^7	-5.991×10^7

Tablo 2'deki X-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında NACA6412 kanat profili üzerinde meydana gelen, Y-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında meydana gelen, Z-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücüm açısı altında kanat profilinin ön tarafındaki izdüşümü (projeksiyon) alanı üzerinde hava tarafından oluşan dinamik basınç kuvvetinin meydana getirmiş olduğu momentler ve bu bileşke momentlerin toplamını oluşturan toplam momentlerin değerleri görülmektedir. Araştırma yaptığımız NACA6412 kanat profilinin kanadın uçak gövdesine bağlandığı kök kısımdan kanat uç kısmına kadar ki kanat boyunca kanat kesit alanı eşit (sabit) olmasına rağmen; aerodinamik kuvvetler olarak bilinen kuvvetlerinin etki ettiği nokta olarak belirlediğimiz basınç merkezi ile kanadın bütün dinamik analizlerinin yapıldığı nokta olan ağırlık merkezi aynı nokta olmadığından dolayı hep değişken bir değerdedir.

Uçak kanatlarının bir ucu uçak gövdesine bağlı diğer ucu açık olup; mekanikte tıpkı ankastre giriş konumunda aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında hareket etmektedir. Aerodinamik kuvvetlerin içerisindeki kaldırma kuvvetinin değeri diğer kuvvetlerin değerlerinden çok büyük

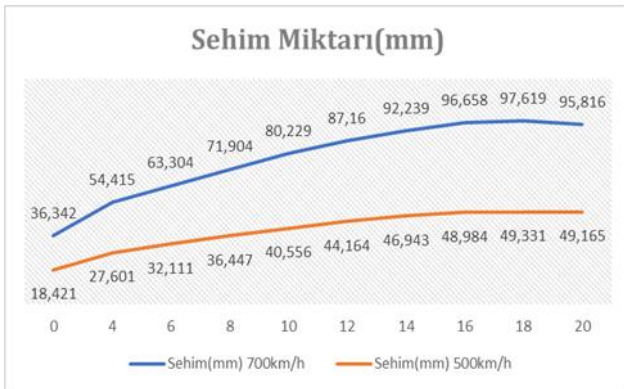
olmasından dolayı uçak kanadı mekanikteki sehim değerini maruz kalırlar. Uçak kanadının malzemesinin cinsine bağlı olarak kanat kök kısmından başlayıp uç kısmına kadar yukarı eğimli eğrisel bir sehim meydana gelir. Bu sehimin şekli Şekil 11’de verilmiştir. $\alpha=0^\circ$ hücum açısında 500 ve 700 km/h hızındaki kanatın X,Y ve Z koordinatlarındaki sehim değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Şekil 12’de grafiksel olarak ve Tablo 4’de ise kanadın Y koordinatındaki sehim değerlerinin 500 km/h ve 700 km/h değerlerinde hücum açısına bağlı olarak değişen değerler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 42. Hücum açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 hızındaki kanatın sehim değeri

Tablo 3. Hücum açısı $\alpha=0^\circ$ deki 500 ve 700 km/h hızındaki kanatın sehim değerleri tablosu

Sehim (X) mm	Sehim (X) mm	Sehim (X) mm
	500 km/h Değerleri	
0	18.421	7.2848
	700 km/h Değerleri	
0	36.342	14.373



Şekil 53. Sehım Grafiği

$$y = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (3)$$

Sehim formülünde Denklem (3) bulunan bileşenlerden; kanat uzunluğu (L), kanat atalet momenti (I), kanat malzemesi elastisite modülü (E) sehim üzerinde hızın değişmesiyle ya da hücum açısının fonksiyonu olarak değişmemektedir. Hızın, hücum açısının veya her iki değişkenin değiştirilmesiyle sehim miktarında artış ya da

azalış gerçekleşmektedir. Şekil 11 incelendiğinde, maksimum gerilmelerin olduğu yer kanat uç kısımları olup; bu kısımların maksimum sehim değerlerinde olduğu görülmektedir. 18° hücum açısında maksimum sehim olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Sehım karşılaştıırma tablosu

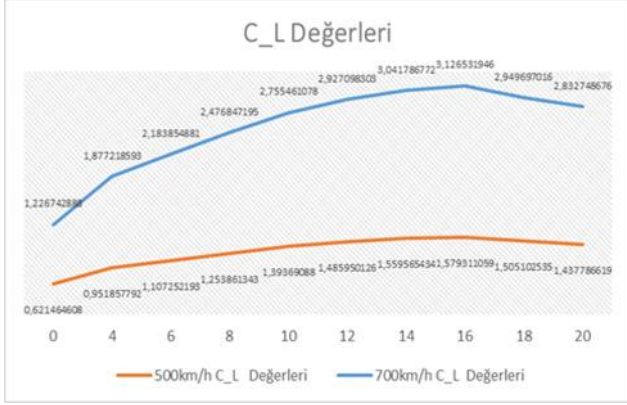
Hücum Açısı (α)	Sehim(mm) 700 km/h	Sehim(mm) 500 km/h
0	36.342	18.421
4	54.415	27.601
6	63.304	32.111
8	71.904	36.447
10	80.229	40.556
12	87.16	44.164
14	92.239	46.943
16	96.658	48.984
18	97.619	49.331
20	95.816	49.165

Tablo 3’deki X-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında NACA6412 kanat profili üzerinde meydana gelen, Y-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında meydana gelen, Z-yönünde $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında kanat profilinin ön tarafındaki izdüşümü (projeksiyon) alanı üzerinde havanın meydana getirmiş olduğu dinamik basınç kuvvetlerden oluşan kanat sehım değerleri görülmektedir. X-yönündeki sehım değerleri “0” olup; kanat üzerinde meydana gelen kaldırma kuvvetinin büyüklüğünden dolayı maksimum sehım değeri o yönde yani Y-yönünde meydana gelmektedir.

Enerjinin korunumu olan Bernoulli’nin denkleminde göre aynı akış yolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamı aerodinamiğin temel yasası ile sabit olup bahsi geçen toplam basınç henüz kanadın hareket alanına girmemiş yani deforme olmamış hava ortamından hesaplanır. Bu basınçlar kanadın dış yüzey alanına göre integre edilerek, kanadın üzerinde, rölafif hızdan dolayı oluşan bileşke aerodinamik kuvvet bulunur. Bulunan kuvvet aslında kanat yüzeyindeki bir yayılı kuvvet olup hesaplamalarda kolaylık olması için bu basınç kuvvetlerinin kanat üzerindeki basınç merkezi (center of pressure) noktasından etkidiği şeklinde bir tekilleştirme (idealleştirme) yapılabilir. Bu basınç merkezi noktası, ağırlık merkezi (center of gravity) noktası ile aynı nokta değildir. Bu iki noktanın çakıştirılması aerodinamik açıdan oldukça büyük faydalar sağlar.

Kanat üzerindeki basınçların kanadın dış yüzey alanına göre integre edilerek elde edilen bileşke aerodinamik kuvvetin bileşenleri (kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri) hava hızının karesiyle, hava akımına karşı gelen kanat alanıyla ve birimsiz bir katsayı ile orantılı oldukları görülür. Bu birimsiz katsayılar kuvvet bileşenlerinin isimleri ile isimlendirilirler.

NACA 6412 kanadı için 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerine karşılık gelen Kaldırma katsayısı değerleri Şekil 14’de ve Tablo 5 verilmiştir.



Şekil 64. 500km/h ve 700km/h değerlerindeki kaldırma katsayısı C_L grafiği

Tablo 5. C_L karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	C_L	
	700 km/h	500 km/h
0	1.226743	0.621465
4	1.877219	0.951858
6	2.183855	1.107252
8	2.476847	1.253861
10	2.755461	1.393691
12	2.927098	1.48595
14	3.041787	1.559565
16	3.126532	1.579311
18	2.949697	1.505103
20	2.832749	1.437787

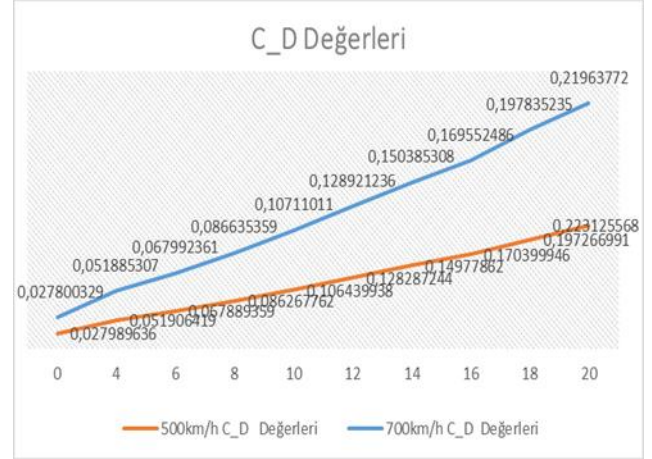
Kanat profillerinin aerodinamik performansları her ne kadar kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ile yunuslama momenti olarak belirleniyorsa da, çoğu zaman bu kuvvet ve moment bileşenleri yerine bunların kendilerine ait katsayıları ile ilişkilendirilirler. Kanat profili aerodinamik performansının daha verimli olabilmesi için kaldırma katsayısının fazla, sürüklenme katsayısının ise düşük olması gerekir. Kaldırma katsayısının artması ile daha fazla yük taşınabilir veya daha kısa mesafede kalkış sağlanabilir. Ayrıca sürüklenme katsayısının her artışı yakıt tüketimini arttıracığı için bu katsayısının az olması istenir.

Kaldırma kuvvetinin (L) ve bu kuvvet ile bağlantılı olan birimsiz kaldırma kuvvet katsayısı (C_L) sayısal değerleri Şekil 14'de gösterilmiştir. Kanat hücum açısı (0° - 16°) arasında atarken; 16° hücum açısı sonrası akışkanın oluşturduğu akım hatları artık kanadın arka sırt bölgelerinde tutunmamaktadır. Bir dizi farklı NACA 00XX çalışmasına göre, elde edilen veriler 15° - 24° arasında kritik hücum açısına sahiptir. Bu çalışmadaki sonuçlara göre 16° kritik hücum açısı, belirtilen aralıkta olduğu için tutarlıdır [4].

Kanat profilinde artık stall bölgesinde bulunmaktadır. Stall bölgesinde bulunan kanadın üzerindeki akım hatlarının görüntüsü Şekil 27-28'de gösterilmiştir. Hem 500 km/h ve hemde 700 km/h hız değerlerinde de aynı trend elde edilmiştir. Her iki farklı hız değerlerinde elde edilen kaldırma katsayıları arasındaki fark hücum açısı değerleri

arttıkça büyümektedir. Bu durum ise hızın kaldırma kuvveti üzerinde önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

Sürüklenme kuvvetinin (D) ve bu kuvvet ile bağlantılı olan birimsiz sürüklenme kuvvet katsayısı (C_D) sayısal değerleri kanat hücum açısı (0° - 20°) arasında üstel fonksiyon şeklinde daima artar halde olduğu görülmüştür. Şekil 15 ve Tablo 6'da gösterilen sürüklenme kuvvet katsayılarının hücum açısına göre değişim şöyle izah edilebilir. Aynı akış yolunun her noktasındaki atmosferik ve dinamik basınçların toplamı aerodinamiğin temel yasası ile sabit olduğu belirtilmiştir.



Şekil 75. 500km/h ve 700km/h C_D değerleri

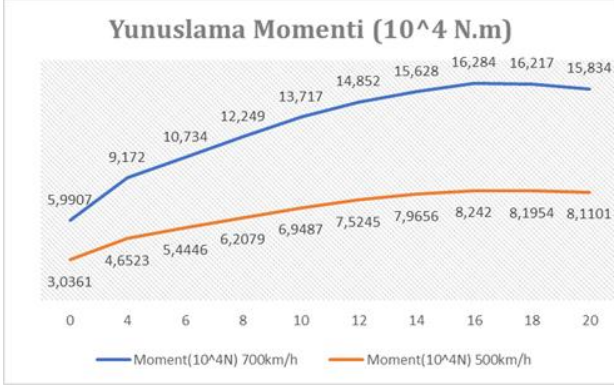
Tablo 6. C_D karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	C_D	
	700 km/h	500 km/h
0	0.0278	0.027989636
4	0.051885	0.051906419
6	0.067992	0.067889359
8	0.086635	0.086267762
10	0.10711	0.106439938
12	0.128921	0.128287244
14	0.150385	0.14977862
16	0.169552	0.170399946
18	0.197835	0.197266991
20	0.219638	0.223125568

Hesaplanan kuvvet kanat yüzeyindeki bir yayılı kuvvet olup; hesaplamalarda kolaylık olması için bu basınç kuvvetlerinin kanat üzerindeki basınç merkezi noktasından etkidiği şeklinde bir tekilleştirme yapılır. Bu basınç merkezi noktası ile ağırlık merkezi noktası aynı nokta olmayıp hücum açısına göre değişim göstermektedir. Bu değişim Şekil 15'de görülmektedir.

NACA 6412 kanadı için 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerine karşılık gelen Yunuslama Moment değerleri Şekil 16'de ve Tablo 7 verilmiştir.

Yunuslama Momentinin (M) sayısal değerleri incelendiğinde kanat hücum açısı (0° - 16°) arasında atarken; 16° hücum açısı sonrası akışkanın oluşturduğu akım hatları artık kanadın arka sırt bölgelerinde tutunmamasından dolayı bu hücum açısından sonra lineer olarak azalmaktadır.

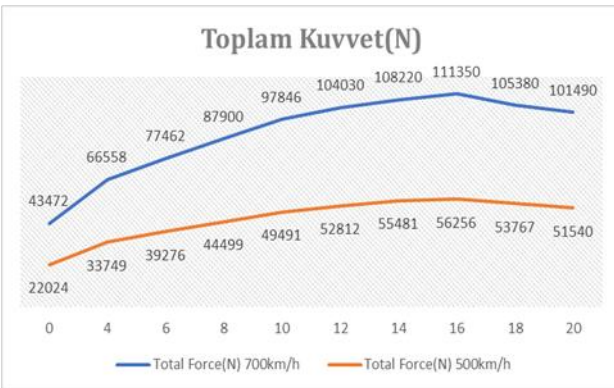


Şekil 86. Yunuslama momenti grafiği

Tablo 7. Yunuslama momenti karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	Y. Momenti (10 ⁴) N 700 km/h	Y. Momenti (10 ⁴) N 500 km/h
0	5.9907	3.0361
4	9.172	4.6523
6	10.734	5.4446
8	12.249	6.2079
10	13.717	6.9487
12	14.852	7.5245
14	15.628	7.9656
16	16.284	8.242
18	16.217	8.1954
20	15.834	8.1101

Kanat artık stall bölgesinde olduğunu göstermektedir. Stall bölgesinde bulunan kanadın üzerindeki akım hatlarının görüntüsü Şekil 27-28’de gösterilmiştir. Hem 500 km/h ve hemde 700 km/h hız değerlerinde de aynı trend elde edilmiştir. 500 km/h ve 700 km/h hızların kanat üzerindeki X-yönündeki kuvvetlerin $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında kanat profili üzerinde meydana gelen sürüklenme kuvvetlerinin, Y-yönündeki kuvvetlerin $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında kanat profili üzerinde meydana gelen kaldırma kuvvetlerinin, Z-yönündeki kuvvetlerin $\alpha=0^\circ$ hücum açısı altında kanat profillerinin ön tarafındaki izdüşümü (projeksiyon) alanı üzerinde havanın meydana getirmiş olduğu dinamik basınç kuvvetleri ve bu bileşke kuvvetlerin toplamalarını oluşturan toplam kuvvetler Şekil 17’de ve Tablo 8 görülmektedir.



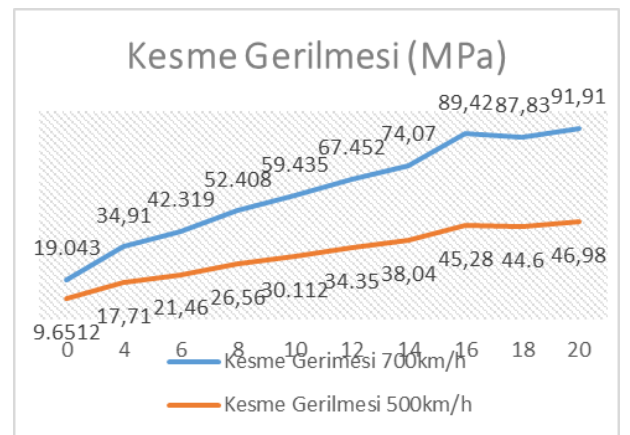
Şekil 97. Toplam kuvvet grafiği

Tablo 8. Toplam kuvvet karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	Total Force (N) 700 km/h	Total Force (N) 500 km/h
0	43472	22024
4	66558	33749
6	77462	39276
8	87900	44499
10	97846	49491
12	104030	52812
14	108220	55481
16	111350	56256
18	105380	53767
20	101490	51540

Toplam kuvvetlerinin sayısal değerleri incelendiğinde kanat hücum açısı (0°-16°) arasında atarken; 16° hücum açısı sonrası akışkanın oluşturduğu akım hatları artık kanadın arka sırt bölgelerinde tutunamamaktadır. Kanat profili artık stall bölgesinde bulunmaktadır. Stall bölgesinde bulunan kanadın üzerindeki akım hatlarının görüntüsü Şekil 27-28’de gösterilmiştir. Hem 500 km/h ve hemde 700 km/h hız değerlerinde de aynı trend elde edilmiştir. Her iki farklı hız değerlerinde elde edilen toplam kuvvetler arasındaki fark hücum açı değerleri arttıkça büyümektedir. Bu durum ise hızın kaldırma kuvveti üzerinde önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

Alüminyum alaşımı malzeme, yapay yaşlandırılmış malzeme olup; bu haliyle alüminyum alaşımları içinde yüksek dayanım değerlerine sahip malzeme niteliği taşımaktadır. Kesme dayanımı değeri merteye olarak 230 MPa mertebesindedir. İki farklı hız değerinde kanatta ortaya çıkan kesme gerilmesi değeri uçağın hızına bağlı olarak değişmektedir. Kesme gerilimi aerodinamik olarak 2 parametreye bağlı olarak değişmektedir. Bunlardan biri kuvvet, diğeri ise kuvvetin uygulandığı kesit alanıdır. Uçak hızı ve hücum açısı artarken uçak kanatlarında meydana gelen kesme gerilmesi değerleri de artmaktadır. Hücum açısı 16°’ye eriştiğinde maksimum kesme gerilmesi oluşmakta ve bundan sonra kesme gerilmesi değeri düşmektedir. Oluşan kesme gerilmesi değeri Şekil 18’de ve Tablo 9’da gösterildiği gibi 700 km/h hız değerinde maksimum 89.4 MPa mertebesindedir.



Şekil 108. Kesme gerilmesi grafiği

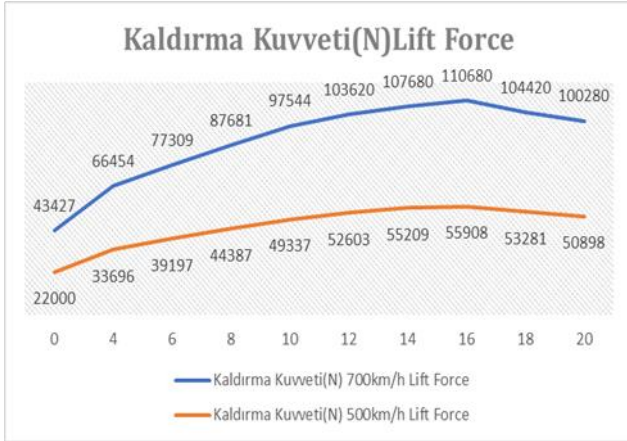
Tablo 9. Kesme gerilmesi karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	Kesme Gerilmesi (MPa) 700 km/h	Kesme Gerilmesi (MPa) 500 km/h
0	19.043	9.6512
4	34.909	17.707
6	42.319	21.465
8	52.408	26.557
10	59.435	30.112
12	67.452	34.35
14	74.067	38.042
16	89.416	45.279
18	87.834	44.6
20	91.906	46.983

Bu değer, malzemenin kesme dayanımı değerinden daha düşüktür. Diğer yandan, 700 km/h hız değeri için malzemenin dayanımı ile malzemede oluşan kesme gerilmesinin oranı 2.57 mertebesinde olup oldukça emniyetlidir. Şekil 18’de, bahsi geçen bu değerler grafik halinde verilmiştir.

Kanat üzerindeki basınçların kanadın dış yüzey alanına göre integrale edilerek elde edilen bileşke aerodinamik kuvvetin bileşenleri (kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri) hava hızının karesiyle, hava akımına karşı gelen kanat alanıyla ve birimsiz bir katsayı ile orantılı oldukları görülür. Bu birimsiz katsayılar kuvvet bileşenlerinin isimleri ile isimlendirilirler. Bu aerodinamik birimsiz katsayılar daha önce genişçe anlatılmıştı.

NACA 6412 kanadı için 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerine karşılık gelen Kaldırma Kuvveti değerleri Şekil 19’de ve Tablo10 verilmiştir.



Şekil 19. Kaldırma kuvveti karşılaştırma grafiği

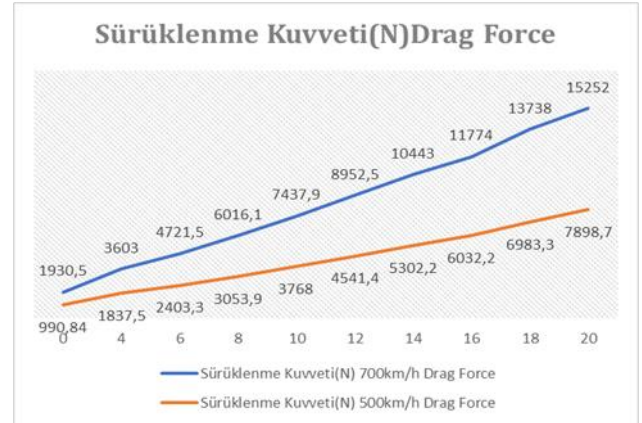
Kaldırma kuvvetinin (L) sayısal değerleri incelendiğinde kanat hücum açısı (0° - 16°) arasında lineer olarak atarken; 16° hücum açısı sonrası akışkanın oluşturduğu akım hatları artık kanadın arka sırt bölgelerinde tutunmamaktadır. Kanat profili artık stall bölgesinde bulunmaktadır. Stall bölgesinde bulunan kanadın üzerindeki akım hatlarının görüntüsü Şekil 27-28’de gösterilmiştir. Hem 500 km/h ve hemde 700 km/h hız değerlerinde de aynı trend elde edilmiştir. Her iki farklı hız değerlerinde elde edilen kaldırma kuvvetleri arasındaki

fark hücum açısı değerleri arttıkça büyümektedir. Bu durum ise hızın kaldırma kuvveti üzerinde önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Kaldırma kuvveti karşılaştırma tablosu

Hücum Açısı (α)	Kaldırma Kuvveti (N) 700 km/h	Kaldırma Kuvveti (N) 500 km/h
0	43427	22000
4	66454	33696
6	77309	39197
8	87681	44387
10	97544	49337
12	103620	52603
14	107680	55209
16	110680	55908
18	104420	53281
20	100280	50898

NACA 6412 kanadı için 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerine karşılık gelen Sürüklenme Kuvveti değerleri Şekil 20’de ve Tablo 11 verilmiştir.



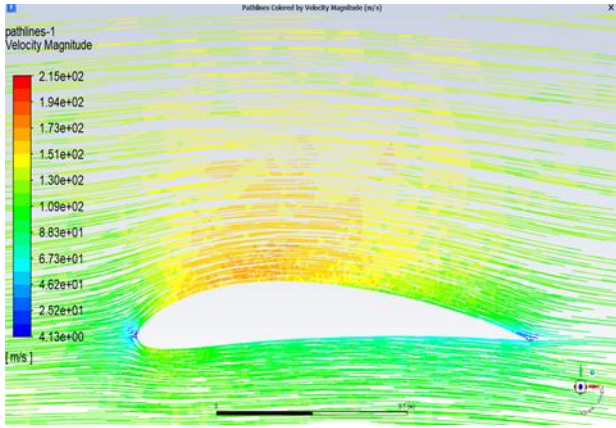
Şekil 20. Sürüklenme kuvveti grafiği

Tablo 11. Sürüklenme kuvveti karşılaştırma tablosu

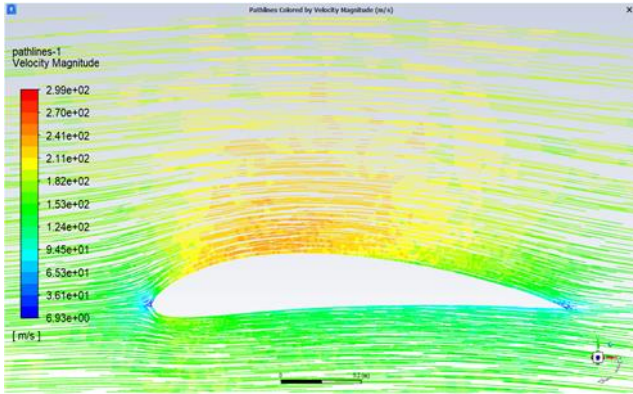
Hücum Açısı (α)	Sürüklenme Kuvveti (N) 700 km/h	Sürüklenme Kuvveti (N) 500 km/h
0	1930.5	990.84
4	3603	1837.5
6	4721.5	2403.3
8	6016.1	3053.9
10	7437.9	3768
12	8952.5	4541.4
14	10443	5302.2
16	11774	6032.2
18	13738	6983.3
20	15252	7898.7

Sürüklenme kuvvetinin (D) sayısal değerleri incelendiğinde kanat hücum açısı (0° - 20°) arasında üstel fonksiyon şeklinde daima artar halde olduğu görülmüştür. Stall bölgesine ulaşmış kanat profili üzerindeki sürüklenme

kuvvetinin sayısal değerleri üstel fonksiyon şeklinde yükselmeye devam etmektedir. Stall bölgesine ulaşmış kanat üzerindeki azalan kaldırma kuvvetinin yerini artık sürüklenme kuvveti olarak kanat üzerindeki kuvvet dengeleri değişmektedir. Stall bölgesinde bulunan kanadın üzerindeki akım hatlarının görüntüsü Şekil 27-28’de gösterilmiştir. Hem 500 km/h ve hemde 700 km/h hız değerlerinde de aynı trend elde edilmiştir. Her iki farklı hız değerlerinde elde edilen sürüklenme kuvvetleri arasındaki fark hücum açısı değerleri arttıkça artmaktadır. Bu durum ise hızın sürüklenme kuvveti üzerinde önemli bir parametre olduğu görülmektedir.



Şekil 21. ($\alpha=0^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

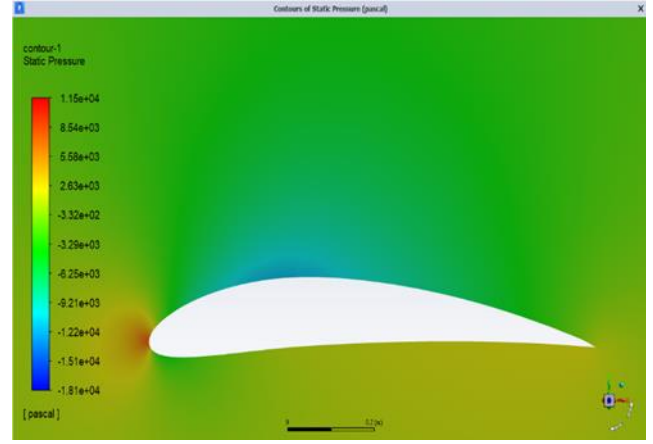


Şekil 22. ($\alpha=0^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

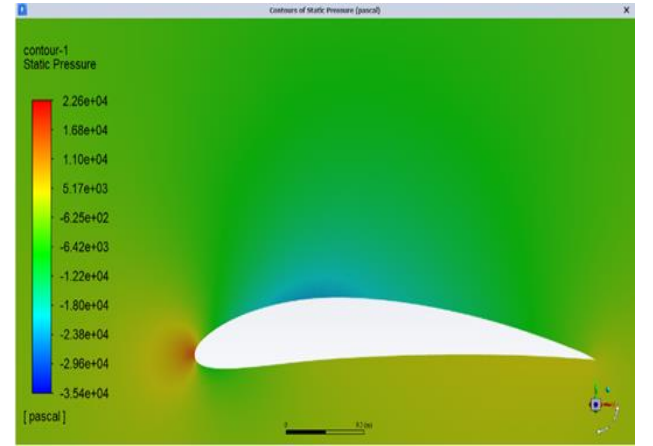
Şekil 21’de NACA6412 kanat profilinin 500 km/h hızında hücum kenarında, akım çizgilerinin detaylı görünümü incelenmektedir. Hücum açısı ($\alpha=0^\circ$) olduğu durumda, hava ile ilk temas noktası, durma noktasını temsil etmektedir. Mavi çizgilerin yoğun olduğu bölgededir.

Şekil 22’de ise NACA6412 kanat profilinin 700 km/h hızındaki hücum kenarının, akım çizgilerinin detaylı görünümü incelenmektedir. Hücum açısı ($\alpha=0^\circ$) olduğu durumda yine ilk temas bölgesinde, mavi çizgiler yoğundur. Kanat profilinin üst bölgesinde, basıncın düşük olması nedeniyle yüksek hız akım çizgileri mevcuttur. Renklenme ise, kırmızıya yakın renk tonlarını almaktadır. Şekil 21 ve 22’de görüldüğü gibi, kanadın hücum kenarına doğru akış

hızı azalmaktadır. Durma noktası yakınlardaki akış hızının yavaşlayarak tam durma noktasında sıfır olduğu diyagramdan izlenebilmektedir.

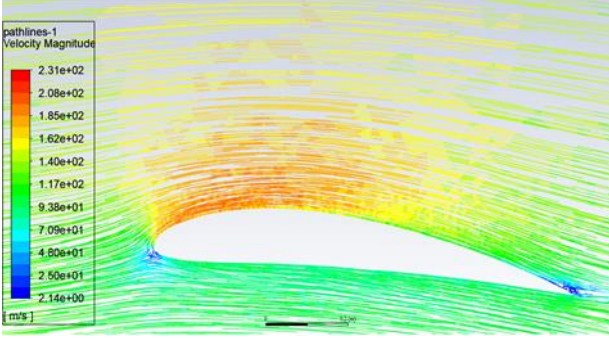


Şekil 23. ($\alpha=0^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarındaki basınç konturları

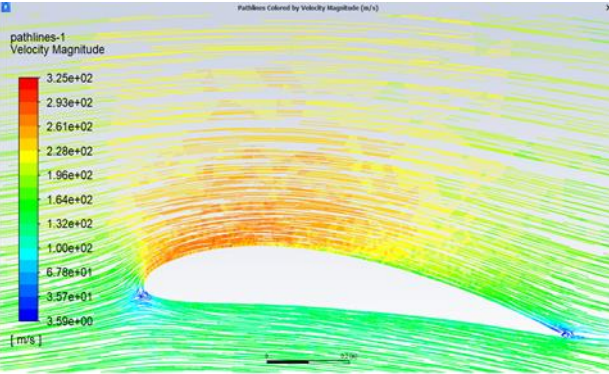


Şekil 24. ($\alpha=0^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarındaki basınç konturları

Şekil 23 ve 24’de ise kanat profili hücum açısı ($\alpha=0^\circ$) olduğu durumda iken statik basınç konturlarının dağılımı gözlemlenmektedir. Kanat profilinin hücum kenarı ve durma noktası etrafında statik basıncın yükseldiği şekilden görülmektedir. Kanadın hücum kenarındaki durma noktasındaki basınç yükselmesi şöyle izah edilebilir; bu noktaya akışkanlar mekaniğinde bilinen Bernoulli Denklemi uyarlandığında kinetik enerjinin sıfıra gitmesiyle ortada kalan bu kinetik enerjinin basınç enerjisine dönüşmesine sebep olur. Bu dönüşen enerji ile birlikte kanadın hücum kenarındaki durma noktasındaki basınç yükselmesine neden olur. Bu noktadaki basınç yükselmesi Şekil 23 ve 24’de görülmektedir. Spektrumda, maviye doğru olan renkler düşük basınç bölgelerini, kırmızıya doğru olan renkler ise yüksek basınç bölgelerini ifade etmektedir. Basınç konturları grafiğinden, kanat profilinin üst yüzeyinde düşük basınç bölgesi ve alt yüzeyinde ise yüksek basınç bölgesi olduğu görülmüştür. Kanat önünde (burun kenarında=hücum kenarında) ayrıca yüksek basınç bölgesi de (durma noktası) gözlenmiştir.

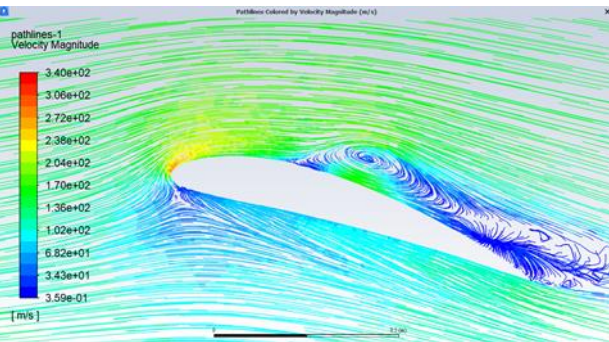


Şekil 25. ($\alpha=6^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri



Şekil 26. ($\alpha=6^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

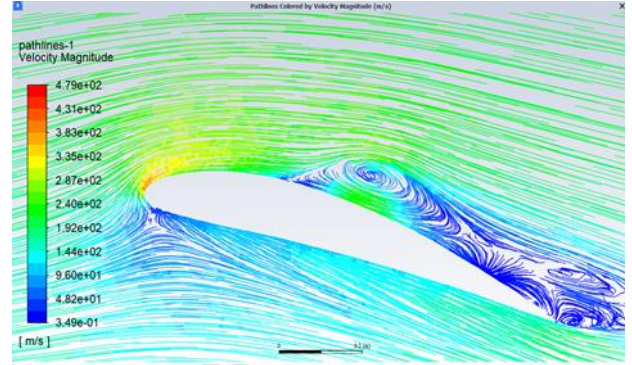
Şekil 25 ve 26' te hücum açısı ($\alpha=6^\circ$) olduğu durumda NACA6412 kanat profilinin 500 km/h ve 700 km/h hızlarındaki hücum kenarlarında, akım çizgilerinin detaylı görünüşleri incelenmektedir. Kanadımızın hücum açısı (α) artarken kanat burun kısmındaki hava akım çizgilerinin durduğu durma noktasının (stagnation point noktasının) kanat burun ortalarında aşağılara doğru indiği gözlemlenmiştir.



Şekil 27. ($\alpha=16^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

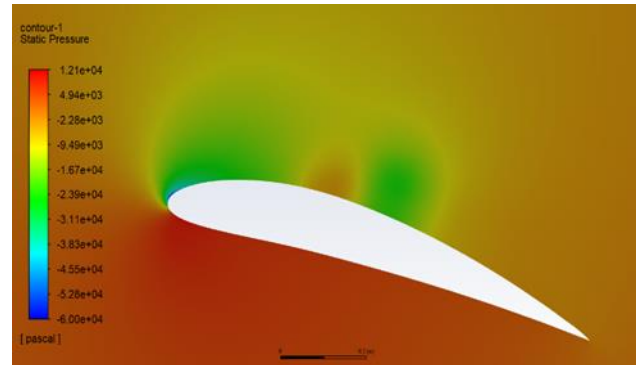
16° hücum açısı sonrası akışkanın oluşturduğu akım hatları artık kanadın arka sırt bölgelerinde tutunmamaktadır. Kanat profili artık stall bölgesinde bulunmaktadır yani akım ayrılması ve kopmalar dolayısıyla kanat yüzeyinden ayrılmalardan dolayı meydana gelen basınç sürüklenmesi çok yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Yine akım hatlarının kanat yüzeyinden kopması dolayısıyla kaldırma katsayısında keskin bir düşüş meydana gelmektedir. Stall bölgesi ve sonrasında kanat artık kaldırma kuvveti oluşturma kabiliyetini kaybetmiştir. Küçük uçaklarda bu durum bariz bir şekilde hissedilirken, büyük uçaklarda ise özellikle tırmanış anında bu bahsedilen stall oluşarak birden irtifa kaybetmelerine sebep olur ki bu hiçbir zaman istenmeyen bir durumdur. Şekil 27 ve 28'de ($\alpha=16^\circ$) hücum açısında 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerindeki kanatta oluşan stall görülmektedir.



Şekil 28. ($\alpha=16^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

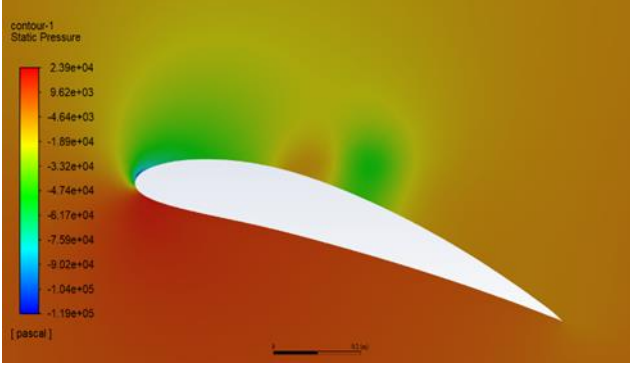
Hücum açısı ($\alpha=16^\circ$) olduğu durumda, hava ile ilk temas noktası kanadın alt bölgesine doğru yer değiştirmiştir. Bu bölgede hız en yavaş değeri alacaktır. Kanadın hava ile en son temas eden bölgesi ise en fazla değeri alacak bölge hücum kenarının üst bölgesidir. Kanadın üst bölgesinde firar kenarına doğru ilerlendiğinde ise, akım çizgilerinin düzenliliğini kaybettiği görülmektedir. Bu bölgede oluşan türbülanslar, kanadın kısa süre içerisinde uçuşunu olumsuz yönde etkileyecektir. Kanadın dengeli şekilde ilerlemesi isteniyorsa üst bölgedeki türbülansları kurtulmalı ya da kanadın dengesini etkilemeyecek bölgelere doğru aktarılması sağlanmalıdır.



Şekil 29. ($\alpha=16^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarındaki basınç konturları

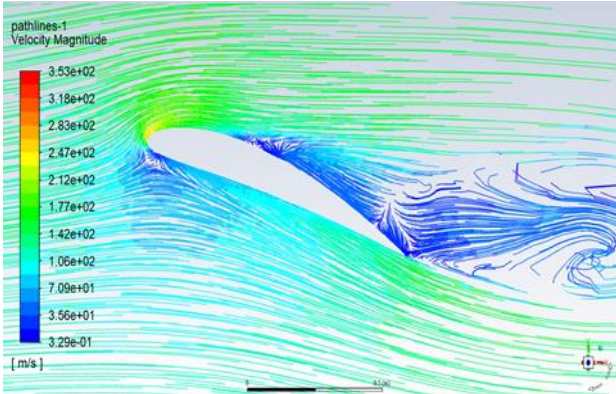
Şekil 29 ve Şekil 30'da $\alpha=16^\circ$ hücum açısında 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerinde kanat üzerinde meydana gelen statik basınç konturları görülmektedir. Kanadın hücum açısı arttıkça kanadın alt kısımlarındaki bölgelerde homojen halde yüksek basınç değerleri oluşurken; kanadın üst kısımlarında

meydana heterojen bir düşük basınç değerleri meydana gelmektedir. Kanada uygulanan hücum açısı artarken kanat üzerinde var olan heterojen düşük basınç dağılımı kanadın firar kısmında hücum kısmına doğru kaydığı görülmüştür.

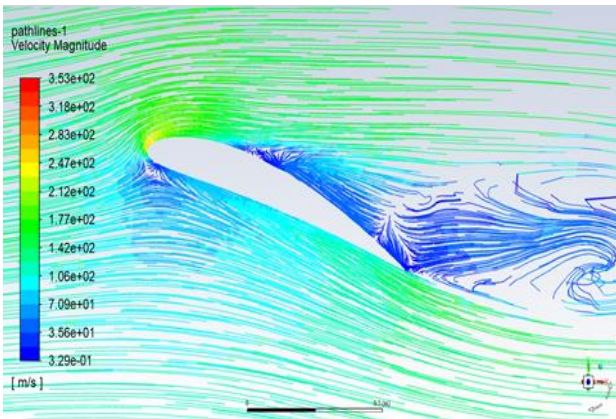


Şekil 30. ($\alpha=16^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarındaki basınç konturları

Şekil 31 ve Şekil 32’de NACA6412 Kanat profilinin 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerinde $\alpha=20^\circ$ hücum açısında kanat üzerinde meydana gelen akım çizgileri görülmektedir. Hücum açısı $\alpha=20^\circ$ altında kanat üst bölgesinde hareket eden hava akım çizgilerinin kanat üst bölgesinden kanadın hücum kenarın daha yakın bölgelerde ayrılma olduğu görülmüştür.



Şekil 31. ($\alpha=20^\circ$) hücum açısında 500 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri



Şekil 32. ($\alpha=20^\circ$) hücum açısında 700 km/h hızındaki hücum kenarı akım çizgileri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, literatürde genellikle iki boyutlu modellenen NACA 6412 kanat profili üç boyutlu olarak tasarlanmıştır. Ansys Fluent programı ile söz konusu olan kanat profili modellenip, kanatların farklı hızlardaki aerodinamik parametreleri incelenmiştir. NACA 6412 profili kanadın konsolları içerisinde irili ufaklı dairesel kesitli boşluklar kanadın mukavemet değerlerini düşürmeyecek şekilde Şekil 1’de gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Bu tasarlanan kanada 139 m/s (≈ 500 km/h) ve 194 m/s (≈ 700 km/h) $Ma > 0.3$ olan hava akış hızları uygulanmıştır. Bu kanatlar 0° ile 20° hücum açısı aralığında 2 derecelik aralıklarla 10 farklı açıda tek tek analize sokulmuştur.

NACA 6412 uçak kanadının 2 farklı hız değeri olan 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerindeki basınç konturları karşılaştırılmıştır. Hücum açısı ve hız arttıkça basınç değerinin arttığı görülmüştür. 3 farklı NACA 4412 çalışması yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında tutarlı sonuç elde edildiği görülmektedir [7].

NACA 6412 kanadının 2 farklı hız değeri olan 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerindeki aerodinamik parametrelerin kanatlar üzerinde oluşturduğu deformasyonlar hız değerlerine bağlı olarak artış görülmüştür. Hız değeri 700 km/h olan kanat üzerinde meydana gelen deformasyon değerleri ve aerodinamik diğer parametreler, hız değeri 500 km/h olan kanat değerlerinden yaklaşık olarak 2 katı oldukları görülmüştür. Çok farklı hız değerlerinde, uçak kanadının aerodinamik ve mukavemet değerleri denemeyanılma yapılarak bulunan iki farklı hız değeri tercihi yapılarak çözümler elde edilmiştir. Uçak kanadı malzemesinin mukavemet değerlerinin emniyet sınırları içerisinde kalabilmesi için seçilen iki farklı hız değeri olan 500km/h ve 700km/h değerlerinde tasarlanan uçak kanadının, Fluent® programında çözdürülen aerodinamik parametre değerlerinin sonuçlarıdır.

Her iki farklı hız değerlerinde kanadın hücum kenarında meydana gelen durma noktasının yeri hücum açısına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim hücum açısı arttıkça hücum kenarının altlarına doğru indiği görülmüştür. Kanatların hız konturları grafiğinde kanadın durma noktası yakınlarında bir hız düşüşü ve üst yüzeyinde ise hız artışı görülürken, statik basınç konturları hız vektörlerinin negatifi şeklinde görülmüştür. Bu durum Bernoulli Denklemi etkisine göre doğru bir sonuç olup hızın arttığı yerde basınç düşüşü, hızın azaldığı yerde de basınç yükselişi olarak görülmüştür. Bir diğer NACA 4412 çalışması ile karşılaştırıldığında basınç ve hızın ters orantılı olduğu sonucunun, tutarlılığını ortaya koymaktadır [11].

NACA 6412 kanadın 500 km/h ve 700 km/h hız değerlerindeki aerodinamik parametreler tablo halinde çıkartılmış olup; değerleri ise ilgili grafik üzerinde ve tablolarda karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Her iki farklı hız değerlerinde oluşan C_L kaldırma katsayısı hücum açısının artışı ile 16° ye kadar artmakta ve 16° ’den sonrası birden bire düşerek kanat stall olduğu görülmüştür. NACA 0015 Farklı Reynolds sayısında hücum açılarındaki artışla sürtünme ve kaldırma katsayılarının artış, bu çalışmadaki belli değere kadar artışın doğruluğunu açığa çıkarmaktadır [1].

NACA 6412 Uçak kanadı, diğer çalışmalarda tasarimsal değişiklikle artırılan kaldırma kuvveti ve diğer parametreleri, diğer NACA 4412 ve NACA 0012 kanat tiplerine göre daha kambur olduğu için tasarimsal değişikliğe gidilmeden aynı hücum açısına kadar benzer sonuçları elde etmeyi başarmıştır [6-11].

Yunuslama Momenti her iki farklı hız değerlerinde kanat hücum açısının artışı arttığı görülmüş olup; hücum açısı 16° den sonraki hücum açılarında birdenbire düşükleri görülmüştür.

Sınır tabakanın kanat profili üzerinde mümkün olduğunca laminar kalması arzu edilir. Fakat, kanat profilleri zaman içerisinde sürekli gelişen ve değişen bir süreç geçirirler. Türbülanslı bölgedeki ayrılmaların hücum açısının artması ile arttığı görülmüştür. Stall açılarına yakın ve bunun üstündeki hücum açısı bölgelerinde ayrılmaların şiddetlenerek alan olarak büyüdüğü, kaldırma kuvvetinin ise hızla azaldığı görülmüştür [22].

Motor kuvvetlerinde ki azalmanın sebebi kanadın kütesinin azalmasıdır. Kanat profilinden çıkarılan dairesel irili-ufaklı dairesel kesitler tüm kanada bakıldığında; kanadın hacminde azalmaya sebep olur. Bu kütesel azalma uçaklar seyir halindeyken bir kazanç olarak görülür. Bu kazanç gerekli motor kuvvetini azaltarak yakıt tasarrufu sağlar.

Teşekkür

Çalışmada yardımlarını esirgemeyen ve benim mesleki anlamda gelişmem için verdiği değerli tavsiyelerinden dolayı, Dr. Öğr. Üyesi Ramazan SELVER hocama teşekkür ederim. Çalışma süresince bana verdikleri desteklerden dolayı değerli eşime ve aileme teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] H. E. Tanürün, İ. Ata, M. E. Canlı ve A. Acır, Farklı açıklık oranlarındaki NACA-0018 rüzgâr türbini kanat modeli performansının sayısal ve deneysel incelenmesi. Politeknik Dergisi, 23 (2), 371-381, 2020. <https://doi.org/10.2339/politeknik.500043>.
- [2] YouTube, Tübitak Bilim Genç, Uçuş Mekaniği, <https://www.youtube.com/watch?v=6T1OFA-92A&t=1516s>, Erişim: 7 Şubat 2023.
- [3] NACA, National Advisory Committee for Aeronautics, https://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil, Erişim: 7 Şubat 2023.
- [4] H. Sogukpınar, Numerical simulation of 4-digit inclined NACA 00XX airfoils to find optimum angle of attack for airplane wing. Uludag University Journal of The Faculty of Engineering, 22(1),169-178, 2017. <https://doi.org/10.17482/uumfd.309470>.
- [5] G. M. Ozkan, Experimental investigation of the flow characteristics around a NACA 0012 airfoil subjected to stall and post-stall conditions. Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 35(2), 369-378, 2020. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.792424>
- [6] M. S. Genc, G. Ozisik ve N. Kahraman, Düz flaplı NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik performansının incelenmesi. Journal of Thermal Science and Technology, 28(1), 1-8. 2008.
- [7] I. Gov, M. H. Dogru ve Ü. Korkmaz, Uçuş esnasında değiştirilebilir kanat profili kullanarak NACA 4412'nin aerodinamik performansının artırılması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(2), 1109-1126, 2019. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460536>.
- [8] M. Y. Zakaria, M. M. İbrahim, S. Tagab and M. R. Hajj, A computational study of vortex shedding from a NACA 0012 airfoil at high angles of attack, International Journal of Aerodynamics, 6(1), 1-17, 2018. <https://doi.org/10.1504/IJAD.2018.089779>.
- [9] T. S. Rao, T. Mahapatra and S. C. Mangavelli, Enhancement of lift-drag characteristics of NACA 0012. Materials Today: Proceedings, 5(2), 5328-5337, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.117>.
- [10] E. Fatahian, A. L. Nichkoohi and H. Fatahian, Numerical study of the effect of suction at a compressible and high Reynolds number flow to control the flow separation over NACA 2415 airfoil. Progress in Computational Fluid Dynamics, 19(3), 170-179.2019. <https://doi.org/10.1504/PCFD.2019.099598>.
- [11] D. S. Körpe, Ö. Ö. Kanat and T. Oktay, The effects of initial y plus: numerical analysis of 3D NACA 4412 wing using γ -Re θ SST turbulence model. European Journal of Science and Technology, 17, 692-702. 2019. <https://doi.org/10.31590/ejosat.631135>
- [12] K. Gore, A. Gote, A. Govale, A. Kanawade and S. Humane, Aerodynamic analysis of aircraft wings using CFD. International Research Journal of Engineering and Technology, 5(6), 639-644. 2018.
- [13] I. Boglekci, P. Demircioglu, H. S. Sucuoglu, E. Guven, N. Demir and M. N. Durakbasa, Structural and modal analyses of NACA 66-206 aircraft wing model. Proceeding of the International Symposium for Production Research, 182-191, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_16
- [14] N. M. Triet, N. N. Viet and P. M. Thang, Aerodynamic analysis of aircraft wing. VNU Journal of Science: Mathematics-Physics, 31(2), 68-75. 2015.
- [15] S. Guo, Aeroelastic optimization of an aerobatic aircraft wing structure. Aerospace Science and Technology, 11, 396-404, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.01.003>
- [16] A. Szollosi and P. Baranyi, Improved control performance of the 3-Dof aeroelastic wing section: a tip model based 2d parametric control performance optimization. Asian Journal of Control, 19(2), 450-466, 2017. <https://doi.org/10.1002/asjc.1418>.
- [17] M. M. Yavuz, Flow and mechanical characteristic of a modified NACA wing geometry. Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 36(3), 815-825, 2021. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.100580>.

- [18] Y. F. Gorgulu, M. A. Ozgur and R. Kose, CFD analysis of a NACA 0009 aerofoil at a low Reynolds number, *Journal of Polytechnic*, 24(3), 1237-1242, 2021. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>.
- [19] Y. H. Ozdemir and T. Cosgun, The influence of turbulence models on the numerical modelling of a 3D wing in ground effect. *European Journal of Science and Technology*, 43, 86-90, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1200056>.
- [20] T. Ozturk, O. C. Cinkir, S. Urgan and S. Fidan, 2D investigation of a wing concept with a NACA 4412 airfoil in ground effect operation. *Gazi University Journal of Science*, 9(3), 548-561, 2021. <https://doi.org/10.29109/gujsc.954959>
- [21] Y. A. Çengel ve J. M. Cimbala, *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları (3. Baskı)*. SS. 9-10, Palme Yayıncılık, Ankara, 2020.
- [22] Y. A. Çengel ve J. M. Cimbala, *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*, SS. 615-618, Palme Yayıncılık, Ankara, 2015.





Farklı girdap üreteçlere sahip bir aracın aerodinamiğinin sayısal incelenmesi Numerical investigation of aerodynamic of a car with various vortex generators

Onur Yemenici^{1,*} , Halit Kasap² 

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

² Üçel Kauçuk A. Ş., 16159, Bursa, Türkiye

Öz

Bu çalışmada 1:5 ölçekli yamuk ve kavisli kanat girdap üreteçlere sahip binek bir aracın aerodinamik özellikleri nümerik olarak araştırılmıştır. Araç tasarımı CATIA V5R21 ile yapılırken, geometrik düzenlemeler, sayısal çözüm işlemleri ve ağ örme için ANSYS programı kullanılmıştır. Hava hızı 100 km/h olarak sabit tutulmuş ve akış alanının çözümü realizabl k-ε türbülans modeli ile yapılmıştır. 8 adet girdap, basınç dağılımları ve aerodinamik katsayılar incelenerek, girdap üretici kullanılmamış durumdaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar aracın arka kısmındaki akış alanının ve aerodinamik karakteristiklerin girdap üreteçlerin varlığından ve yapısından etkilendiğini göstermiştir. Kavisli kanat girdap üreticinin kullanılması sürüklenme katsayısında %2.87 oranında bir azalmaya sebep olurken, yamuk kanat girdap üreticinin kullanılması durumunda bu oran %2.20 olarak tespit edilmiştir. Kaldırma katsayısındaki maksimum artış %3.3 olarak yamuk kanat girdap üreteç kullanılması ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Girdap üreteçleri, Sürüklenme katsayısı, Binek araç, Kaldırma katsayısı

1 Giriş

Günümüzde sanayileşmenin ve fosil yakıt kullanımının artması ile iklim krizi ciddi boyutlara ulaşmıştır. Araç aerodinamiği yakıt tüketimi, konforu ve yol tutuşunu doğrudan etkileyen bir faktör olduğundan literatürde bu konuyla ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmalar genel olarak, araç üzerindeki akış yapısı ve aerodinamik katsayıların incelenerek sürüklenme direncini düşürmek ve negatif kaldırma kuvvetini arttırmak üzerine yoğunlaşmıştır (Bruneau vd. [1], Lienhart ve Becker [2], Hesse ve Morgans [3], Sivaraj vd. [4], Ebrahim ve Dominy [5]). Böylece yakıt tüketimini düşürmek, aracın stabilitesini arttırmak ve aerodinamik gürültü seviyesini iyileştirmek amaçlanmaktadır. Araç arkasındaki akış ayrılmaları sürüklenme direncini arttırdığından, bu ayrılmaları geciktirmek amacıyla da girdap üreteçler kullanılmaktadır. Örneğin, Palanivendhan vd. [6], bir sedan araç üzerine eşit aralıklarla girdap üreteçleri yerleştirmiş, hücum açılarını ve üreteçlerin sayılarını farklı seçerek aerodinamik direnci

Abstract

In this study, the aerodynamic characteristics of a 1:5 scale passenger car with trapezoidal and curved wing vortex generators was investigated numerically. The vehicle design was made with the CATIA V5R21 and the ANSYS was used for the geometric, numerical solution and meshing. The air velocity was kept constant at 100 km/h and the solution of the flow field was completed with the realizabl k-ε turbulence model. Eight vortex generators at 100 mm intervals were placed 15 mm ahead of the flow separation point formed at the back of the vehicle roof. The flow structure of the vehicle with vortex generators was examined with velocity distributions, pressure distributions and aerodynamic coefficients, and compared with the results without the vortex generator. The results showed that the flow field and aerodynamic characteristics behind the vehicle were affected by the presence and structure of vortex generators. The use of the curved wing vortex generator caused a 2.87% reduction in the drag coefficient, while this rate was determined as 2.20%, in the model using trapezoidal wing vortex generator. The maximum increase in the lift coefficient was found in the model with the trapezoidal wing vortex generator of 3.3%.

Keywords: Vortex generators, Drag coefficient, Passenger car, Lift coefficient

azaltmayı amaçlamıştır. Analizler sonucunda sürüklenme değerlerinde %12 ile %15 arasında iyileştirme tespit edilmiştir. Beaudoin ve Aider [7], pasif akış kontrolü için Ahmed modeline girdap üreteçleri ekleyerek deneyler yapmıştır. Girdap üreteçleri aralarındaki mesafe, üreteçleri ile yüzey arasındaki açı, üreteçlerin konumu ve akış hızı gibi farklı parametrelerin etkisi belirlenmiştir. Kaldırma katsayısında ve sürüklenme direncinde sırasıyla maksimum %60 ve %12 azalma elde etmiştir. Selvi Rajan vd. [8], çalışmasında 1:10 ölçekli ahşap malzemeden üretilen farklı konumlara yerleştirilmiş iki tip girdap üretece sahip bir araç modeli kullanmıştır. Aracın tavanının ön bölümüne girdap üreteç yerleştirilmesi direnç katsayısında kayda değer bir azalmaya neden olmuş ve sürüklenme katsayısında %22 oranında düşüş elde edilmiştir. Subbiah vd. [9], farklı tiplerde girdap üreteç ve spoiler kullanılan bir binek otomobilin aerodinamik karakteristiklerini incelemiştir. Sonuçlar girdap üreteçlerin varlığının sürüklenme dirençlerini azalttığını ve bu dirençlerin vorteks üreteç

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oseckin@uludag.edu.tr (O. Yemenici)

Geliş / Received: 12.01.2023 Kabul / Accepted: 23.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1232871

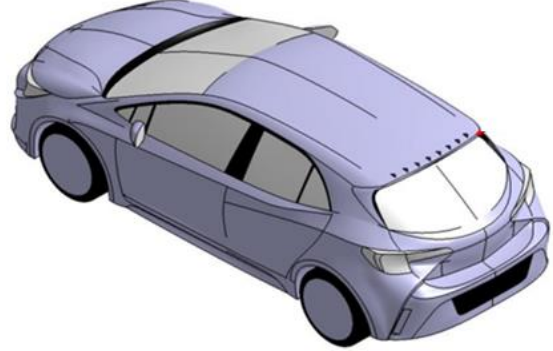
tasarımlarından etkilendiğini göstermiştir. Huminic ve Huminic [10], eliptik ve dairesel gövde altı difüzörlere sahip küt bir cismin aerodinamiğini difüzörler açısı ve uzunluğu etkisinde incelemiş ve elde edilen sonuçlar düz gözde altı difüzörü için elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Kavisli difüzörlerin kullanılması yere basma kuvvetinde %20 artışa neden olmuş ve bu difüzörler düzlem difüzörlere göre daha düşük sürüklenme değerlerine yol açmıştır. Aider vd. [11], Ahmed modelinin arka bölümünde bulunan farklı yerlerdeki kanatçıkların tesirini farklı serbest akış hızlarında incelemiştir. Kanatçıkların aracın arka eğiminin üst kısmına ve yan kenarlarına yerleştirilmesi sürüklenme kuvvetinde sırasıyla maksimum %15 ve %17.6 azalmaya neden olmuştur. Sonuçlar uygun düzenlemelerle kaldırma ve sürüklenme katsayılarında sırası ile %107 ve %25 değerinde azalma sağlanabileceğini göstermiştir. Verma vd. [12], dudak biçiminde rüzgârlığa sahip bir binek araç üzerinden akışta rüzgârlık açısı ve yüksekliğinin sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri üzerine etkisini incelemiştir. Sonuçlar sürüklenme kuvvetinin rüzgârlık açısının artması ile azaldığını göstermiş ve kaldırma ve sürüklenme kuvveti için en uygun açının 6° - 10° arasında olduğunu belirtmişlerdir. Buscariolo vd. [13], 0° ve 25° eğimli gövde altı difüzörlere sahip bir Ahmed modeli için yere basma kuvvetini difüzör açısı etkisinde incelemiştir. Maksimum sürüklenme ve negatif kaldırma kuvvetleri arka üst eğim 0° ve difüzör açısı 30° olduğunda elde edilirken, 30° difüzör açılarda akış difüzörden ayrılmıştır. Koike vd. [14], akış ayrılma noktasının yukarı akışına üçgen kanat ve yumru girdap üreteçleri ekleyerek aerodinamik sürüklenmeyi azaltmayı hedeflemişlerdir. Üçgen kanat girdap üreteçleri kullanılarak yumru girdap üreteçlerine göre daha verimli sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca sürüklenme ve kaldırma katsayısında en fazla 0.006 oranında bir azalma tespit edilmiştir. Gilliéron ve Kourta [15], bir araç modelinin arka ve ön tarafına çeşitli açılarda dikey ayırıcılar ekleyerek sürüklenme kuvvetini azaltmayı hedeflemişlerdir. Dikey ayırıcının sıfır eğrilik açısı ile aracın ön kısmında olduğu durumda yaklaşık %28'lik bir azalma tespit edilmiştir. Dikey ayırıcıların aracın arka kısmında olduğu zaman ise Reynolds sayısının artması ile direnç azalması artmıştır.

Bu çalışmada yamuk ve kavisli kanat girdap üreteçlere sahip 1:5 ölçeğe sahip binek bir aracın aerodinamik incelemesi nümerik olarak yapılmıştır. Girdap üreteçler binek aracın tavanın arka kısmında gerçekleşen akış ayrılma noktasının önüne yerleştirilmiş ve sonuçlar girdap üreteci kullanılmamış araç sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hava hızı 100 km/h olarak sabit tutulmuş ve akış alanının çözümü realizabl k- ϵ türbülans modeli ile yapılmıştır.

2 Materyal ve metot

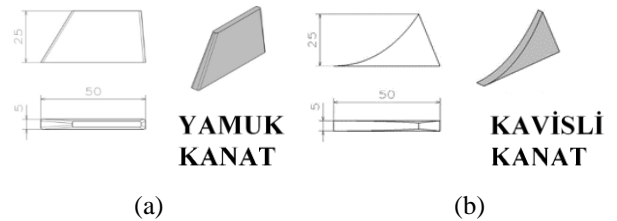
Bu çalışmada ticari bir binek aracın katı modeli CATIA V5R21 programı ile orijinal ölçüleri referans alınarak yapılmıştır. Öncelikle tel çerçeve modülündeki eğrilerle aracın genel hatları oluşturulmuş ve ardından aracın dış formları yüzey komutları ile verilerek katı modele geçilmiştir. Analizlerde aracın alt kısmı tasarım zorluğu ve bilgisayar kapasitesinin verimli kullanılması nedeniyle düz bir biçimde tasarlanmıştır. Modelin arka kısmındaki akışı

kontrol ederek aerodinamik sürüklenme direncini iyileştirmek için yamuk ve kavisli girdap üreteçler kullanılmıştır. Oluşturulan bu girdap üreteçlere sahip modelin izometrik görünüşü Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Girdap üreteçlere sahip modelin izometrik görünüşü

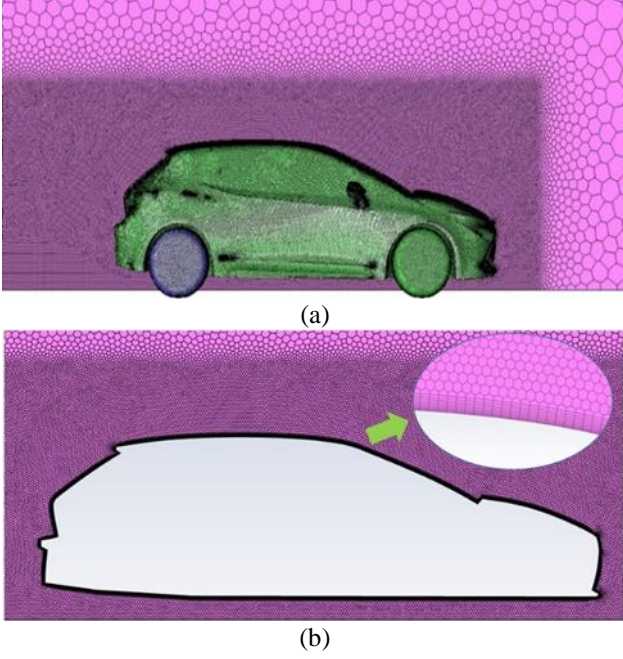
Çalışmada kullanılan yamuk ve kavisli girdap üreteçlerin ölçüleri Şekil 2 (a) ve (b)' de sırasıyla gösterilmiştir. 8 adet girdap üreteci aracın arka bölümündeki ayrılma noktasının 15 mm uzaklıktaki yukarı akımına 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir.



Şekil 2. (a) Yamuk ve (b) kavisli kanat girdap üreteç

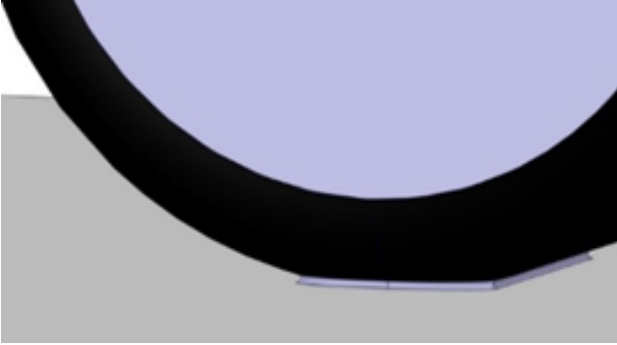
Aerodinamik analizler ANSYS FLUENT programı ile yapılmıştır. Donanımların ve çözüm sürelerinin optimum kullanımı için modelin sadece yarısının analizi yapılmıştır. Çözüm için oluşturulan akış alanının ölçüleri blokaj etkileri göz önünde tutularak seçilmelidir. Blokaj oranı modelin projeksiyon alanının test bölümünün kesit alanına oranıdır. Düşük blokaj oranı gerçek sürüş koşullarına daha yakın simülasyonlara ve test sınırlarının akışa etkisinin azalmasına neden olur. Bu çalışmada çözüm için oluşturulan akış alanının boyu 27 m, yüksekliği 6.5 m ve genişliği 6.5 m olarak seçilirken, art izi bölgesinin boyutları sırasıyla 10 m, 2 m ve 1.5 m olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu ölçülere göre çalışmadaki blokaj değeri %2.6' dır ve Arabacı [16] tarafından blokaj oranı için verilen maksimum %7.5 değerinden azdır.

Şekil 3 (a) ve (b)' de çözüm alanı ağ yapısı detayları verilmiştir. Akış alanında art izi ve katı yüzey etrafındaki bölgelerdeki ağın oluşturulması doğru modellenme için çok önemli olduğundan, araç etrafındaki ve art izi bölgesinde hacim kaynağı ile hücre sayısı arttırılmıştır. Tekerlekler, tekerleklerle yerin birleştiği ve araç gövdesinde de hücre sayıları arttırılmıştır. Analizlerin doğruluğunu arttırmak için duvara yakın bölgede sınır tabaka katmanları kullanılmıştır.



Şekil 3. Akış alanı ağ yapısı

Yer ile tekerleklerin temas ettiği alandaki ağı iyileştirmek için bu bölge Şekil 4' te gösterildiği gibi revize edilmiştir.



Şekil 4. Tekerleğin yer ile temas ettiği bölge

Analizlerde kullanılan ağ yapısı 3464701 karışık hücre ve 12442656 yüzeyden oluşmaktadır ve oluşturulan bu ağ yoğunlukla poligonal hücrelerden oluşmaktadır. Çalışmada oluşturulan ağın minimum ortogonal kalitesi ve çarpıklık oranı sırasıyla 0.31 ve 0.71 olarak elde edilmiş ve bu oranlar Arabacı [16] tarafından verilen değerlere göre iyi seviyededir. Havanın giriş hızı ve türbülans yoğunluğu sırasıyla 100 km/h ve %15 olarak seçilirken, çıkış atmosferik ortam olarak ele alınmıştır. Aracın gövdesi hareketsiz kabul edilirken, tekerlekleri dönel hareketli ve zemin öteleme hareketli sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

Sıkıştırılamaz, sürekli bir akış alanının çözümü için süreklilik ve momentum denklemleri Denklem (1) ve (2)' de sırasıyla verilmiştir.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

Burada $-\overline{u'_i u'_j}$ terimi Reynolds gerilmesini ifade etmektedir. Deneysel sonuçlara yakın sonuçlar verdiği için araç dışı aerodinamik akışların modellenmesinde sıklıkla yararlanılan realizable k-ε türbülans modeli ile analizler yapılmıştır. Çalışmada standart duvar koşulları kullanılmış ve yakınsama kriteri 1×10^{-6} olarak alınmıştır.

Ayrıca sayısal çözümde bağlaşıklık çözüm şeması ve ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. k ve ε sırasıyla türbülans kinetik enerji ve yayılım ifade etmektedir ve transport denklemleri Denklem (3) ve (4)' te verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon \quad (4)$$

Burada P_k ve P_b sırasıyla hız gradyanları ve kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi iken, türbülansın tüm yayılma hızına oranı Y_M ile ifade edilmiştir. Ayrıca $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$, $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$, $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ and $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ ile tanımlanır ve $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k ve σ_ϵ değerleri sırasıyla 1.44; 1.9; 1.0 ve 1.2'dir.

Sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırasıyla Denklem (5) ve (6) ile hesaplanmaktadır.

$$C_d = F_d / (0.5 \rho U_\infty^2 A) \quad (5)$$

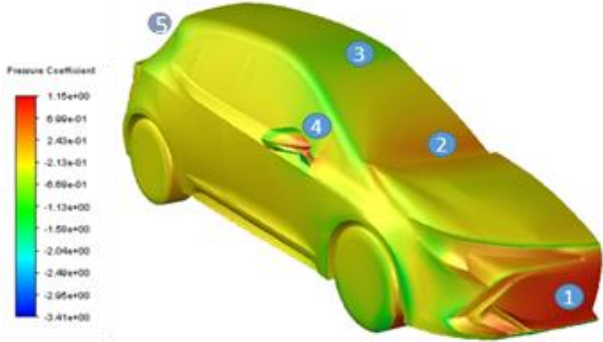
$$C_l = F_l / (0.5 \rho U_\infty^2 A) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde ρ akışkanın yoğunluğu, U_∞ serbest akış hızı, A aracın hava akışına dik kesit alanı, F_d sürüklenme kuvveti ve F_l kaldırma kuvvetidir.

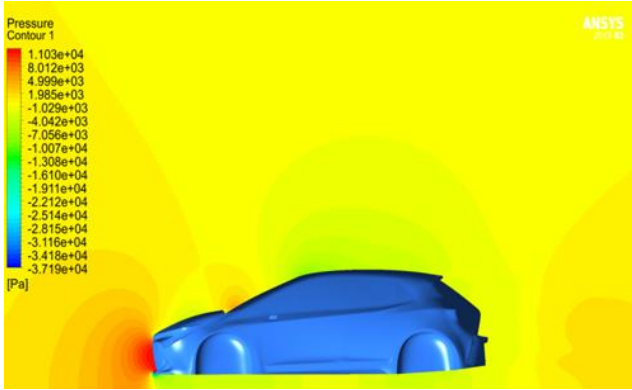
3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde girdap üretici kullanılan ve kullanılmayan modellerin etrafındaki akış alanı hız dağılımları, basınç dağılımları ve aerodinamik katsayılar ile incelenmiştir. Araç etrafındaki akışın yapısını daha iyi tanımlamak için modelin hem simetri hem de $z=0.5h$ -xy düzlemindeki görselleri elde edilmiştir. Tüm analizler %5 türbülans yoğunluğu ve 100 km/s akış hızı için yapılmıştır. Şekil 5' de girdap üreticisiz araç üzerindeki basınç değişiminin izometrik görünümü verilmiştir. Aracın ön kısmında ızgaraların olduğu bölge (1) ve dikiz aynasının ön kısmı (4) durma noktasıdır. Bu bölgelerde yüksek pozitif basınçlar elde edilmiştir. Kaputun ön tarafından sileceklere kadar olan kısımda (2) de tekrar bir basınç artışı tespit edilmiştir. Tavanın ön tarafında (3) ise negatif basınç değerleri elde edilmiş ve tavanın arka tarafına

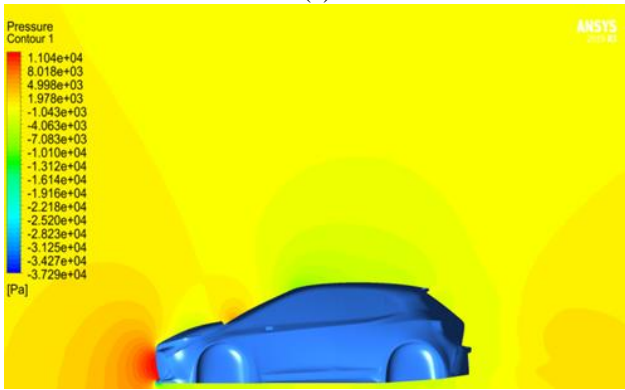
doğru basınç tekrar artmıştır. Aracın arka tarafına (5) ilerlenmesi ile basıncın arttığı, aracın arka bölgelerinin ise negatif basıncın etkisinde olduğu görülmektedir. Aracın arka ve ön tarafındaki bu basınç değişimleri Ebrahim ve Dominy [5]' nin araştırmasında elde edilen dağılımlarla uyumludur.



Şekil 5. Girdap üreteç kullanılmayan model üzerindeki basınç katsayısı dağılımı



(a)



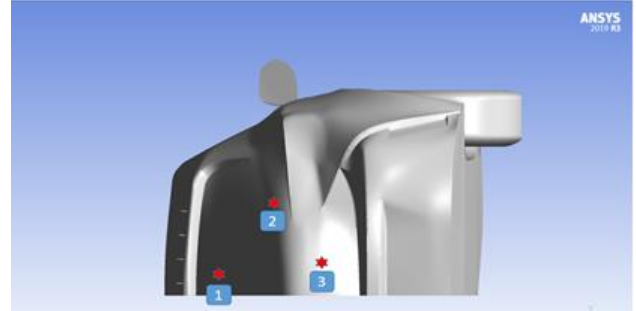
(b)

Şekil 6. (a) Yamuk ve (b) kavisli girdap üreteci kullanılan modelin simetri düzlemindeki basınç dağılımı

Şekil 6'da yamuk ve kavisli girdap üreteç kullanılması halinde simetri düzleminde elde edilen basınç dağılımı verilmiştir. Her iki modelin de ön kısmında pozitif basınç değerleri elde edilirken, yan ve arka kısımlarında negatif basınç değerleri izlenmiştir. Ön kaputun başladığı bölgede lokal negatif tepe basınç değerine ulaşılırken, bu bölgeden sileceklere kadar olan kısımda basınç artmıştır.

Sileceklerden tavanın ön kısmına kadar olan bölgede negatif basınç değerleri elde edilmiştir. Tavanın ön kısmında basınç minimum değerine ulaşmış ve aracın arka kısmının negatif basıncın etkisinde olduğu görülmüştür. Arka bölgedeki negatif basınçlar art izi bölgesindeki ters akış ve ayrılmalardan kaynaklanmaktadır.

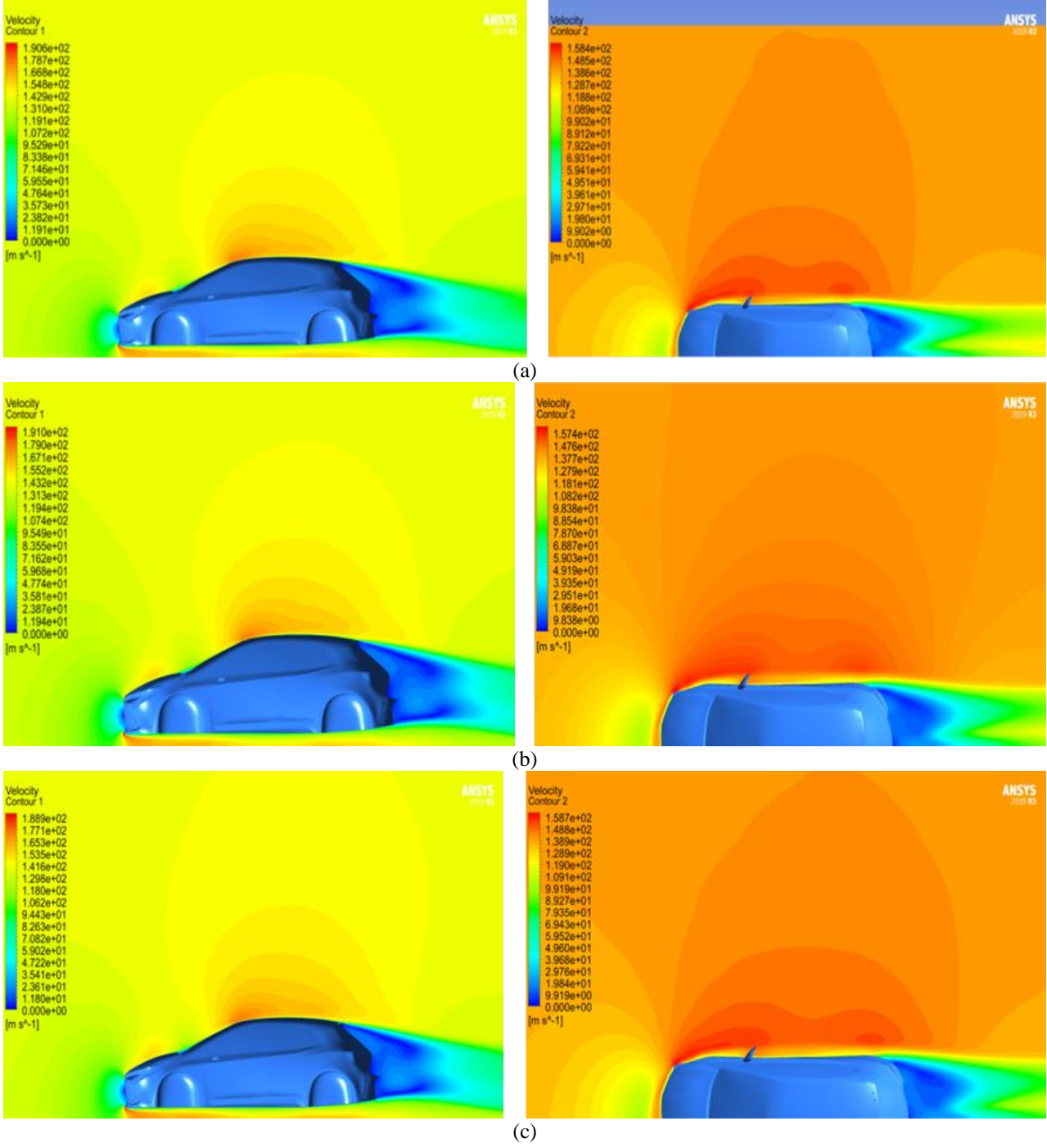
Girdap üreteçsiz model ile girdap üreteçli modellerin basınç dağılımları benzerlik gösterirken, bu modellerin arka bölgesindeki basınç değerleri Şekil 7'de gösterildiği gibi belirlenen noktalarla detaylandırılmıştır. Girdap üreteçlerinin varlığı aracın arka kısmındaki basınç değerlerinin artmasına neden olmuştur. Bu artış aracın ön ve arkasındaki basınç farkının azalmasına ve dolayısıyla aracın sürüklenme katsayısı değerlerinde iyileştirmelere neden olmuştur. En yüksek negatif basınç değeri -2470.19 Pa olarak girdap üreteç kullanılmayan modelin 2. noktasında elde edilirken, en düşük negatif basınç değeri yamuk girdap üreteçli araç modelinin 3. noktasında -1381.08 Pa olarak tespit edilmiştir. Minimum basınç artışı kavisli kanat girdap üreteçli modelin 3. noktasında %3.93 olarak elde edilmiştir.



Şekil 7. Modellerin arka kısmında belirlenen noktalar

Şekil 8 (a-c)'de girdap üreteçsiz, yamuk girdap üreteçli ve kavisli girdap üreteçli modellerin $z=0.5h-xy$ ve simetri eksenindeki hız konturleri sırasıyla gösterilmiştir. Tüm modellerde ızgaralıkların bulunduğu ön kısım durma noktası olduğu için bu bölgelerde düşük hız değerleri elde edilmiştir. Kaputun merkezinde akış hızlanmış ve en yüksek hız tavanın ön kısmında elde edilmiştir. Aracın yan tarafında serbest akış hız verilerinin üstünde hız değerleri elde edilmiştir. Aracın arka kısmında art izi bölgesi olarak adlandırılan bölgede elde edilen düşük hız değerleri bu bölgede oluşan akış ayrılması ve yeniden birleşme bölgeleri ile açıklanabilir. Bu sonuçlar basınç ve hız dağılımları sonuçlarının birbiriyle uyum içinde olduğunu göstermektedir.

Şekil 9 (a-c)'de girdap üretecin kullanılmadığı, yamuk ve kavisli girdap üreteçli araç modellerinin simetri eksenindeki hız vektörleri gösterilmiştir. Hava tüm modellerde aracın önüne çarpar ve akış çizgileri aracın orta düzlemi boyunca yüzey geometrisi ile değişir. Aracın ön kısmında basıncın yüksek olmasından dolayı akış çizgileri yüzeyden ayrılmıştır. Havanın çarptığı ön cam ile üst tavanının kesiştiği yerde ve ön tamponunun alt kenarında yüksek hızlar tespit edilmiştir. Aracın arka tarafında da akış çizgileri yüzeye tutunamamış ve akış ayrılması meydana gelmiştir. Bu ayrılma bölgesinde girdaplar oluşmuş ve bu girdap hareketleri aracın art izi bölgesinde geniş bir dolaşım bölgesi oluşturmuştur. Bu girdapların varlığı düşük hızlara neden

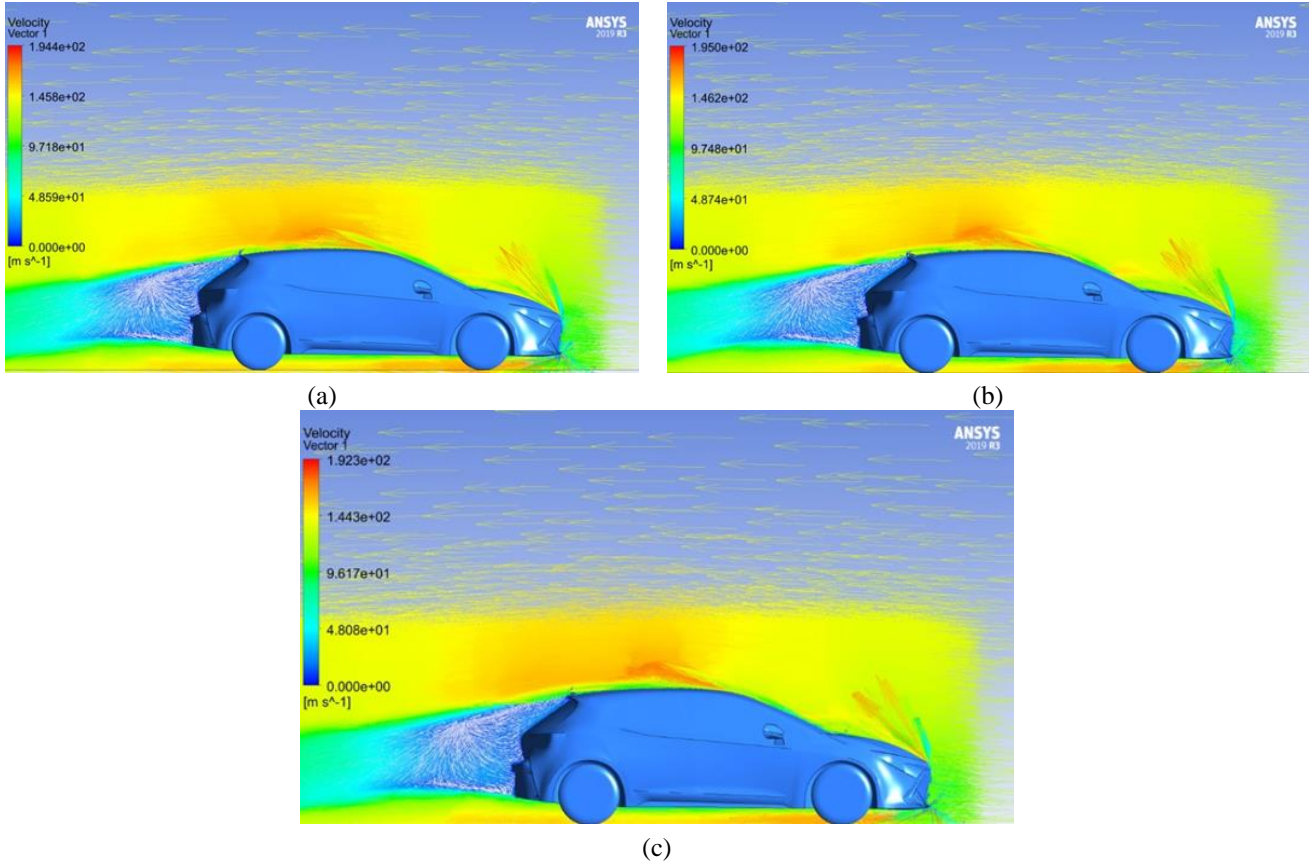


Şekil 8. (a) Girdap üretçisiz, (b) yamuk girdap üretici ve (c) kavisli girdap üretici kullanılan modelin simetri ve $z = 0,5h$ -xy düzlemindeki hız konturleri

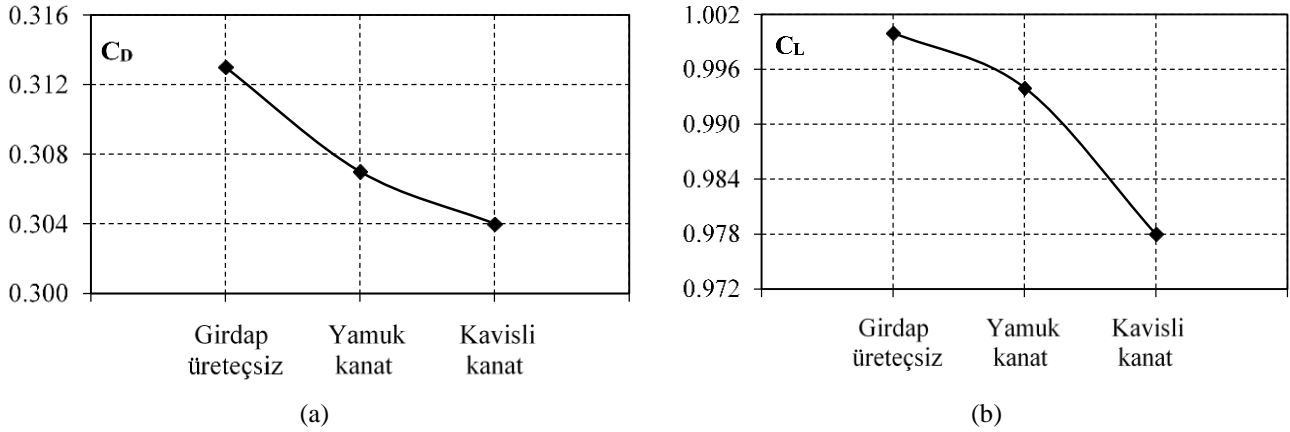
olmuş ve girdaplardan uzaklaştıkça hız değerleri artmıştır. Aracın art izi bölgesindeki akış çizgilerinin yapısı ve büyüklükleri girdap üreticilerinin geometrisine bağlı olarak değişmiştir. Minimum ve maksimum dolaşım bölgesi uzunlukları sırasıyla kavisli kanat girdap üreticili ve girdap üretçisiz modelde tespit edilmiştir.

Şekil 10 (a) ve (b)'de tüm modeller için sürüklenme ve kaldırma katsayıları sırasıyla verilmiştir. Girdap üretici kullanılmış modellerin hem sürüklenme hem de kaldırma katsayıları girdap üretici kullanılmamış modellere göre daha

düşük çıkmıştır. Minimum sürüklenme ve kaldırma katsayısı kavisli kanat girdap üreticinin kullanıldığı modelde tespit edilmiştir ve girdap kullanılmamış modele göre sırasıyla %2.96 ve %2.14 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Yamuk kanat girdap üretici kullanılan modelde ise girdap üretçisiz model göre sürüklenme ve kaldırma katsayısında sırasıyla %1.95 ve %0.6'lık bir azalma sağlanmıştır. Ayrıca araç üzerinde oluşan sürüklenme kuvvetinin %89.9 oranındaki kısmının basınç kaynaklı kuvvetlerden oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 9. (a) Girdap üreticinin kullanılmadığı, (b) yamuk ve (c) kavisli girdap üreticili modellerin simetri eksenindeki hız vektörleri



Şekil 10. Çalışmada kullanılan tüm modellerin (a) sürüklenme ve (b) kaldırma katsayıları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada yamuk ve kavisli girdap üretice sahip 1:5 ölçekli binek araç modellerinin aerodinamik karakteristikleri sayısal olarak incelenmiş ve sonuçlar girdap üretici kullanılmayan model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- Araç etrafındaki akış alanının yapısı ve aerodinamik karakteristikler girdap üreticilerinin varlığından ve geometrisinden etkilenmiştir.

- Araç modelleri üzerinde en yüksek pozitif basınçlar ön kısımda ızgaraların olduğu bölge ve dikiz aynasının önünde elde edilirken, araçların arka tarafları negatif basıncın etkisindedir.
- Tüm modellerde ızgaralıkların bulunduğu ön kısımda ve aracın arka kısmındaki art izi bölgesinde düşük hız değerleri elde edilmiştir. Araçların arka tarafında meydana gelen ayrılma bölgesinde girdaplar oluşmuş ve bu girdap hareketleri aracın art izi bölgesinde geniş bir dolaşım bölgesi oluşturmuştur. Kavisli kanat

girdap üreticisine sahip model üzerinden akışta minimum dolaşım bölgesi uzunluğu elde edilirken, girdap üreticisiz modelde minimum uzunluk tespit edilmiştir.

- Kavisli ve yamuk kanat girdap üreticinin kullanıldığı modelde sürüklenme katsayısında girdap kullanılmamış modele göre sırasıyla %2.96 ve %1.95 oranında bir iyileşme elde edilmiştir.
- Kaldırma katsayısında kavisli ve yamuk kanat girdap üreticisi kullanılan modelde girdap üreticisiz modele göre sırasıyla %2.14 ve %0.6'lık bir azalma sağlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] C. H. Bruneau, E. Creusé, P. Gilliéron and I. Mortazavi, Effect of the vortex dynamics on the drag coefficient of a square back Ahmed body: Application to the flow control. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 45, 1–11, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.11.003>.
- [2] H. Lienhart and S. Becker, Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. *Journal of Passenger Car: Mechanical Systems Journal*, 112, 785-796, 2013. <https://about.jstor.org/terms>.
- [3] F. Hesse and A. S. Morgans, Simulation of wake bimodality behind squareback bluff-bodies using LES. *Computers and Fluids*, 223, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2021.104901>.
- [4] G. Sivaraj, K. Parammasivam, M. Prasath, P. Vadivelu and D. Lakshmanan, Flow analysis of rear end body shape of the vehicle for better aerodynamic performance. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2175-2181, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.521>.
- [5] H. Ebrahim and R. Dominy, Wake and surface pressure analysis of vehicles in platoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 201, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104144>.
- [6] M. Palanivendhan, J. Chandradass, P. K. Banaravuri, J. Philip and K. Shubham, Aerodynamic simulation of optimized vortex generators and rear spoiler for performance vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7228–7238, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.537>.
- [7] J. F. Beaudoin and J. L. Aider, Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps. *Experiments in Fluids*, 44, 491–501, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00348-007-0392-1>.
- [8] S. Selvi Rajan, P. Harikrishna, S. Senthilkumar and K. M. Parammasivam. Aerodynamic drag reduction on a sedan car by provision of vortex generators through wind tunnel studies. *Conference: National Conference on wind tunnel testing*, pp. 1-7, Thiruvananthapuram, 2013.
- [9] G. Subbiah, A. S. Allaudeen, H. Janarthanam, P. Mani, S. Gnanamani, K. S. S. Raja and T. A. Raja, Computational investigation and design optimization of vortex generator for a sport utility vehicle using CFD. *AIP Conference Proceedings*, 2311, Fame, 2020.
- [10] A. Huminic and G. Huminic, G., Aerodynamics of curved underbody diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 205, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104300>.
- [11] J.-L. Aider, J.-F. Beaudoin, J. Eduardo Wesfreid and J. Eduardo. Drag and lift reduction of a 3D bluff-body using active vortex generators. *Experiments in Fluids*, 5, 771–789, 2010. Doi: [10.1007/S00348-009-0770-Y](https://doi.org/10.1007/S00348-009-0770-Y)
- [12] R. P. Verma, N. Kumar Chaudhary and S. Avikal, Effect of direction of lip spoiler on the aerodynamic performance of a small passenger vehicle. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10301-10305, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.448>
- [13] F. F. Buscariolo, G. R. S. Assi and S. J. Sherwin, Computational study on an Ahmed Body equipped with simplified underbody diffuser. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104411>
- [14] M. Koike, T. Nagayoshi and N. Hamamoto, Research on aerodynamic drag reduction by vortex generators, *Mitsubishi Motors Technical Review*, No: 16 N., 2004.
- [15] P. Gilliéron and A. Kourta, Aerodynamic drag reduction by vertical splitter plates. *Experiments in Fluids*, 48(1), 1–16, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0705-7>
- [16] S. Arabacı, Canlılardan esinlenerek kara taşıtlarının aerodinamik tasarımlarının iyileştirilmesi. *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye, 2016.





Effects of multi walled carbon nanotube and silicon carbide reinforcement on wear performance in zinc-aluminium alloys

Çinko-alüminyum alaşımlarda karbon nanotüp ve silisyum karbür takviyesinin aşınma performansına olan etkisinin incelenmesi

Emre Deniz Yalçın^{1,*} , Aykut Çanakçı² 

¹ Karadeniz Technical University, Abdullah Kanca Vocational School of Higher Education, 61530, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Technical University, Department of Metallurgical and Material Science Engineering, 61080, Trabzon, Türkiye

Abstract

In this study, hybrid composite materials were produced by adding SiC (Silicon carbide) and MWCNT (Multi-walled carbon nanotube) to Zinc-Aluminium (ZA40) alloy, sintering under 700 MPa pressure and 500 °C using mechanical alloying and hot press technique. Hybrid samples were produced with 2% MWCNT constant and SiC ratio 1-2-3 and 4% by weight in the mixtures. The mechanical properties such as hardness and porosity of the produced hybrid composite materials were determined and their wear properties were investigated by traveling 300 m using 10 and 20N loads under 300 rpm constant speed in a ball-on-disc wear test setup. The obtained microstructure and wear surface images showed that the SiC and MWCNT reinforcement contributed significantly to the wear resistance of the hybrid composites, and in the SEM analyzes of the worn surfaces, there was a transition from abrasive wear to adhesive wear in the wear mechanism.

Keywords: Powder metallurgy, Hybrid composite, Wear, ZA40, SiC, MWCNT

1 Introduction

Considering the low melting temperature, good machinability, superior tribological behavior, and reasonable cost of Zn-Al series alloys (Zinc-Aluminium) in modern production technologies, brass, cast iron, and aluminium are distinguished from the series alloys and immediately attract the attention of designer engineers [1, 2]. In particular during the cold war years, ZA8-ZA12-ZA27-ZA33 and ZA40 series alloys were produced. Especially, these alloys are used in very few applications due to the deterioration of their mechanical properties at temperatures above 100 °C. Since ZA series are one of significant alloying elements, it is possible to produce new types of hybrid composite materials with advanced engineering properties by performing them with ceramic and carbon-based reinforcement materials at different rates. In recent years, hybrid composites have been produced by adding more than one reinforcement material to ZA series alloys and they have been used successfully in various engineering applications such as automotive, construction, aviation and defence industries [3, 4, 5]. Silicon carbide is used as a reinforcement material in

Öz

Bu çalışma kapsamında Çinko-Alüminyum (ZA40) alaşımına SiC (Silisyum karbür) ve MWCNT (Çok duvarlı karbon nanotüp) takviyesi yapılarak, mekanik alaşımlama ve hot pres tekniği kullanılarak 700 MPa basınç altında ve 500 °C sıcaklıkta sinterlenerek hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir. Karışımlarda %2 ile MWCNT oranı sabit tutulup SiC oranı ağırlıkça %1-2-3 ve 4% olarak hibrit numuneler üretilmiştir. Üretilen hibrit kompozit malzemelerin sertlik ve porozite gibi mekanik özellikleri belirlenip ball-on-disk aşınma test düzeneğinde 300 rpm sabit hız altında 10 ve 20N yükler kullanılarak 300 m yol olarak aşınma özellikleri incelenmiştir. Elde edilen içyapı ve aşınma yüzey görüntüleri SiC ve MWCNT takviyesinin hibrit kompozitlerin aşınma direncine önemli ölçüde katkılar sağladığı ve aşınmış yüzeylerin SEM analizlerinde aşınma mekanizmasında abrazyif aşınmadan adhezif aşınmaya doğru bir geçiş olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Toz metalurjisi, Hibrit kompozit, Aşınma, ZA40, SiC, MWCNT

important parts for example transmission boxes, and tribune blades, particularly in the defence-aviation industry [6]. In a study examining the wear behavior of composite materials formed by adding SiC reinforcement to AA7075 alloy in pin-on disc wear device, it was observed that 15% SiC reinforcement significantly reduced the wear rate and friction coefficient of composites [7]. In a study examining the wear behavior of hybrid composite specimens formed by Taguchi method by adding SiC and graphite to ZA27 alloy in pin-on-disc experimental setup in a dry friction environment, it was observed that SiC and graphite additive significantly improved the wear resistance of hybrid specimens [8]. In a study examining the mechanical and wear properties of the composite samples obtained by adding 0-0.5-1-1.5 and 2 wt% SiC into the ZA40 matrix, the wear and tear under 10 and 20N loads by traveling 100 meters at 200 rpm in a ball-on disc wear test setup. Strengths, weight losses and friction coefficients were calculated and examined. After the wear tests, detailed SEM pictures of the samples were examined and the effects of wear were determined by looking at the damages. It was seen that

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emredenizyalcin@ktu.edu.tr (E. D. Yalçın)
Geliş / Received: 24.12.2022 Kabul / Accepted: 27.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1223929

increasing SiC reinforcement changed the mechanical properties, and physical of the composites and made significant contributions to the abrasion resistance [4]. In a recent study, composite samples were produced using the powder metallurgy technique and hot press method by adding 0-1-2-3 and 4% hexagonal boron nitride (h-BN) to zinc-aluminium alloy (ZA40) by weight. Wear tests were carried out under 5N and 10N loads in a dry friction environment using the ball-on-disc method. According to the results, it was clearly seen that there are physical, mechanical, and tribological differences between the h-BN reinforced ZA40 and the unreinforced ZA40. It was observed that the wear values decreased significantly, especially with increasing h-BN reinforcement [9]. In the wear tests of hybrid composites formed by adding B₄C and nanographene to AA6061 aluminium alloy, it was observed that B₄C and graphene reinforcement caused improvements in the wear resistance of the samples [10]. In a study examining the mechanical properties of the composite samples formed by adding SiC to the AA2024 alloy, increases in the hardness and relative densities of the composites with a SiC content of 10-20-30-40% by weight were observed [11]. In the pin-on-disc wear tests of the composites produced by the addition of SiC into atomized aluminium, powder metallurgy, and hot press method. It was observed that SiC reinforcement significantly improved the wear resistance of the composites [12]. With the semi-solid molding method, SiC was added to the Al A356 matrix in 4 different weight ratios (5, 10, 15, and 20) and the wear behavior of the produced composites was investigated in the pin-on-disc abrasion test setup with 30 and 60N loads and 500-1000-1500-2000. According to the results, the highest abrasion resistance was observed in the composite sample containing 20% SiC [13]. In a recent study, it was determined that MWCNT-reinforced Al-Cu-Mg composites travelled 500 m under 2N and 5N loads in ball-on-disc wear tests, and MWCNT-doped composites showed lower wear loss under 2N load [14]. According to the test results of AA2024 aluminium alloys reinforced with MWCNT in the ball on disc wear mechanism, MWCNT supplementation increased the lubricating properties of the composites and resulted in significant decreases in wear losses [15].

Our study aims to strengthen the structure and wear resistance of the matrix by adding hard particles to the matrix. Especially with SiC reinforcement, and to minimize the wear caused by adding lubricating properties to hybrid composite materials obtained with MWCNT reinforcement, which is known for its lubricating properties. Thus, it is aimed to increase the wear resistance and load carrying capacity of the hybrid composite samples under heavy loads and long wear path progression.

2 Material and methods

ZA40 alloy was obtained from İki-El Metal Tozları A.Ş. Reinforcement materials SiC and MWCNT were obtained from Alfa Aesar. In addition, the reinforcement ratios and coding of the samples are given in Table 1. The reinforcement material and ZA40 matrix powders (Retsch PM 200) were mixed in a planet type ball mill with a brand

name of 400 rpm in an argon atmosphere for 3 hours. Balls made of tungsten carbide with a diameter of 10 mm were used in the grinding process, and the ball: powder weight ratio was found to be 5:1. Powder mixtures were placed in a 30 mm wide mould made of 4140 steel material and subjected to hot pressing (hot press) at 700 MPa and 500 °C for 3 hours. Before hot pressing, the samples were subjected to cold pre-pressing under 400 MPa pressure for 1 minute. The theoretical densities of the produced samples were determined by applying the Archimedes method at the experimental densities of the mixture rule. The dimensions of the samples are ± 0.01 mg after measuring with a caliper to an accuracy of ± 0.01 mm. The measurements were made by measuring with precision scales. The hardness measurements of the samples were made by using a 2.5 mm diameter penetrating tip under a load of 2.5 kgf with the Vickers hardness measurement method and determined by taking the arithmetic average. The surfaces of the samples prepared for the abrasion tests were sanded and a flat surface was obtained. The ball-on-disc wear test setup shown in Figure 1 was used in the wear resistance tests. Abrasive balls are 10 mm in diameter and manufactured from H11 hot work tool steel. Abrasion tests were performed by traveling 300 meters under 10N and 20N loads at a constant speed of 300rpm. The aim here is to determine the load carrying capacity of the samples on different loads and roads. Morphologies and microstructure analyses of the ground composite powders were examined using a ZEISS LS 10-SEM. The distribution of the reinforcements in the matrix, the porosity, and the interface analyses of the samples were made in detail by SEM analysis. After the wear tests, the type of wear, the surface condition and the damages on the wear surface were examined.

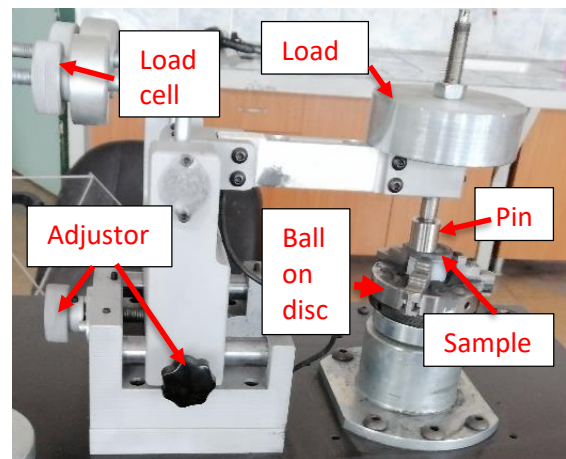


Figure 1. Applied ball on disc wear test

Table 1. Coding of samples and reinforcement ratios

Sample code	ZA40(%)	SiC(%)	MWCNT(%)
H-0	100	0	0
H-1	97	2	1
H-2	96	2	2
H-3	95	2	3
H-4	94	2	4

3 Results and discussion

3.1 Microstructure

A mechanical alloying time of 3 hours was determined in order to ensure as a homogeneous a mixture as possible in the produced Zn-Al based hybrid composite samples and

also to disperse the SiC and MWCNT powders into the matrix thoroughly. If good performance is desired, especially in ZA derivatives alloys, it is essential that the reinforcement particles are sufficiently homogeneously dispersed into the matrix and that a good interfacial bond is formed [16]. SEM-EDS mapping images are shown in Figures 2a-d.

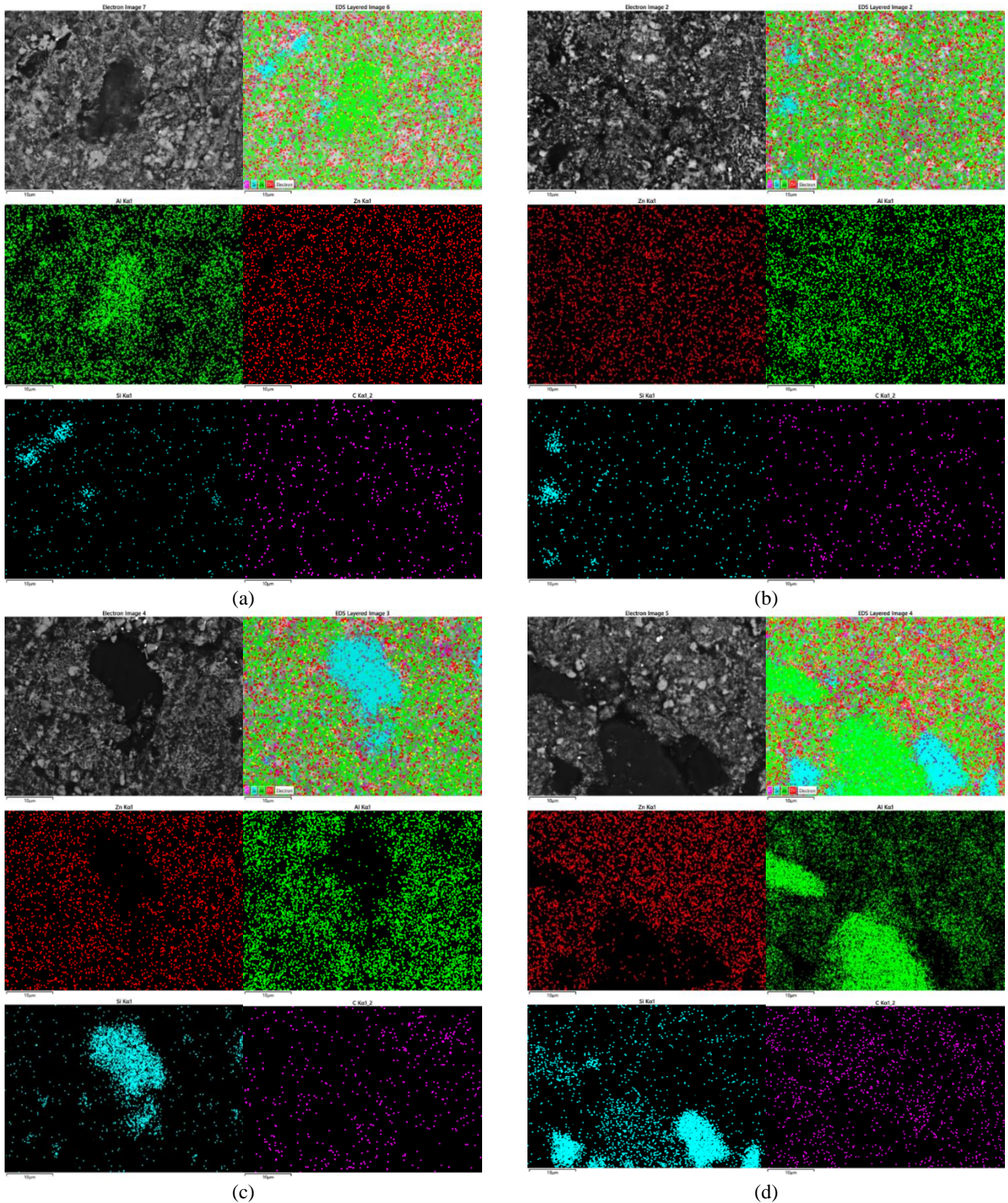


Figure 2. EDS analysis of hybrid composites; (a) H-1, (b) H-2, (c) H-3 and (d) H-4

The red, green, blue, and purple colored regions in these microstructures show the distribution of Zn, Al, Si, and C elements. When Figure 2a-d is examined, it is seen that the mapping patterns of Si, and C elements in SiC and MWCNT structure are less compared to Zn and Al elements, but the mapping patterns of both elements increase significantly with increasing reinforcement ratio. The mechanism that occurs here is that the ZA40 powders surround the SiC and MWCNT powders during mechanical alloying and the reinforcement powders are trapped in the Al matrix. As can be seen from the EDS images, it was determined that SiC powder became agglomerated with increasing reinforcement rates. It is clearly seen that agglomeration areas increase in hybrid composite powders reinforced with 2% MWCNT and 4% SiC, which is the highest ratio. Even though agglomeration regions are seen in Figure 2, it is seen that the distribution of the reinforcement powders in the matrix is successful, and a complete agglomeration does not occur despite the ceramic reinforcement-metal matrix interface, which is known to have poor wetting properties.

3.2 Porosity and hardness

In Figure 3 and Figure 4, hardness values and porosity amounts of ZA40 and reinforced hybrid samples are given. It was clearly seen that increasing SiC reinforcement increased the amount of porosity and caused a decrease in the amount of hardness. The amount of porosity measured at 7.33% in the matrix material increased to 9.06% with the addition of 1% SiC and 2% MWCNT, and reached the highest value of 14.73% in the H-4 sample. Here, the H-1 sample is the sample with the lowest amount of porosity among the hybrid composites. From this, it can be said that the H-1 sample has less agglomeration than other hybrid composites. Specially, the increase in the amount of reinforcement increased the agglomeration of the powders and led to the expansion of the grain boundaries [4, 5]. It is thought that the effect of the packaging factor is here. When we examined the hardness values in Figure 4, it was observed that the hardness of ZA40 measured as 142 HV decreased with the addition of MWCNT and SiC in the matrix.

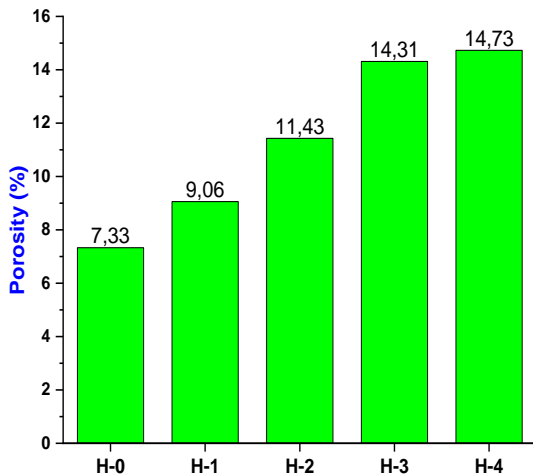


Figure 3. Porosity values of samples

It has been stated in similar publications that the effect of SiC reinforcement on the hardness values of composites is directly proportional to the sintering time [17, 18]. The sample with the lowest hardness value is the H-4 sample with 117 HV. It is possible to clearly say that the increase in the amount of porosity is effective in the decrease of the hardness values.

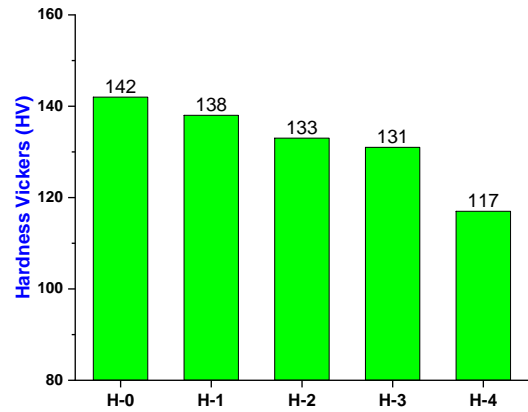


Figure 4. Vickers Hardness values of samples

3.3 Wear

As seen in Table 2 and Figure 5, weight losses of ZA40 and hybrid composites at 10 and 20N loads are given. The weight losses of the hybrid samples under both loads were significantly less than that of the ZA40 alloy. The reason for this is that the SiC hard particles in the ZA40 matrix strengthen the structure of the matrix and absorb the wear, while MWCNT shows wear resistance thanks to its lubricating feature in the system. When the load amount was increased, the weight losses showed a linear increase.

Table 2. Weight loss of samples

Sample Code	10N (mg)	20N(mg)
H-0	0.4261	0.7882
H-1	0.0832	0.1855
H-2	0.0468	0.1503
H-3	0.0167	0.0595
H-4	0.0087	0.0147

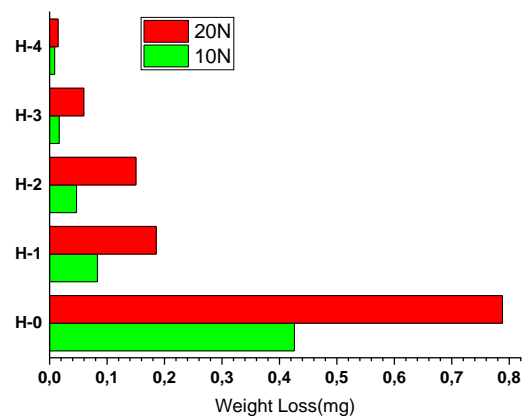


Figure 5. Weight loss of samples

The H-4 sample was the hybrid sample with the least weight loss with 0.0087 mg under 10N load. The least weight loss under all loads occurred in the H-4 sample. When the load ratio was increased by 2 times, the weight loss in the matrix material was almost 2 times, while in hybrid composites this ratio was almost 4 times, especially in the H-2 and H-3 samples. The heterogeneous distribution of SiC and MWCNT particles in the ZA40 matrix, and the interfacial reactions between the matrix material and the reinforcement particles were the properties that affected the wear behavior.

3.4 Worn surface analysis

In Figure 6, detailed SEM images of the worn surfaces of the samples formed after the abrasion tests are given. Stratification and cold ruptures occurred at loads below 10N, and cracks and plastic deformations occurred at 20N loads. In the wear tests performed with a 20N load in the SEM images, more particles were broken off from the samples due to greater weight losses along the 300 m road, only the broken particles adhered to the surface of the hybrid specimen again and cold welding was carried out inside of the wear mechanism. We can say that there is an abrasive wear mechanism in the non-reinforced alloy. Since H11 steel type was used in the wear tests, this tip became the determining parameter in determining the wear mechanism by tearing off large pieces from the surface of the samples that are softer than itself. The basic paradigm used in such studies, especially in the literature, is when a material with a high hardness value is pressed by applying force on another material with very little hardness, localized plastic flow

occurs from the abrasive surface of the hard material to the soft material [19, 20]. When the wear trace diameters are measured in Figure 7, the trace diameters decreased when the MWCNT ratio increased at all loads. Under 10 N load, the trace diameter of ZA40 alloy was measured as 3.406 mm while it was measured as 1.311 mm in H-4 sample. Likewise, under 20 N load, the trace diameter of ZA40 alloy was measured as 4.70 mm while it was measured as 2.022 mm in H-4 sample.

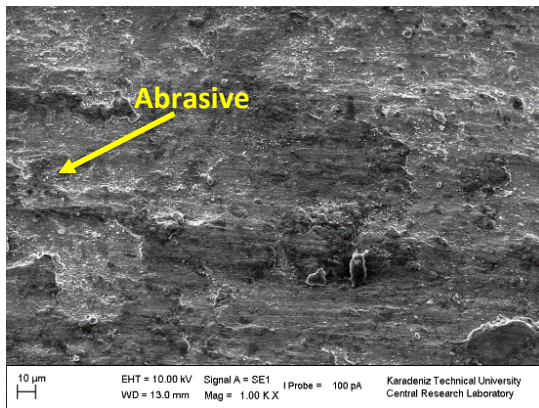
4 Conclusion

In this study, ZA40 matrix material was reinforced with SiC and MWCNT, and samples were produced by powder metallurgy and hot press technique, and their mechanical properties and wear parameters were investigated. The results of the study are listed below.

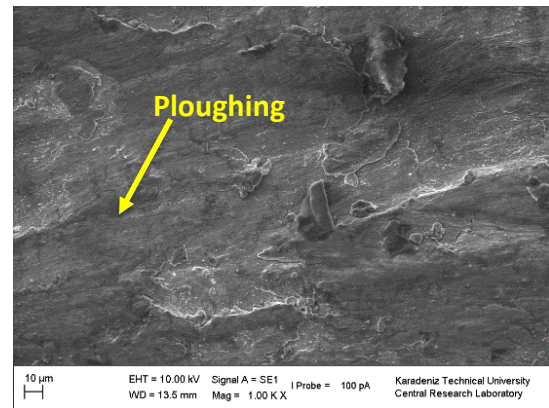
1- When the microstructure results of the mixed powders obtained after mechanical alloying are examined; the milling time during which SiC and MWCNT particles were ideally dispersed in the matrix was determined as 3 hours.

2- The porosity values of 2-hybrid composites increased with the increase of reinforcement ratios. The porosity amount, which was measured as 7.33% in the lowest ZA40 matrix alloy, was measured as 14.73% in the H-4 sample and took the highest value.

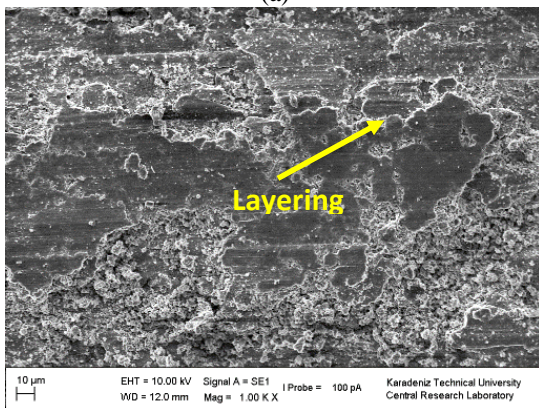
3- The hardness data decreased with the increase of reinforcement ratios and the lowest hardness was obtained from the H-4 hybrid sample with 117 HV, and the highest hardness value was obtained from the matrix material with 142 HV.



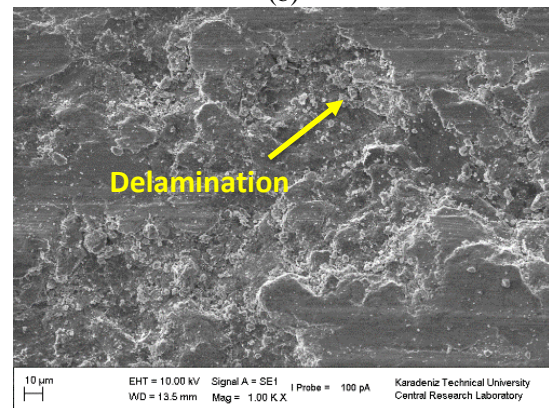
(a)



(b)



(c)



(d)

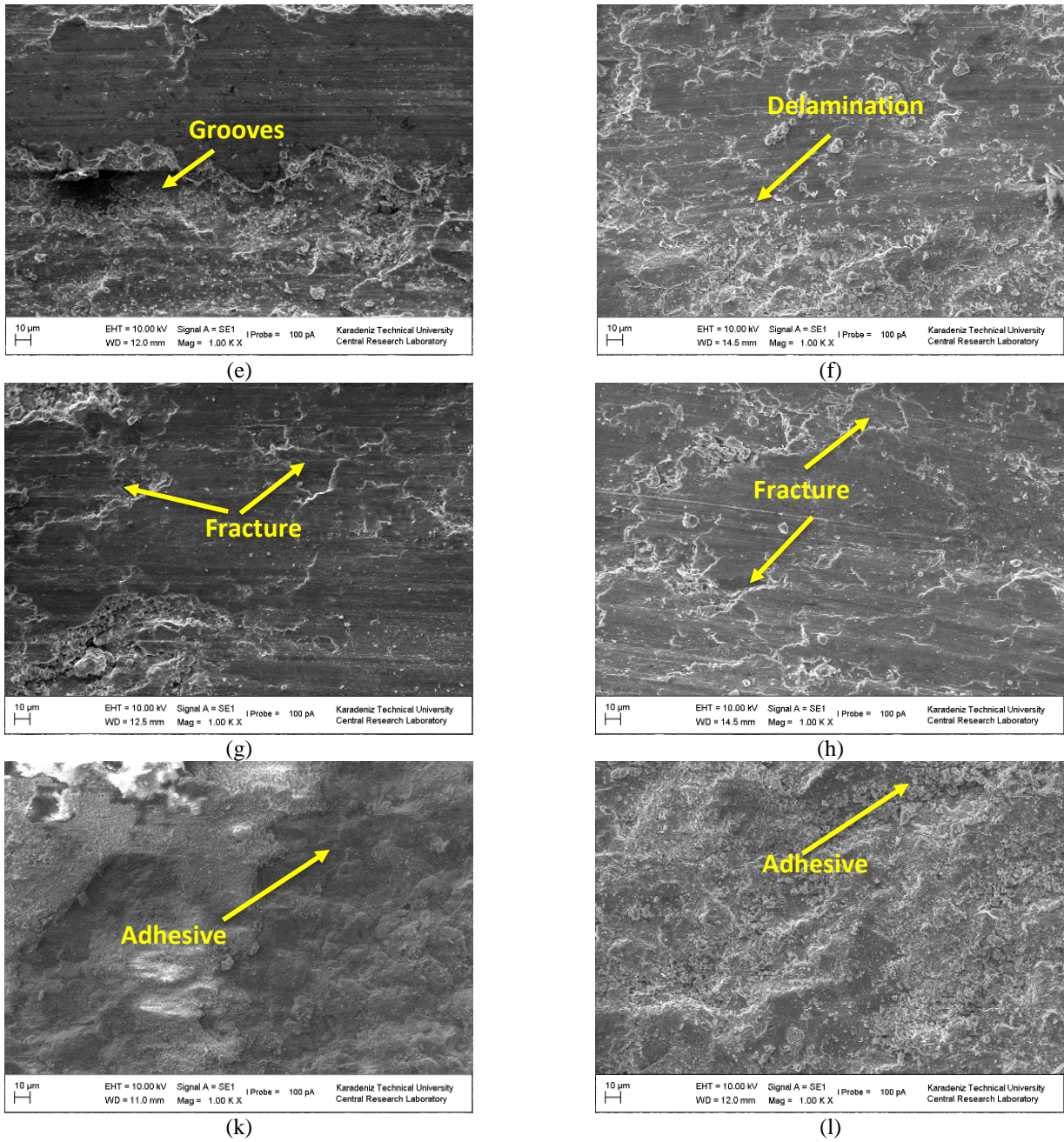
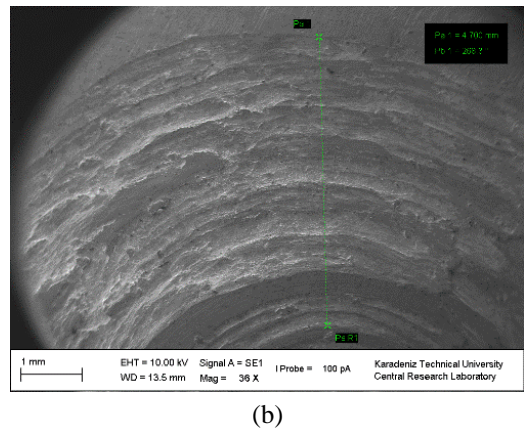
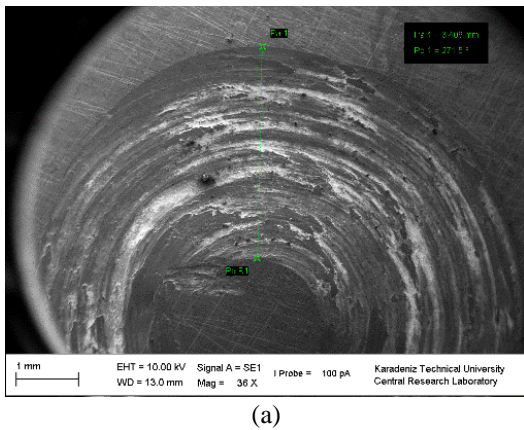


Figure 6. Worn surface examinations (SEM) of samples under 10 and 20N loads; (a) H-0-10N, (b) H-0-20N, (c) H-1-10N, (d) H-1-20N, (e) H-2-10N, (f) H-2-20N, (g) H-3-10N, (h) H-3-20N, (k) H-4-10N and (l) H-4-20N



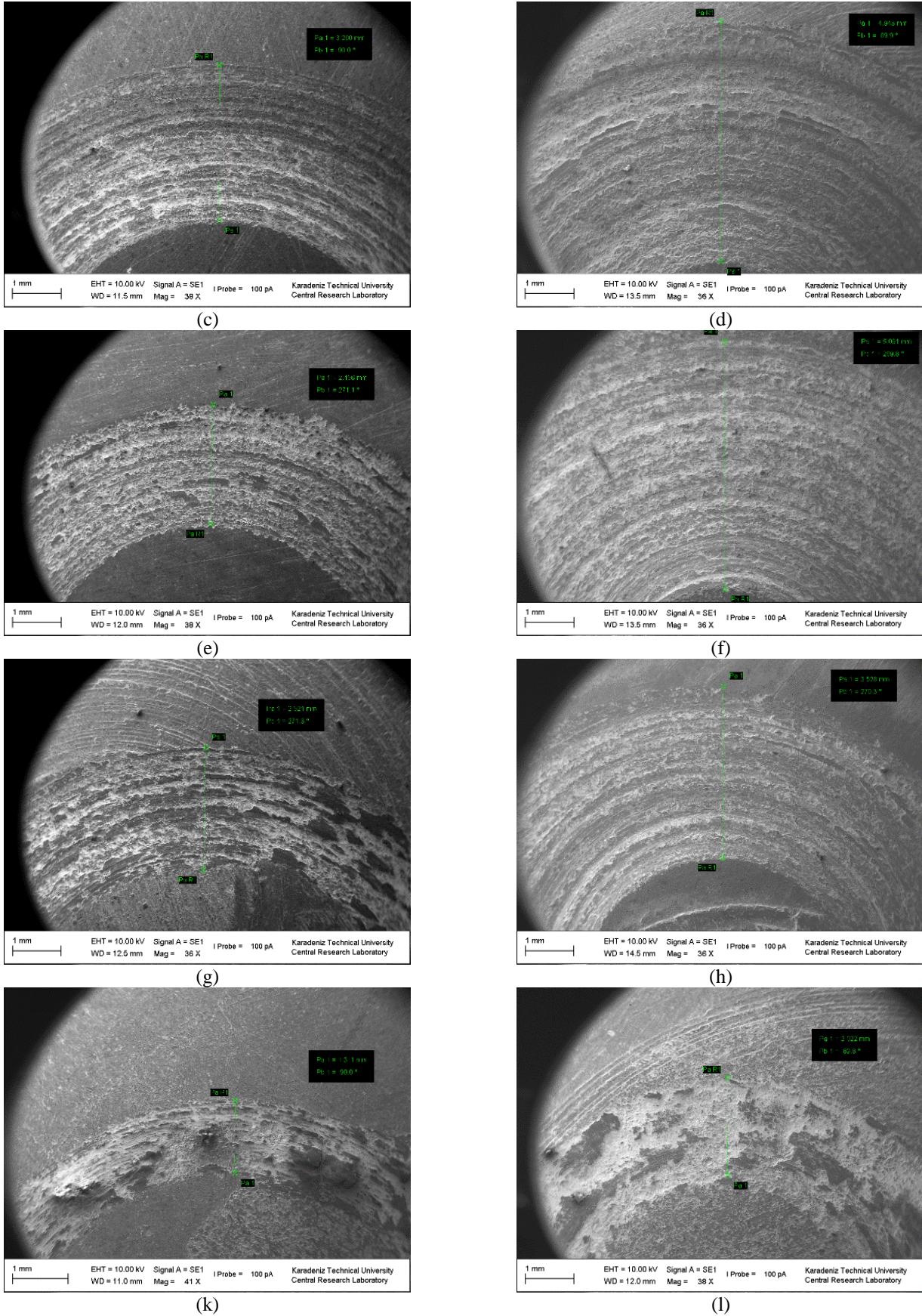


Figure 7. Wear trace measurements of samples; (a) H-0-10N, (b) H-0-20N, (c) H-1-10N, (d) H-1-20N, (e) H-2-10N, (f) H-2-20N, (g) H-3-10N, (h) H-3-20N, (k) H-4-10N and (l) H-4-20N

4- In all samples, after the wear tests, the weight losses increase with increasing load. The highest weight loss was measured as 0.7882 mg in the matrix material under 20N load. The lowest weight loss was measured as 0.0087 mg in the H-4 hybrid sample under 10N load.

5- There were changes in the wear mechanism in the SEM images that were examined after wear. In particular, it was observed that increasing SiC reinforcement changed the wear type from abrasive wear to adhesive wear.

6- In the study, it was concluded that the MWCNT reinforcement, which is the best among the reinforcement ratios used for the hybrid samples, was 2% and the best SiC reinforcement was 4%.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 13%

References

- [1] T. Savaşkan, Z. Azakli, and A. P. Hekimoğlu, Effect of heat treatment on mechanical and wear properties of Zn-40Al-2Cu-2Si alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(9), 2651–2663, 2021. [https://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65682-0](https://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65682-0)
- [2] O. Güler, M. Çelebi, R. Dalmış, A. Çanakçı and H. Çuvalcı, Novel ZA27/B4C/Graphite hybrid nanocomposite-bearing materials with enhanced wear and corrosion resistance, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(9), 4632–4646, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05863-5>
- [3] S. Yan, J. Xie, Z. Liu, W. Wang, A. Wang and J. Li, Influence of different Al contents on microstructure, tensile and wear properties of Zn-based alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 26(7), 648-652, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60100-4](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60100-4)
- [4] E. D. Yalçın ve A. Çanakçı, Silisyum karbür (SiC) ile güçlendirilmiş çinko-alüminyum (ZA40) alaşımının aşınma parametrelerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (1), 207-213, 2022. <https://doi.org/354.14/akufemubid.10352296>
- [5] E. D. Yalçın, A. Çanakçı and F. Erdemir, Wear and mechanical behavior of ZA27 alloy reinforced with B₄C produced by powder metallurgy method. *Gazi University Journal of Science*, 35 (4), 1572-1583, 2022. <https://doi.org/10.35378/gujs.959850>
- [6] R. L. Trumper, Metal matrix composites- applications and prospects, *Metals and Materials*, 3, 662- 667, 1987.
- [7] M. S. Surya and G. Prasanthi, Effect of SiC weight percentage on tribological characteristics of Al7075/SiC composites. *Silicon*, 14, 1083–1092, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00885-5>
- [8] N. Miloradovic, R. Vujanac, B. Stojanovic and A. Pavlovic, Dry sliding wear behaviour of ZA27/SiC/Gr hybrid composites with taguchi optimization. *Composite Structures*, 262, 113658, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113658>
- [9] E. D. Yalçın, ve A. Çanakçı, Hegzagonal bor nitrid takviyeli ZA40 alaşımının mekanik ve aşınma özelliklerinin araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 716-730, 2021. <https://doi.org/10.31466/kfbd.988720>
- [10] M. Pul, Al 6061/B4C/GNP hibrit kompozitlerde B₄C ve GNP takviye miktarlarının abrasif aşınma davranışına etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(4), 1179-1187, 2022. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1142512>
- [11] S. B. Akçay, T. Varol, H. C. Aksa ve O. Güler, Al2024/SiC kompozitlerin yüksek SiC takviyesi ile üretimi ve karakterizasyonu. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (2), 353-365, 2022. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1021086>
- [12] H. Arık, Toz metalurjisi metoduyla Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(3), 741-754, 2019. <https://doi.org/10.29109/gujsc.587637>
- [13] İ. Şimşek, D. Şimşek ve D. Özyürek, Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda SiC takviyeli A356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1237-1243, 2020. <https://doi.org/10.2339/politeknik.642506>
- [14] E. Ergül, H. İ. Kurt, M. Oduncuoğlu and C. Çivi, Wear properties of Al-Cu-Mg composites reinforced with MGO and MWCNT under different loads. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 70-75, 2019 <https://dergipark.org.tr/pub/tijmet/issue/47615/657090>
- [15] E. Ergül, H. Kurt, C. Çivi and G. Eyici, Wear characteristics of carbon nanotube reinforced Al2024 composites. *El-Cezeri*, 7(3), 1008-1016, 2020 <https://doi.org/10.31202/ecjse.716287>
- [16] E. D. Yalçın, A. Çanakçı, F. Erdemir, H. Çuvalcı, and A.H. Karabacak, Enhancement of wear and corrosion resistance of ZA27/nanographene composites produced by powder metallurgy. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 44(2), 1437-1445. 2019 <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3582-7>
- [17] E. Şap, Güçlendirilmiş bakır esaslı kompozit malzemelerin mikroyapı ve sertlik özellikleri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11 (1), 590-598, 2021. <https://doi.org/10.21597/jist.805597>
- [18] T. Varol, O. Güler, S.B. Akçay and H. Çolak, The evolution of microstructure and properties of Cu-Cr alloys synthesized via flake powder metallurgy assisted by mechanical alloying and hot pressing. *Materials Today Communications*, 33, 104452, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104452>
- [19] M. Çelebi, A. Çanakçı, O. Güler, S. Ozkaya, A.H. Karabacak and K. Arpacı, Investigation of microstructure, hardness and wear properties of hybrid

nanocomposites with Al₂O₃ matrix and low contents of B₄C and h-BN nanoparticles produced by mechanical milling assisted hot pressing. *JOM* 74(11), 4449–4461, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05441-7>

[20] T. Savaşkan and Z. Azakli, An investigation of lubricated friction and wear properties of Zn 40Al 2Cu 2Si alloy in comparison with SAE 65 bearing bronze. *Wear*, 264(11), 920-928, 2008. <https://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.06.008>





Kalıpcılıkta kullanılan soğuk iş takım çeliklerinin karşılaştırmalı performans analizi

Comparative performance analysis of cold work tool steels used in mold industry

Aslan Ünal^{1,*} , Mehmet Masum Tünçay² , Mustafa Kelami Şeşen³ , Oğuz Girit⁴ 

^{1,4} Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

² Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34854, İstanbul, Türkiye

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Çelik, metaller içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Birçok farklı türü olan çeliklerden soğuk iş takım çelikleri (SİTÇ) özellikle kalıp sanayisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Son zamanlarda geleneksel SİTÇ'e ek olarak yeni nesil SİTÇ de kullanıma sunulmuştur. Bu çalışma, geleneksel ve iki adet yeni nesil SİTÇ'in zımba malzemesi olarak elektrik motorunda kullanılan rotor laminasyon silisli saclarının şekillendirilmesinde kullanımı incelenmiştir. Yeni nesil SİTÇ'in geleneksele göre daha uzun ömürlü bir kullanım imkanı sunduğu tespit edilmiştir. İlgili çeliklerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) yardımıyla incelenmiştir ve oluşturabilecekleri karbür yapıları da FactSage® 8.2 termodinamik yazılım programı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yeni nesil SİTÇ'de hem ince ve homojen dağılımlı hem de çoklu karbür yapılarının oluştuğu görülmüştür. Niobyum ve Molibden açısından da zengin karbür yapıları ile birlikte homojen yapıları ince karbür yapılarının yeni nesil SİTÇ'in sahip olduğu uzun kullanım ömrünün nedeni olduğu düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Soğuk iş takım çeliği, Malzeme seçimi, Zımba, Rotor, Karbür, FactSage

1 Giriş

Demir, tüm metallerin en önemlisidir. Çağımızın en popüler mühendislik malzemeleri olan çok çeşitli çeliklerin üretimi için kullanılan temel metaldir [1]. Demir önemli olsa da günlük hayatta demirden daha çok onun muhtelif farklı kompozisyonlarda alaşımları yani çelik şeklinde kullanılır [2]. Avrupa'da otomotiv endüstrisi çelik malzemelerden optimum düzeyde faydalanmak için; yeni ürünler geliştirilmesi, üretim proseslerinde yapılacak iyileştirmeler ve tasarım ile ilgili hedefler ilan etmişlerdir [3]. Otomotiv endüstrisindeki son trend, araçların ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak için gelişmiş yüksek dayanımlı çelik (AHSS) kullanımını arttırmaktır. Bu çeliklerin işlenmesi için, örneğin presle şekillendirme, delme, kesme gibi işlem süreçleri için kalıpcılığın ana malzemesi olan çeliklerin işlenen çeliklerden daha dayanıklı olmaları temel olarak eşzamanlı olarak gereklidir. Takım çelikleri hem çelikler,

Abstract

Steel is one of the most widely used metals. Cold work tool steels (CWTS) are frequently preferred in the mold industry. Recently, in addition to traditional CWTS, new generation CWTS have been put into use. This study examines the use of traditional and two new generation CWTS as staple material in the pressing of rotors used in electric motors. It has been observed that the new generation CWTS offer a longer lifespan compared to the traditional ones. The microstructures were investigated using scanning electron microscope (SEM) and x-ray spectroscopy (EDS), and the carbide structures they could form were evaluated using FactSage® 8.2 thermodynamic software. It has been observed that both fine and evenly distributed and multiple carbide structures are formed in the new generation CWTS. The carbides in new generation CWTS were also rich in Niobium and Molybdenum. These were considered as the reasons for long service life of CWTS.

Keywords: Cold work tool steel, Material selection, Punch, Rotor, Carbide, FactSage

hem de demir dışı metaller ile plastikleri şekillendirme ve/veya kesme ve dilme işlemlerinde kullanılan alaşımlardır [4]. Genel bir kabul ile uzun yıllardır birçok uluslararası standartta yer alan, örneğin; AISI/ASTM A681: D2, TS BS EN ISO 4957: 1.2379/X153CrMo12, JIS G4404: SKD11, uygun soğuk iş takım çelikleri (SİTÇ) olarak kullanılmış ve halen yaygın olarak devam etmektedir. Alternatif olarak geliştirilen ve üreticisinin verdiği özel tanımlarla anılan yeni nesil SİTÇ ile daha başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bazı geleneksel ve yeni nesil SİTÇ sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

Kalıp ömrü dolduktan sonra kullanılmaya devam edilirse üretilen parçalarda çapaklar oluşabilmektedir. ASTM standartına göre çapağın tanımı birbirine değen iki katı arasında özgün yüzeyde ortaya çıkan, makroskopik olarak ayırt edilebilen, genellikle yeri ve nitelikleri belli, malzeme taşınımını da içeren ve plastik şekil değiştirme ile ayırıcı özelliği tanımlanan pürüz ve çıkıntı şeklinde yüzey hasarı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aslanunal@yandex.com (A. Ünal)

Geliş / Received: 24.02.2023 Kabul / Accepted: 29.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1255806

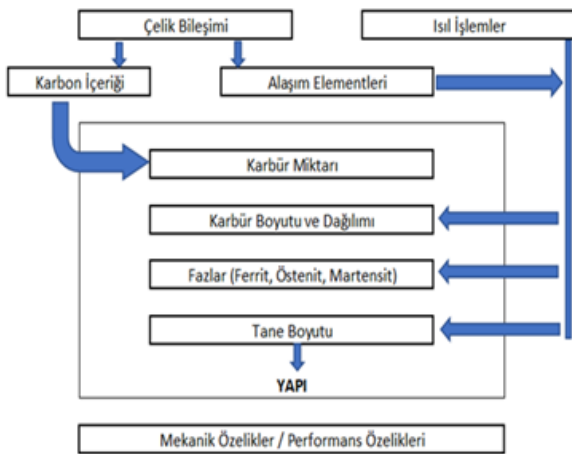
Tablo 1. Geleneksel Soğuk İş Takım Çelikleri (SİTÇ)

AISI A681	EN 4957	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V	% W
D6	1.2436	2.00-2.30	0.10-0.40	0.30-0.60	11.00-13.00	-	-	0.60-0.80
D3	1.2080	1.90-2.20	0.10-0.60	0.20-0.60	11.00-13.00	-	-	-
D2	1.2379	1.45-1.60	0.10-0.60	0.20-0.60	11.00-13.00	0.70-1.00	0.70-1.00	-
O2	1.2842	0.85-0.95	0.10-0.40	1.80-2.20	0.20-0.50	-	0.05-0.20	-
S1	1.2550	0.55-0.65	0.70-1.00	0.15-0.45	0.90-1.20	-	0.10-0.20	1.70-2.20

Tablo 2. Yeni Nesil Soğuk İş Takım Çelikleri (SİTÇ)

KOD	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V	Diğer %
S2	0.90	0.90	0.50	7.80	2.50	0.50	-
V2	0.50	0.90	0.45	7.20	1.40	1.20	Ni 0.30
C2	1.00	1.30	0.45	8.00	2.50	0.30	Ni 0.20
K2	1.10	1.00	0.50	8.00	2.10	0.50	Ni 0.20. Al 0.50. Nb 0.15

olarak tanımlanmaktadır [5]. Tribolojik sorunlar göz önüne alındığında takım-ış parçası etkileşimi, ürünün kalitesini, süreç performansını ve takım ömrünü etkileyen önemli bir özelliktir. İki katı yüzey arasındaki temas ve yapışma ile bir parçacığın aşındırıcılığı yüzeylerin yüksüz teması, uygulanan yükün plastik akma ve soğuk kaynağa neden olması, kayma hareketi ve uygulanan yükün gerinim sertleşmesi üretmesi ve kaynayan noktasındaki parçacıkların yer değiştirmesi ile açıklanabilir [6]. Örneğin, sac şekillendirme işlemlerinde aşınmış malzemelerin birikmesi sonucu takım temas yüzeyinde sac malzemelerin yapışma aşınmasına neden olabilir. “Çapak” olarak adlandırılan bu tribolojik problem genellikle tolerans kaybına neden olur ve ürün kalitesini etkiler. Yapışma aşınması eğiliminin çeliğin kalitesine, yani takım çeliğinin kimyasal ve faz yapısına doğrudan bağlı olduğu bilinmektedir. Kritik metal-metal teması nedeniyle birbirleri arasında matrise yapışmayı karbür fazı önler. Bununla birlikte, makro ölçekli testlerde her fazın aşınma mekanizmasına katkısını ayırmak zordur. Karbürler, karbonitrürler ve nitrürlerin boyut ve dağılımları, matrisin yapışma ve sürtünme özellikleri ile nihai performansa katkıda bulunarak tribolojik davranışları etkileyen önemli parametrelerdir [7]. Şekil 1’de çeliğin mekanik ve performans özelliklerine etki eden faktörler şematik olarak gösterilmiştir [8].



Şekil 1. Çeliğin mekanik ve performans özelliklerine etki eden faktörler [8]

Picas tarafından geleneksel ve yeni nesil çelikler üzerinde yapılan bir çalışmada; yorulma ve kırılma sonuçlarına ve fraktografik gözlemlere dayanarak, kırılma ile sonuçlanan malzeme yorulmasında tekrar eden yüklerde çatlak oluşum mekanizmalarının statik yük altındakilerden farklı olduğu, takım çeliklerinin her bir mikro yapısal bileşeninin rolü ve bunların çatlak başlamasındaki etkileri tanımlanmıştır. Statik yüklerde çatlaklar, uygulanan kuvvetin, karbürün kırılma dayanımından daha yüksek olduğunda başlar, daha küçük ve daha homojen dağılmış karbürlere sahip takım çelikleri daha yüksek dayanım gösterir. Tekrar eden yüklerde metalik matriste hasar oluşumu gözlemlenmiştir. Karbürlerin etrafındaki stres kırılmaları tetiklenebilir ve yorulmaya neden olan çatlaklara yol açar. Geleneksel ve yeni nesil her iki takım çeliği için de yorulmalardan metalik matris ve farklı karbür özellikleri ve morfolojileri sorumludur [9].

Malzeme ve malzeme seçimi, mühendislik tasarım sürecinde önemli bir rol oynar. Belirli bir ürün için uygun malzeme seçimi, tasarımcılar için önemli görevlerden biridir. Ürünün nihai gereksinimlerini karşılamak için tasarımcıların çeşitli malzemelerin performansını analiz etmesi ve kesin işlevlerle uygun malzemeleri belirlemesi gerekir [10]. Elektrik-Elektronik, beyaz eşya, otomotiv vb. endüstrilerde yaygın olarak kullanılmakta olan özdeş parçaların çeşitli farklı profillerde imalatı sırasında kesme/delme işlemleri için “zımba” kullanılmaktadır. Bu çalışmada elektrik motoru üretiminde kullanılmakta olan “rotor” ve “stator” laminasyon imalatında kalıp zımbası olarak geleneksel (AISI A681; D2) ve yeni nesil SİTÇ (C2 ve K2) kullanılarak performansları karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada elektrik motorlarında “rotor” ve “stator” laminasyon paketlerinin Sac Metal Şekillendirme yoluyla (TS EN 10341) silisli sac malzemeden üretimi için kullanılmakta kalıplara ait Takım Çelikleri incelenmiştir. Zımba kalıp malzemesi olarak çok amaçlı ve yaygın kullanımı nedeniyle geleneksel D2 (1.2379) ile yeni nesil SİTÇ’in özellikleri karşılaştırılmıştır. Zımba kalıp malzemeleri Mebsan Kalıp & Tel Erozyon firmasından sağlanmıştır. Performans testleri Mebsan Kalıp & Tel Erozyon firmasının pres makinalarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan her bir çelikten üçer adet malzemeye ait kimyasal analiz değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

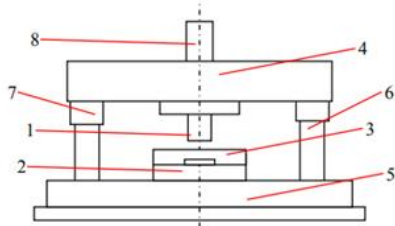
Tablo 3. Çalışmada Kullanılan Soğuk İş Takım Çeliklerine Ait Alaşım Elementleri Kimyasal Analizleri

	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Mo	%Cr	%V	%Al	%Nb
D2 (1.2379)	1.42	0.29	0.23	0.26	0.66	11.40	0.92	0.03	0.02
	1.41	0.44	0.23	0.39	0.62	10.86	0.63	0.02	0.03
	<u>1.33</u>	<u>0.24</u>	<u>0.24</u>	<u>0.19</u>	<u>0.67</u>	<u>11.13</u>	<u>0.68</u>	<u>0.01</u>	<u>0.02</u>
C2	0.79	0.25	0.93	0.17	1.86	7.30	0.21	0.02	0.01
	0.89	0.25	0.92	0.16	2.08	7.75	0.24	0.02	0.02
	<u>0.95</u>	<u>0.26</u>	<u>0.95</u>	<u>0.15</u>	<u>2.31</u>	<u>7.97</u>	<u>0.27</u>	<u>0.02</u>	<u>0.02</u>
K2	0.96	0.38	0.77	0.30	1.85	7.88	0.41	0.83	0.11
	1.08	0.41	0.86	0.18	2.07	8.28	0.46	0.30	0.11
	1.02	0.48	0.98	0.19	2.08	8.02	0.49	0.85	0.16

Çeliklerin tümünde Manganez (Mn) ve Nikel (Ni) oranları benzer olmakla birlikte, yeni nesil SİTÇ'lerde Karbon (C), Krom (Cr) ve Vanadyum (V) oranları daha düşük, Silisyum (Si) ve Molibden (Mo) oranları daha yüksektir. Yeni nesil K2 SİTÇ'de ise Alüminyum (Al) ve Niobyum (Nb) ilavesi bulunmaktadır.

Şekil 2'de sac metal kesme kalıbına ait temel parçalar şematik olarak gösterilmektedir. Üretimi yapılan "rotor" ve "stator" parçaların kalıp, zımba ve numune örneklerine ait gerçek parçalar Şekil 3'de verilmiştir. Zımba malzemesi olarak kullanılan 3 farklı SİTÇ'in çapak oluşumuna yol açmadan üretebildikleri maksimum parça sayısı ömürlerini belirlemede kullanılmıştır. Bununla birlikte söz konusu zımba malzemelerinden Rockwell (HRC) sertlik ölçümleri alınıp karşılaştırılmıştır. Değerler 3 ölçümün ortalamasıdır. Bunlara ilaveten zımba malzemelerinin mikroyapıları da standart metalografik numune hazırlama prosedürlerinden geçirilerek taramalı elektron mikroskopu (SEM)/ enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) (Zeiss Sigma 300 Gemini FEG SEM) yardımıyla incelenmiştir. SİTÇ'de oluşabilecek karbür yapıları FactSage® 8.2 termodinamik analiz programı ile incelenmiştir.

1.Zımba 2.Alt kalıp 3.Sıyırıcı plaka 4.Kalıp üst plakası



5.Kalıp alt plakası 6.Kılavuz sütun 7.Kılavuz burç 8.Kalıp sapı

Şekil 2. Sac metal kesme kalıbına ait temel parçalar [11]

3 Bulgular ve tartışma

Elektrik motorlarında kullanılan ve silisli sacdan yapılan aynı rotor parçalarının basımında D2, C2 ve K2 takım çelikleri kullanılmıştır. Zımba ömrünü belirleyen en önemli bulgu belli bir basım sayısından sonra zımbada meydana gelen bozulma ve bunun neticesinde üretilen parçalarda çapaklanma başlamasıdır. Kullanılan zımba malzemelerine göre çapak problemi yaşamadan basılabilen parça sayıları yaklaşık olarak Tablo 4'de verilmiştir. En kısa kullanım ömrüne sahip olan geleneksel takım çeliği D2'dir. Bununla birlikte en uzun süreli kullanım ömrü sunan ise yeni nesil K2 takım çeliğidir.

Tablo 4. Zımba malzemesine göre basılabilen ürün sayısı

Zımba Malzemesi	Basılabilen ürün sayısı
D2 (1.2379)	112 500
C2	203 000
K2	224 000

Şekil 4'de temsili olarak maksimum basım sayısına ulaştıktan sonra kullanılmaya devam eden zımbalar ile elde edilen parçanın makro görüntüsü verilmektedir. Zımbalar bu noktadan sonra kullanıldığında üründe çapak oluşumu başlamaktadır ve ürün kalitesi bozulmaktadır. Bu durum, sürtünme yapışması ya da yapışma aşınması (adhesion wear) olarak da adlandırılmaktadır [12].

Zımba malzemelerinin sertlik değerleri ortalama olarak Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Zımba malzemesine göre ölçülen sertlik değerleri

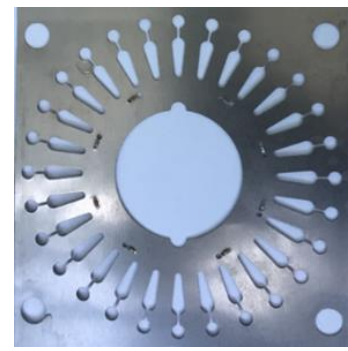
Zımba Malzemesi	Sertlik (HRC)
D2 (1.2379)	60.4
C2	61.2
K2	61.7



(a)

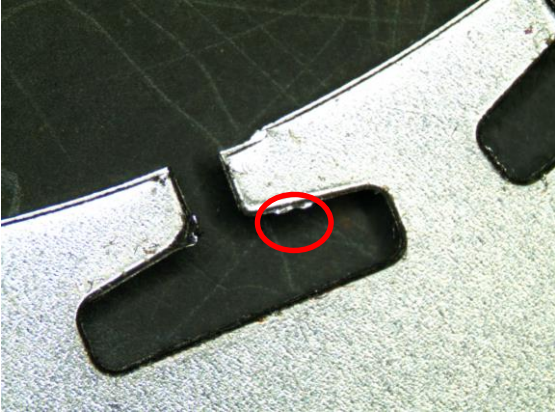


(b)



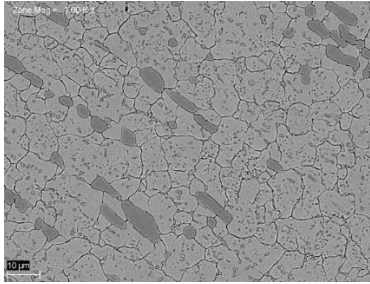
(c)

Şekil 3. Çalışmada kullanılan (a) Sac metal kesme kalıbı, (b) Kullanılan zımba ve (c) Basılan örnek parça

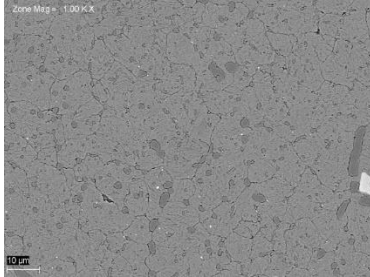


Şekil 4. Kullanım ömrü dolan zimbalar ile basılan parçanın makro görüntüsü (çapak oluşumu kırmızı yuvarlak içine alınmıştır)

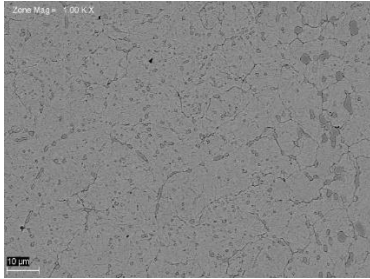
SİTÇ'e ait SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir.



(a)



(b)



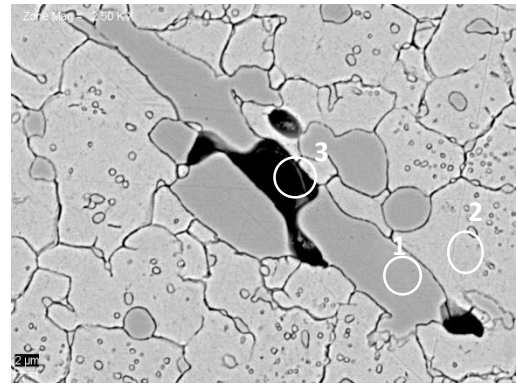
(c)

Şekil 5. SİTÇ taramalı elektron mikroskopu mikroyapı görüntüleri (a) D2, (b) C2, (c) K2

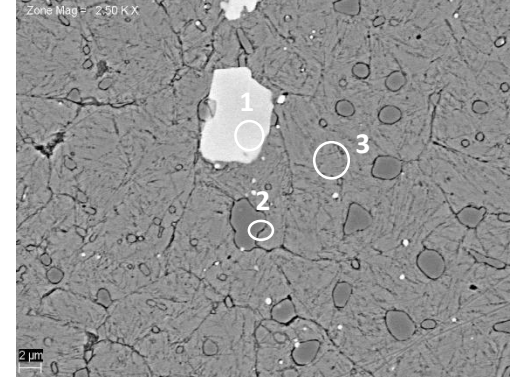
D2 geleneksel çeliğinin sahip olduğu ana karbür yapılarının iri taneli ve daha az homojen dağılım gösterdiği gözlemlenirken, yeni nesil SİTÇ olan C2 ve K2 çeliklerinde karbür yapılarının daha ince olduğu ve homojen bir şekilde

dağıldığı görülmektedir. Karbür yapılarının daha ince ve homojen dağılım göstermesi aşınma direnci ve mekanik özelliklerde olumlu yönde etki ettiği farklı çalışmalarda tespit edilmiştir [13, 14]. İnce ve eş aralıklarla dağılmış karbür yapıları tokluk direncini de artırmaktadır [15]. Bu bağlamda düşünüldüğünde C2 ve K2 çeliklerinin D2'ye göre daha uzun kullanım ömrü sunması karbürlerin daha ince ve homojen dağılımı ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, Tablo 5'de verildiği üzere yeni nesil SİTÇ'in sertlik değerlerinin geleneksel D2'ye göre % 1,32 ve % 2,15 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir.

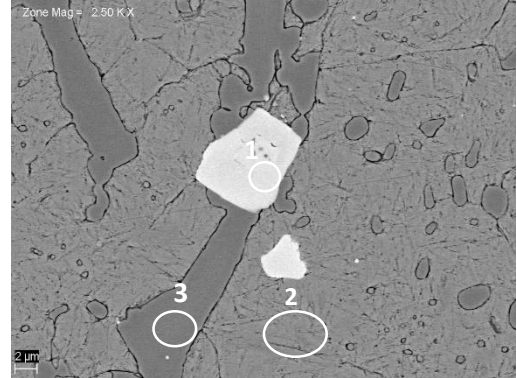
Bunlara ilave olarak bu çalışmadaki D2, C2 ve K2 çeliklerine ait mikroyapılarda gerçekleştirilen SEM-EDS elemental analizlerine ait mikroyapı ve analiz sonuçları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



(a) D2 mikroyapı görüntüsü

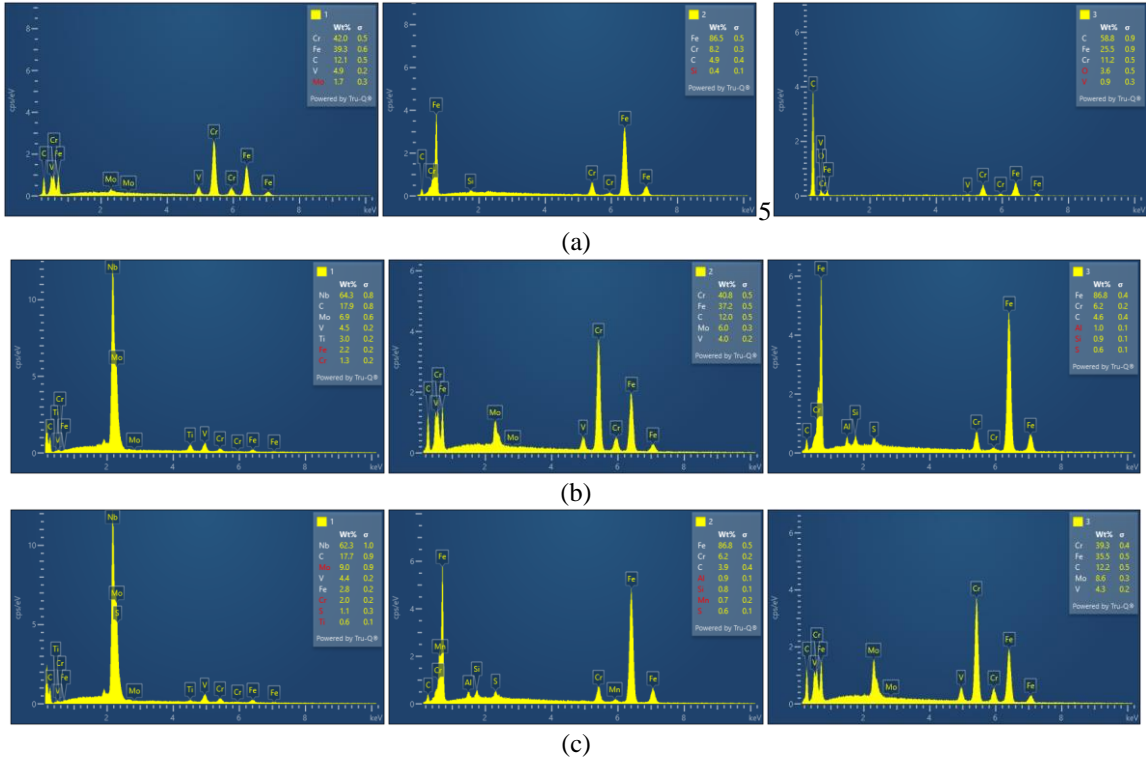


(b) C2 mikroyapı görüntüsü



(c) K2 mikroyapı görüntüsü

Şekil 6. SİTÇ taramalı elektron mikroskopu elemental analiz (EDS) için mikroyapı görüntüleri



Şekil 7. SİTÇ'e ait Şekil 7'de verilen SEM mikro yapılarından alınan 1,2,3 numaralı alanların EDS analiz sonuçları (a) D2, (b) C2, (c) K2

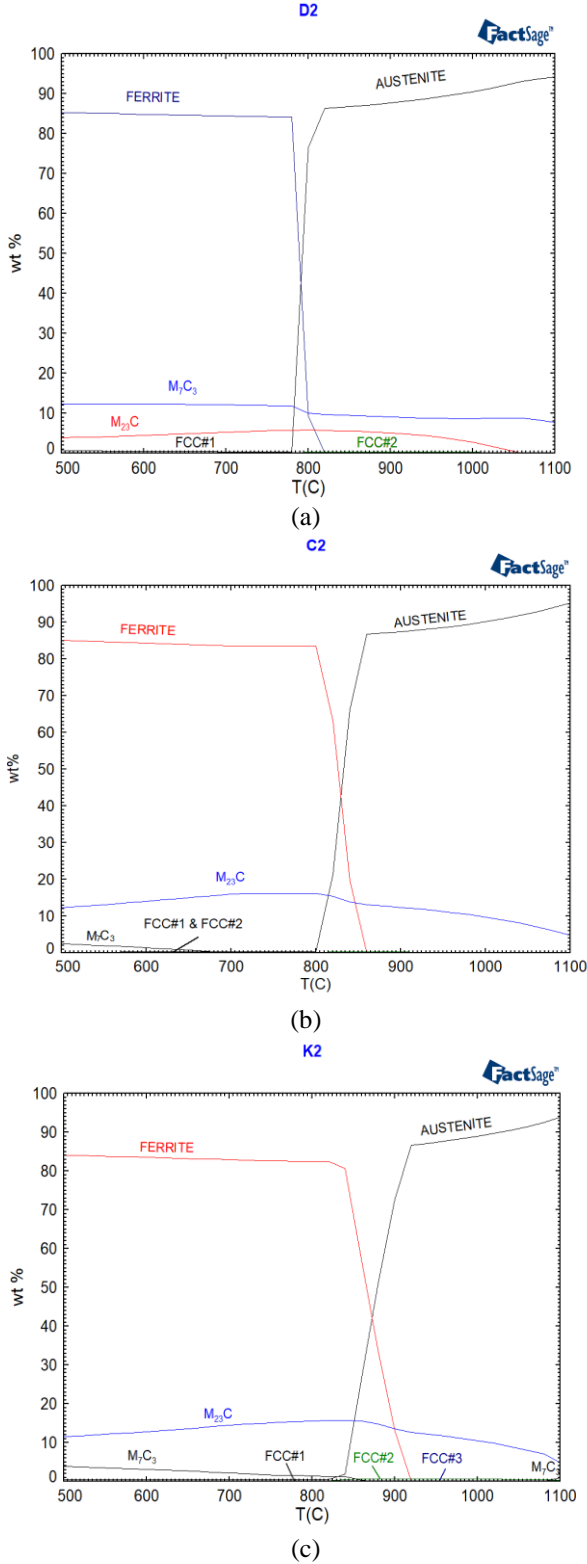
Şekil 6'da EDS elemental analiz için seçilen bölgeler beyaz yuvarlak içerisinde alınarak gösterilmiştir. Geleneksel D2 çeliğinde ana karbür yapıları M_7C_3 sisteminden oluşmaktadır. Bunlar krom ağırlıklı, vanadyum destekli karbür yapıları olabilmektedir [16]. Şekil 7(a) 1 numaralı elemental analiz sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Geleneksel SİTÇ olan D2'den farklı olarak, yeni nesil SİTÇ'den olan C2 ve K2'de Şekil 6 (b) ve (c) 'de 1 numara ile gösterilen parlak yapıları iri taneli karbürlerin Şekil 7(b) ve (c)'de görüleceği üzere Niobiyum katkılı karbür yapıları olduğu görülmektedir ve bu tür sert karbür yapıları aşınma direnci gibi mekanik özelliklere olumlu yönde katkı yapmaktadır [17]. Bununla birlikte ana karbür yapıları incelendiğinde (Şekil 6(a) 1 numara, Şekil 6(b) 2 numara ve Şekil 6(c) 3 numara), Şekil 7'de verilen elemental analizlerden yeni nesil SİTÇ karbürlerinin Molibden açısından zenginleşmiş oldukları görülmektedir.

Kimyasal termodinamik alanında dünyadaki en büyük tam entegre veritabanı bilgi işlem sistemlerinden biri olan FactSage® 8.2 yazılım programı ile üzerinde çalışma yapılan D2, C2 ve K2 SİTÇ'e ait fazlar aşağıda verilmiştir. Buna göre temper sıcaklıklarında etkin faz geleneksel D2 çeliğinde M_7C_3 , yeni nesil C2 ve K2 çeliklerinde ise $M_{23}C_6$ 'dır. Yeni nesil SİTÇ'de ise etkin karbür fazları için molibdenin etkisi görülmektedir (Tablo 6). Liu Y. vd. [18] $M_{23}C_6$ tipi çok bileşenli karbürlerin mekanik özellikleri ile elektron ve bağ yapılarını sistematik olarak incelenmişler ve sonuçları, mevcut teorik ve deneysel verilerle karşılaştırılarak analiz etmişlerdir. Buna göre $M_{23}C_6$ ($M = Fe, Cr, Mn$) çok bileşenli karbürler termodinamik olarak karardır. Genel olarak,

çeliklerdeki $M_{23}C_6$ tipi karbürlerin genellikle karışık çökeltiler olarak çeşitli başka metalik elementler kullanılarak yapılandırıldığı ve $M_{23}C_6$ bileşiklerinin metalik ve kovalent bağların kombinasyonları ile oluşması sonucu yüksek erime noktasına ve yüksek sertliğe sahip oldukları belirtilmiştir. Sertliğin, malzemenin aşınma direncini karakterize etmek için önemli bir parametre olduğu gözönüne alındığında bu gruptan $Fe_{21}Mo_2C_6$ 'nın diğer karbürlerden daha sert ve kırılma direnci yüksek olduğu sonucuna varılarak bu nedenle aşınmaya dayanıklı ideal bir malzeme olduğu ve sonuç olarak Molibden (Mo) veya Demir (Fe) içeren $M_{23}C_6$ bileşiklerinin mekanik özelliklerinin, $Cr_{23}C_6$, $Mn_{23}C_6$ ve $Fe_{23}C_6$ 'nın saf fazlarından üstün olduğunu ortaya koymaktadır [18]. Bu bağlamda düşünüldüğünde bu çalışmadaki yeni nesil SİTÇ'lerinde elde edilen daha yüksek performans sahip oldukları $M_{23}C_6$ ($M = Fe, Cr, Mn$) çok bileşenli karbürler ile ilişkilendirilebilir.

Tablo 6. FactSage Analizlerine Göre SİTÇ'de Oluşabilecek Karbürler

D2		C2		K2	
Karbür	%	Karbür	%	Karbür	%
Cr_7C_3	77.1	$Cr_{20}Mo_3C_6$	39.6	$Cr_{20}Mo_3C_6$	43.9
Fe_7C_3	18.6	$Fe_{20}Mo_3C_6$	34.7	$Fe_{20}Mo_3C_6$	37.5
V_7C_3	2.9	$Cr_{20}Fe_3C_6$	6.5	$Cr_{20}Fe_3C_6$	4.4
Mn_7C_3	1.4	$Fe_{23}C_6$	5.8	$Fe_{23}C_6$	3.8
		$Cr_{23}C_6$	6.5	$Cr_{23}C_6$	4.7
		$Fe_{20}Cr_3C_6$	5.7	$Fe_{20}Cr_3C_6$	4.0
		Diğer (V,Mn, Ni)	1.2	$Cr_{20}Mn_3C_6$	0.9
				$Fe_{20}Mn_3C_6$	0.8



Şekil 8. SİTÇ'e ait sıcaklık-ağırlık yüzdesi FactSage faz diyagramları (a) D2, (b) C2, (c) K2

Sonuç olarak, yeni nesil SİTÇ'de oluşan çoklu karbür yapılarının ve ince ve homojen dağılımlı karbürlerin zımba malzemesinin ömrünü uzatıcı bir etkide bulunduğu düşünülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada geleneksel ve yeni nesil SİTÇ'in zımba malzemesi olarak elektrik motorlarında kullanılan rotor parçalarının üretiminde kullanımı karşılaştırılmıştır. Yeni nesil SİTÇ'in geleneksel olana göre daha yüksek baskı sayılarına ulaşarak daha uzun kullanım ömrü sunduğu görülmüştür. Zımba malzemelerinin mikroyapıları SEM/EDS yardımıyla incelenmiş ve yeni nesil SİTÇ'lerde geleneksel olana göre ana karbürlerin daha ince ve homojen dağıldığı görülmüştür. Ayrıca, yeni nesil çeliklerde Niobyum (Nb) ve Molibden (Mo) açısından zenginleşmiş karbür yapılarının olduğu görülmüştür. Karbür yapılarındaki bu farklılıkların yeni nesil SİTÇ'in daha uzun ömürlü kullanım sunmasına imkan sağladığı değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Çalışmalarında destek olan ve Ar-Ge katkısı yapan MATİL A.Ş.'ye teşekkür ederim. SEM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Borçelik A.Ş. Sn. Ömer Yıldırım'a teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 19

Kaynaklar

- [1] K. H. Prabhudev, Handbook of Heat Treatment of Steels. McGraw-Hill, New Delhi, 1988.
- [2] R. C. G. H. N. Gupta and A. Mittal, Manufacturing Processes. New Age International, New Delhi, 2009.
- [3] M. Jeanneau and P. Pichant, The trends of steel products in the European automotive industry. Metallurgical Research and Technology, 97, 1399-1408, 2002. <https://doi.org/10.1051/metal:2000118>
- [4] G. A. Roberts, R. Kennedy and G. Krauss, Tool Steels, 5th Edition. ASM International, 1998.
- [5] ASTM G40-22a, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, ASTM International, 2022.
- [6] J. A. Collins, Failure of Materials in Mechanical Design Analysis, Prediction, Prevention, 2nd ed. John Wiley, New York, 1993.
- [7] A. Norrby, Nanotribological characterization of advanced tool steels, M.Sc. Thesis, Karlstads University, Sweden, 2010.
- [8] J. B. D. Viale, F. Chenou and G. Baron, Optimizing microstructure for high toughness cold-work tool steels, 6th International Tooling Conference, pp. 299-318, Karlstads, Sweden, 2002.
- [9] I. Picas, Mechanical behaviour of tools, microstructure on fatigue, fracture and damage, Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2012.
- [10] M. F. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier Science, 2016.
- [11] F. Mendi, Kesme kalıplarının bilgisayar yardımıyla tasarımı ve tasarım süresinin etüdü. Teknoloji, 127-137, 2001.
- [12] L. Kirkhorn, V. Bushlya, M. Andersson and J. E. Ståhl, The influence of tool steel microstructure on friction in

- sheet metal forming. *Wear*, 302, 1268-1278, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.050>
- [13] D. A. Porter and K. E. Easterling, *Phase Transformations in Metals and Alloys*. Third Edition (Revised Reprint). Taylor & Francis, Cheltenham, 1992.
- [14] K. Miao, Y. He, N. Zhu, J. Wang, X. Lu and L. Li, Coarsening of carbides during different heat treatment conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 513-523, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.10.115>
- [15] S. Farahany, M. Ziaie and N. A. Nordin, Effect of triple tempering temperature on microstructure, mechanical, and wear properties of K340 cold work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07791-4>
- [16] D. Casellas, J. Caro, S. Molas, J. M. Prado and I. Valls, Fracture toughness of carbides in tool steels evaluated by nanoindentation. *Acta Materialia*, 55, 4277-4286, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.03.028>
- [17] G. Z. S. Wilmes, Effect of niobium and vanadium as alloying element in tool steels with high chromium content. 6th International Tooling Conference, pp. 269-287, Karlstadt, Sweden, 2002.
- [18] Y. Liu, Y. Jiang, J. Xing, R. Zhou and J. Feng, Mechanical properties and electronic structures of M₂₃C₆ (M = Fe, Cr, Mn)-type multicomponent carbides. *Journal of Alloys and Compounds*, 648, 874-880, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.048>





Etial 180 alaşımına ilave edilen bakırın mikroyapı, sertlik ve korozyon üzerindeki etkisi

Effect of copper addition to Etial 180 alloy on microstructure, hardness and corrosion

Engin Kocaman^{1,*}, Erhan Baysal², Oğuz Koçar³, Ahmet Serdar Güldibi⁴, Selçuk Şirin⁵

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, İncivez, 67100, Zonguldak, Türkiye

² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Alaplı, 67850, Zonguldak, Türkiye

³ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İncivez, 67100, Zonguldak, Türkiye

⁴ Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78100, Karabük, Türkiye

⁵ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Hendek Meslek Yüksek Okulu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Hendek, 54100, Sakarya, Türkiye

Öz

Bu çalışmada Etial 180 alaşımı içerisine ağırlıkça %0-5 oranında bakır ilavesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapısal incelemeleri, sertlik değerleri ve korozyon dirençleri ölçülmüştür. Çalışmada bakır ilavesinin Etial 180 alaşımının mikroyapısında önemli değişikliklere neden olduğu gözlemlenmiştir. Artan bakır oranı ile mikroyapıda Al₂Cu faz yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Sertlik testi sonucu Etial 180 alaşımına ilave bakırın alaşımın sertliğinde doğrusal bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada en yüksek sertlik değeri ağırlıkça %5 bakır içeren alaşımında 80.2 HB olarak ölçülmüş ve referans numuneye göre sertliği %22 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Döküm numunelere gerçekleştirilen potansiyodinamik polarizasyon testi sonucu artan bakır oranının korozyon potansiyellerinde önemli bir değişime neden olmadığı tespit edilmiş fakat akım yoğunluğu değerlerinin genel olarak artan bakır oranı ile arttığı görülmüştür. Çalışmada en düşük korozyon direnci %5 bakır içeren numunede ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Alaşım, Etial180(LM2), Sertlik, Korozyon

1 Giriş

Alüminyum ve alaşımları mukavemet/yoğunluk oranının yüksek olması, yüksek elektriksel iletim, iyi korozyon direnci ve kolay üretilbilir olması gibi özelliklerinden dolayı günümüz endüstrisinde vazgeçilmez bir malzeme olarak görülmektedir [1]. Alüminyum ve alaşımları sergilediği bu üstün özellikler sebebiyle başta otomotiv sanayi olmak üzere, uzay ve havacılık sanayi, savunma sanayi, gemi inşaat endüstrisi ve yapı sektörü gibi çok sayıda sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir [2,3]. Alüminyumun bu denli kritik bir malzeme olmasının bir diğer nedeni içerisine ilave edilen alaşım elementleri ile özelliklerinin önemli seviyede değiştirilebilir ve geliştirilebilir olmasıdır [4-6]. Günümüzde çok sayıda alüminyum alaşımı bulunmakla birlikte gerek kullanım oranı

Abstract

In this study, 0-5 wt.% copper was added to Etial 180 alloy. Microstructural examinations, hardness tests and corrosion resistance of the produced samples were measured. In the study, it was observed that the addition of copper caused significant changes in the microstructure of the Etial 180 alloy. It was observed that the volumetric phase density of Al₂Cu in the microstructure increased with increasing copper ratio. As a result of the hardness test, it was determined that the added copper to the Etial 180 alloy caused a linear increase in the hardness of the alloy. In the study, the highest hardness value was measured as 80.2 HB in the alloy containing 5 wt.% copper, and it was determined that it increased the hardness by 22% compared to the reference sample. As a result of the potentiodynamic polarization test performed on the cast samples, it was determined that the increased copper ratio did not cause a significant change in the corrosion potentials, but it was observed that the current density values generally increased with the increasing copper ratio. In the study, the lowest corrosion resistance was measured in the sample containing 5 wt.% copper.

Keywords: Aluminium, Alloy, Etial180(LM2), Hardness, Corrosion

gerekse kolay üretilbilirlik bakımından şüphesiz en önemli alüminyum alaşımı alüminyumun silisyum ile yaptığı alaşımlardır. Alüminyum silisyum alaşımlarının başlıca önemli özelliği ise Al-Si ikili sisteminin ötektik nokta göstermesi sebebiyle ergime sıcaklığının ötektik bölgede düşük olması ve akışkanlığının yüksek olmasıdır [7-9]. Bu durum ötektik noktaya yakın alaşımların kokil kalıp kullanılan yüksek basınçlı döküm ve alçak basınçlı döküm gibi proseslere uygun hale getirmektedir. Bununla birlikte Al-Si alaşımları sadece kokil kalıp uygulamalarında değil kum kalıp uygulamalarında da sıklıkla tercih edilen bir alaşımdır. Öte yandan Al-Si alaşımlarının içerisine ilave edilen alaşım elementleri ile farklı özelliklere sahip kokil kalıp operasyonlarına uygun alüminyum alaşımları geliştirilebilmektedir [10]. Bu alanda tercih edilen alaşımlara

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: enginkocaman@gmail.com (E. Kocaman)
Geliş / Received: 31.11.2022 Kabul / Accepted: 30.12.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1196795

verilebilecek güzel bir örnek ise Etial-180 (LM2) olarak bilinen ve ana alaşım elementi silisyum olan Al-Si alüminyum alaşımıdır. Etial 180 alaşımının içerisinde silisyuma ilave olarak başta bakır, çinko ve demir olmak üzere eser miktarda mangan, magnezyum ve nikel elementleri bulunmaktadır. İlave edilen alaşım elementleri sonucu mikroyapıda yeni fazlar oluşabilmekte ve bu mikroyapılara bağlı olarak alaşımın özellikleri değişebilmektedir. Literatürde Başaranel ve ark. [11] Etial 180 alaşımı içerisinde magnezyum ve kalay ilave ederek alaşımın özelliklerini incelemiştir. Çalışma sonucunda magnezyum ilavesinin alaşımın sertliğini artırdığı fakat kalay ilavesinin alaşımın sertliğinde kayda değer bir değişime neden olmadığı rapor edilmiştir. Alüminyum içerisine ilave edilen bu alaşım elementleri içerisinde bakır, mikroyapı içerisinde oluşturduğu intermetalik fazlar ve alaşımı çökeltme sertleşmesine uygun hale getirmesinden dolayı sertlik ve mukavemetin artmasına neden olmaktadır [5]. Fakat bakır katılma aralığını genişletmekte ve akışkanlığı azaltmaktadır. Ötektik Al-Si alaşımlarına ilave edilen her %1 (ağ.) bakır ötektik sıcaklığın ~ 1.8 °C düşmesine neden olduğu literatürde rapor edilmiştir. Yine bakır ilavesinin korozyon direncini azalttığı da bilinmektedir [12]. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalarda bakırın özellikle sertlikte bir artışa neden olduğunu belirtilmiştir [13,14]. Fakat alaşım içerisinde artan bakır oranının alaşımın

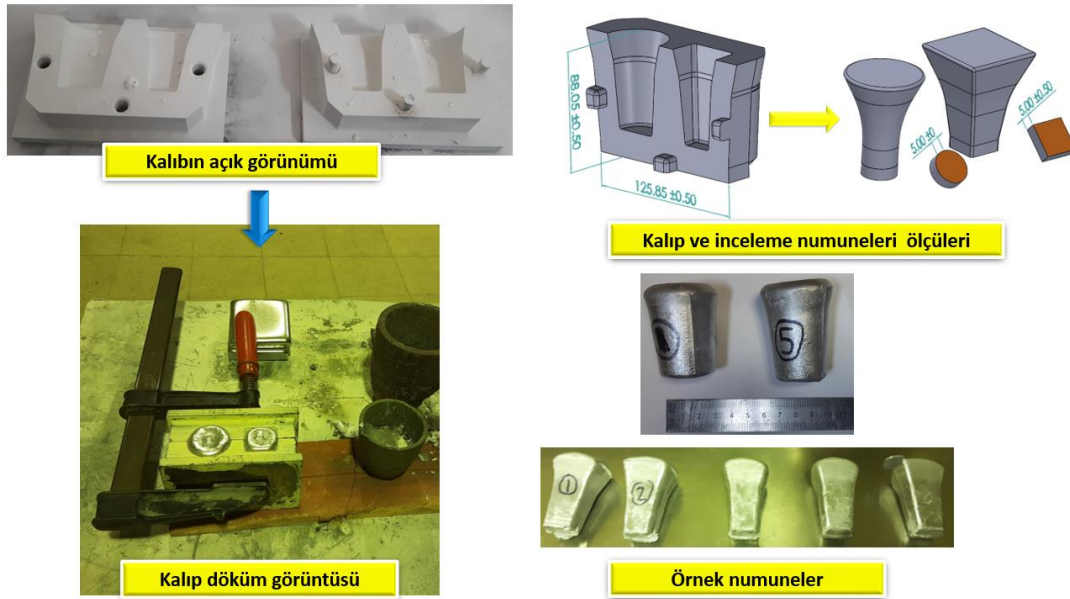
korozyon direncine olan etkisi üzerine yapılan çalışmaların çok kısıtlı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise Etial180 alaşımı içerisine ilave edilen farklı oranlardaki bakırın Etial-180 alaşımında mikroyapı, sertlik ve korozyon direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Deneysel çalışmalar kapsamında Eti Alüminyum A.Ş. firmasından temin edilen ve Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen birincil üretim Etial 180 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İstenilen ölçülere göre kesilen Etial 180 alaşımı 2 kg kapasiteli SiC potalara şarj edilerek Protherm marka elektrik direnç fırınında 760 °C sıcaklıkta ergitilmiştir. Ergitilen Etial 180 alaşımı içerisine ağırlıkça % 0.5, % 1, % 2.5 ve % 5 oranında bakır ilavesi yapılmıştır. Fırın içerisine yerleştirilen potalar 15 dakika sonunda her beş dakikada bir olmak üzere üç sefer karıştırılmıştır. Döküm öncesi 5 dakika süre ile grafit bir çubuk yardımıyla azot gazı kullanılarak gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan ergiyik metal Şekil 1’de şematik görünümü verilen ve 250 °C ön ısıtılan kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Üretilen numunelerin Oxford Instrument marka spektral analiz cihazı kullanılarak kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir. Spektral analiz sonucu ve deneysel çalışmalarda kullanılan numune kodları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Etial 180 Alaşımı ve deneysel numunelerin kodları ve spektral analiz sonuçları

Numune kodu	Si	Cu	Fe	Zn	Mg	Ni	Mn	Al
Cu0 (Etial 180)	10.9	2.27	0.974	2.09	0.209	0.111	0.199	Kal.
Cu0.5	10.9	2.79	0.978	2.08	0.215	0.127	0.200	Kal.
Cu1	10.8	3.22	0.955	2.09	1.199	0.119	0.207	Kal.
Cu2.5	10.5	4.78	0.930	2.04	0.207	0.131	0.208	Kal.
Cu5	10.4	7.01	0.927	1.95	0.214	0.135	0.207	Kal.



Şekil 1. Kokil kalıbın şematik görünümü ve örnek numune görüntüleri

Mikroyapısal incelemeler ve deneysel testler için numuneler Şekil 1’de gösterildiği şekilde parçanın alt kısmından itibaren 10 mm mesafeden su soğutmalı hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen numuneler sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh SiC zımpara kullanılarak zımparalanmış ve akabinde 6, 1 ve 0.05 µm elmas parlatma solüsyonu ile parlatılmıştır. Mikroyapısal inceleme işlemi gerçekleştirilecek numuneler Keller çözeltisi (5 ml. HNO₃, 3 ml. HCl, 2 ml. HF ve 190 ml saf su) ile dağlanmıştır. Numunelerin optik mikroskop görüntüleri Lecia M1750 metal mikroskobu ve Jeol JSM-6060LV markalı taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak alınmıştır. Döküm numunelerin sertlik ölçümleri Brinell sertlik modunda Bulut Makine marka DIGIROCK-RB model sertlik cihazı ile 2,5 mm çapında bilye ve 62.5 kg yük uygulanarak ölçülmüştür. Sertlik ölçüm işlemi bütün yüzey boyunca 5 mm aralıklarla ve her numuneden 10 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Korozyon testleri Gamry marka 1010 E model potansiyotat kullanılarak 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde yapılmıştır. Korozyon testi öncesi her numunenin yüzeyleri alkol ve saf su kullanılarak temizlenmiştir. Korozyon testine tabi tutulan numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_c) ±0.03 µm olarak ölçülmüştür. Korozyon testleri 10 mm çapındaki yüzey alanında, -0.5 ile + 1.5 mV potansiyel aralığında 1mV/sn tarama hızında, doymuş kalomel referans elektrot ve grafit karşıt elektrot kullanılarak üç elektrot yöntemine göre gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

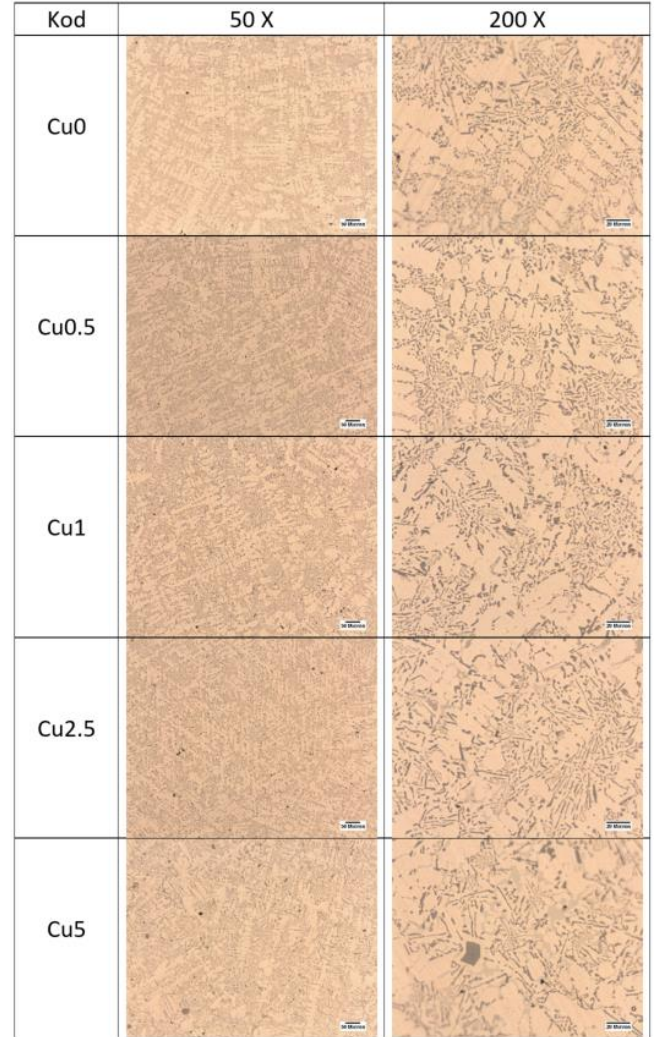
3.1 Mikroyapısal incelemeler

Şekil 2’de döküm numunelerden alınan farklı büyütmelerdeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde alaşımın dentritik bir katılaşma sergilediği görülmektedir. Dentritlerin arasında kalan bölgede ise blok yapılı, fiberimsi ve çin yazısı (Chinese script) benzeri yapıların bulunduğu anlaşılmaktadır. Ana alaşım elementi silisyum olan Etial 180 alaşımının bileşiminde Cu, Fe ve Zn gibi yan alaşım elementleri de nispeten yüksek oranda bulunmaktadır. Bu elementler katılaşma sırasında katı ergiyik olarak veya intermetalik yeni bir yapı oluşturarak mikroyapı içerisinde yer almaktadır.

Literatürde benzer alaşımlar ile gerçekleştirilen çalışmalarda matris fazın α-Al, ince uzun çubuksu fazların β-Al₃FeSi, çin yazısı şekilli fazların α-Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂, dentritlerin arasında kalan yapıların ötektik fazlar ve siyahımsı koyu renkli blok yapılı fazların Al₂Cu intermetalik yapısı olduğu belirtilmiştir [15]. Öte yandan Şekil 2’de verilen optik mikroskop görüntülerinde artan bakır oranı ile mikroyapıda dentritler, fiberimsi uzun yapılar veya blok yapılı fazlarda büyük bir değişiklik olmadığı fakat açık gri renkli adacıkların ortaya çıktığı ve hacimsel oranının artan bakır oranı ile birlikte arttığı anlaşılmaktadır.

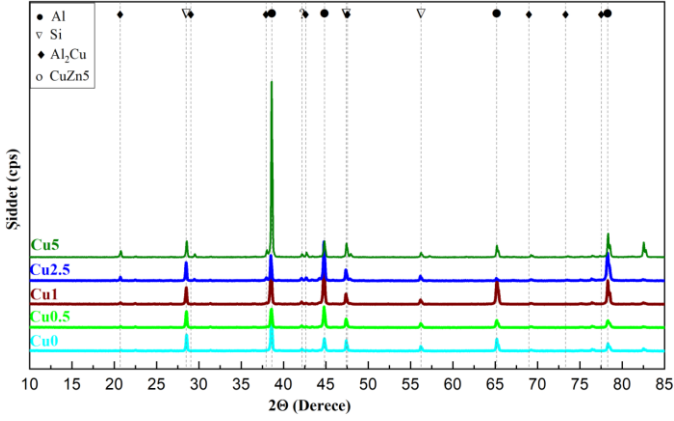
Şekil 3’te farklı oranlarda Cu içeren Etial 180 alaşımına ait XRD analizi verilmiştir. XRD sonucuna göre mikroyapılarda alüminyum, silisyum, Al₂Cu ve eser miktarda CuZn₅ fazlarına ait piklere rastlanmıştır. Etial 180 alaşımı içerisinde ilave edilen bakır oranının artması ile Al₂Cu

intermetalik yapısına ait pik şiddetlerinde bir artış olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2. Döküm numunelerin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4’te Cu0 yani referans numune olan Etial180 alaşımının döküm halinin SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. Şekil 4-a’da mikroyapı içerisinde dağılan çin yazısına benzer açık gri renkteki fazların, küçük boyutlu fazların, arka planda beliren kabartma görünümdeki yapıların ve SEM görüntüsünün sağ üst tarafından daha belirgin bir şekilde görülebilen çubuksu uzun yapıların olduğu görülmektedir. Şekil 4-b’de çin yazısına benzer bir noktanın üzerine gerçekleştirilen 1 numaralı EDS analizinde yüksek miktarda alüminyum ile birlikte Si, Fe ve Mn sinyallerinin alındığı görülmektedir. Çin yazısı şekilli bu fazların α-Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ olması muhtemeldir. Literatürde bu yapıların yüksek soğuma hızı ve düşük mangan konsantrasyonunda çin yazısı şeklinde katılaşmış tersi durumlarda ise polihedral bir yapı olarak alüminyum dentritlerin etrafında birincil katılaşmış faz olmasının beklendiği belirtilmiştir [16].



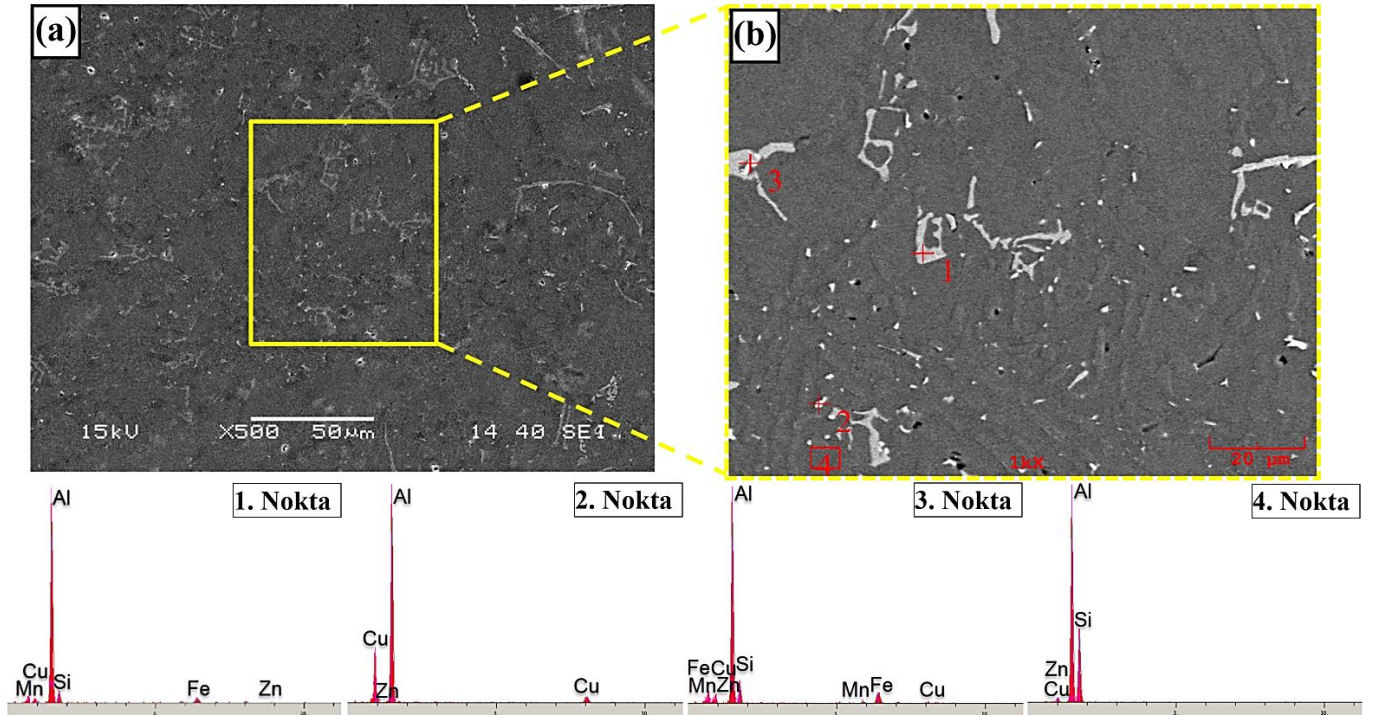
Şekil 3. Döküm numunelerin XRD analizi

Şekil 4-a'da sağ üst köşede ince uzun çubuksu formda yapıların olduğu görülmektedir. Bu yapıya benzer bir noktanın Şekil 5'te verilen geri saçılımlı elektron modundaki (BSE) SEM görüntüsünde ince-uzun çubuksu formdaki yapılar daha belirgin olarak görülmektedir. Şekil 5-b'de verilen SEM görüntüsü üzerinden alınan MAP analizinde bu çubuksu formundaki yapılarda Al, Si ve Fe elementlerinin bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple bu yapıların β -Al₅FeSi fazı olması muhtemeldir. Literatürde gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda benzer fazlara rastlanmıştır [18]. Öte yandan alaşımın içerisindeki Mn miktarının β -Al₅FeSi'un α -Al(Fe,Mn)Si yapısına dönüşmesinde etkili olduğu rapor edilmiştir [19].

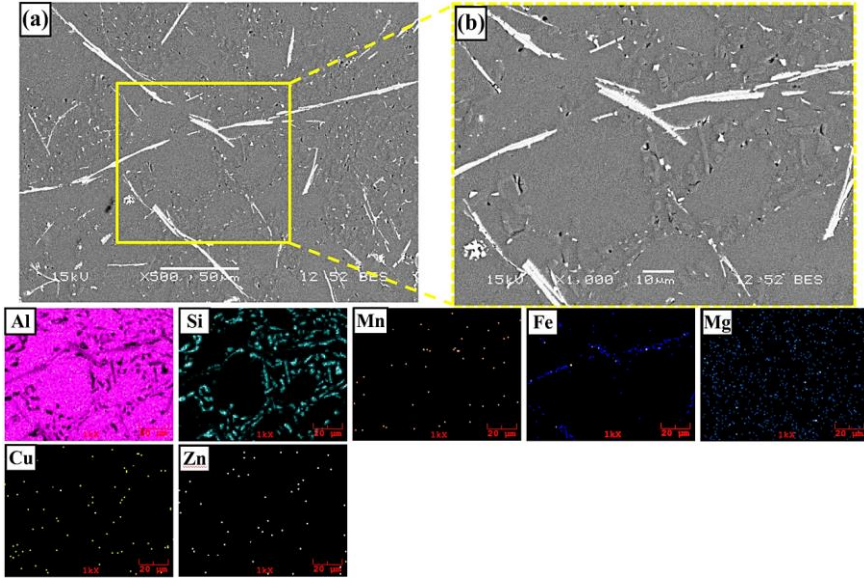
Şekil 6'da Etial 180 alaşımı içerisine ağırlıkça %5 oranında bakır ilave edilmesi sonucu elde edilen Cu5 kodlu

numunenin SEM görüntüsü EDS ve MAP analizi verilmiştir. Görüntülerde referans numuneden farklı olarak açık gri renkli adacıkların arttığı anlaşılmaktadır. Bu fazlardan birinin üzerine gerçekleştirilen 1 numaralı EDS analizinde alüminyum ve bakır sinyallerinin alındığı görülmektedir. Bu fazın XRD analizinde artan bakır oranı ile daha belirgin bir pik veren Al₂Cu fazı olduğu düşünülmektedir. Literatürde alüminyum alaşımının döküm şartlarında oluşan Al₂Cu fazının blok, ötektik veya her ikisini birden içeren bir morfolojide katılaştığı ve yüksek katılma hızlarının ötektik Al₂Cu yapısını teşvik ettiği rapor edilmiştir [17,20]. Ayrıca Al₂Cu fazının katılmanın son aşamasında β -Al₅FeSi tabakası, kaba ötektik partikülü üzerinde çekirdeklenebileceği veya ince partiküller halinde küçük ötektik Si partiküllerinin üzerinde oluşabileceği bildirilmiştir [21,22]

Benzer bir yapı Şekil 4-b'de 3 numaralı EDS analizinin alındığı noktada görülmektedir. Şekil 4-b'de verilen 2 numaralı EDS analizinde alüminyum ile birlikte yoğun olarak bakır sinyali alınmıştır. Bu fazın Al₂Cu olması muhtemeldir. Yapılan çalışmalar Al₂Cu fazının mikroyapı içerisinde blok yapılı olarak Al₂Cu şeklinde veya Al-Al₂Cu ötektik şeklinde bulunabileceğini göstermiştir [17]. SEM görüntüsünde yer alan Al₂Cu yapısı ise blok yapılı bir intermetalige örnektir. SEM görüntüsünde matris ile aynı renkte fakat kabartma görünümü veren fazların üzerinden alınan 4 numaralı EDS analizinde alüminyum ile birlikte yoğun olarak silisyum sinyalinin alındığı görülmektedir. Bu fazın optik mikroskop görüntülerinde belirgin bir şekilde gözükken ötektik Al-Si yapısı olduğu söylenebilir.



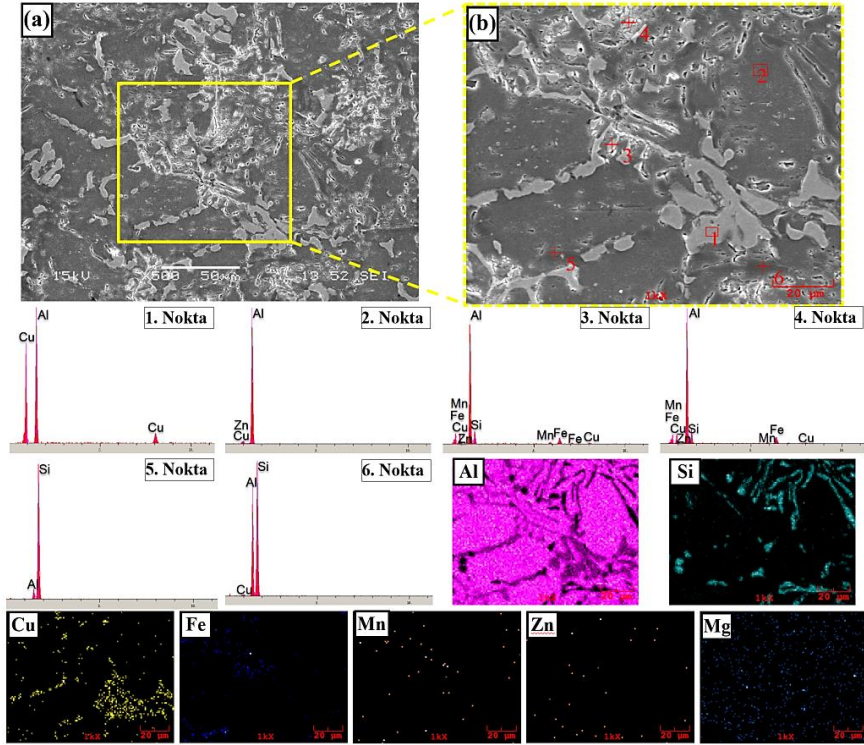
Şekil 1. Cu0 kodlu numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi



Şekil 2. CuO kodlu numunenin a) SEM görüntüsü ve b) MAP analizi

Bu çalışmada oluşan Al_2Cu yapılarının hem blok yapıları hem de ötektik olarak oluştuğu gözlemlenmiştir. Öte yandan SEM görüntüsünde bu fazların özellikle ötektik silisyum partiküllerinin üzerinde oluştuğu anlaşılmaktadır. MAP analizinde benzer kontrast gösteren fazlardan yoğun bakır ve alüminyum sinyali alındığı yani bu fazlarında Al_2Cu fazını temsil ettiği söylenebilir. XRD analizinde mikroyapıda eser miktarda var olduğu tespit edilen ve artan bakır oranı ile kısmi bir artış gösteren $CuZn_5$ fazına rastlanmıştır. Fakat XRD analizinde ortaya çıkan bu faz SEM görüntüsünde ayır-

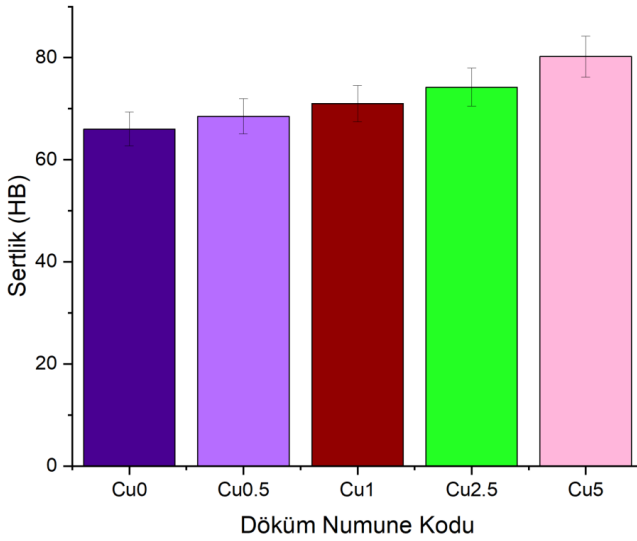
edilebilir bir şekilde tespit edilememiştir. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan benzer bir çalışmada [23], XRD analizinde tespit edilen $CuZn_5$ fazına SEM görüntülerinde rastlanılmadığı rapor edilmiştir. Çalışmada bu durum $CuZn_5$ fazının küçük boyutlarda mikroyapıda dağınık bir halde bulunmasına bağlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu gerçekleştirilen XRD analizinde yer alan eser miktardaki $CuZn_5$ fazının SEM görüntülerinde tespit edilememesi Wang ve arkadaşlarının bulgularına benzer bir şekilde açıklanabilir.



Şekil 3. Cu5 kodlu numunenin SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizi

3.2 Sertlik testleri

Şekil 7’de Etial 180 alaşımı içerisine ilave edilen bakır ile makro sertlikte meydana gelen değişim grafiği görülmektedir. Grafikte görüleceği üzere Etial 180 alaşımı içerisine ilave edilen bakırın sertlikte doğrusal bir artışa neden olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmada en yüksek sertlik değeri Etial 180 alaşımı içerisine ağırlıkça %5 bakır ilave edilen C5 numunesinde elde edilmiştir. İlave edilen ağırlıkça %5 bakır ile alaşımın sertlik değerini 80.2 HB olarak ölçülmüş ve başlangıç duruma göre ~% 22 oranında arttığı belirlenmiştir. Bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğü Al-Cu ikili denge diyagramından görüleceği üzere yaklaşık 500 °C sıcaklıkta ağırlıkça %5.65 gibi düşük bir değere sahiptir [24]. Öte yandan Etial 180 alaşımına ilave edilen bakırın fazlası Al₂Cu intermetalik fazlarını oluşturması beklenmektedir. Kısmi olarak matris fazda çözünen bakır katı eriyik sertleşmesi ile alaşımın sertliğine katkı sağlamaktadır. Fakat sertliğin artmasında neden olan ana mekanizma Al₂Cu intermetalik oluşumu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bakır ilavesi sonucu oluşan sert intermetalik yapılar dislokasyon hareketini engelleyerek sertliğin artmasına neden olur. Bu sebeple artan bakır oranı ile sertliğin artması beklenir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda Al-Si ve Al-Mg-Si gibi alaşımların sertliğinin artan bakır oranını ile arttığı rapor edilmiştir [25–27].

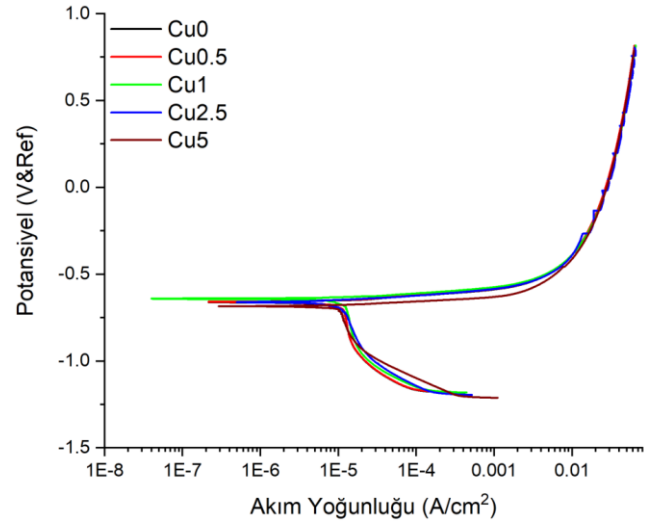


Şekil 7. Döküm numunelerin sertlik sonuçları

3.3 Korozyon testleri

0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen potansiyodinamik polarizasyon testi sonrası elde edilen Tafel eğrisi Şekil 8’de verilmiştir. Döküm numunelerin Tafel eğrilerinde, alaşımın içerisine ilave edilen bakır ile birlikte önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir. Tablo 2’te Tafel eğrileri üzerinden ölçülen korozyon potansiyellerine göre artan bakır oranının korozyon potansiyelleri üzerinde doğrusal bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Öte yandan genel bir yorum olarak artan bakır oranı ile korozyon potansiyeli değerinde bir azalma olduğu yani alaşımı daha

aktif tarafa kaydıracağı söylenebilir. Normalde alüminyum alaşımları içerisine ilave edilen bakırın korozyon direncini azaltacağı yönünde bir yaklaşım bulunsa bile bakırın oluşturduğu Al₂Cu intermetalik fazlarının korozyon potansiyeli matris faza göre daha pozitifdir fakat demir içeren intermetalik fazlara göre daha negatiftir [28,29]. Bununla birlikte alüminyum içerisine ilave edilen bakır ile oluşan Al₂Cu intermetalik yapısı tane sınırlarına çökelmektedir. Bunun sonucunda α-Al matris ile intermetalikler arasında oluşan potansiyel fark bölgesel galvanik çiftlerinin oluşumu teşvik ederek tane ve tanelerarasında oluşan korozyon mekanizmasını harekete geçirmektedir [30,31]. Yine literatürde alüminyum alaşımı içerisine ilave edilen bakır gibi alaşım elementlerinin oluşturduğu Al₂Cu, MgSi₂ gibi intermetalik fazların α-Al matris bir potansiyel farka neden olduğu ve mikro galvanik hücre oluşturabileceği belirtilmiştir [31–33]. Döküm numunelerin mikroyapılarında artan bakır oranı ile oluşan Al₂Cu intermetalik fazlarının matris ve diğer fazlar ile etkileşime girerek korozyonu daha kompleks bir hale getirmesi beklenir. Bu sebeple döküm numunelere ilave edilen bakır ile alaşımın korozyon potansiyellerinde doğrusal bir değişim olmaması muhtemel bir durumdur. Öte yandan korozyon çalışmalarında özellikle korozyonu kinetik açıdan değerlendirilmesinde kritik bir öneme sahip akım yoğunluğu değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Akım yoğunluğu değerlerine göre ağırlıkça %0.5 bakır ilave edilen Cu0.5 kodlu numune hariç bakırın akım yoğunluğunu artırdığı görülmektedir.



Şekil 8. Döküm numunelerin Tafel eğrileri

Cu0.5 kodlu numunenin bakır oranının diğerlerine numunelere göre nispeten düşük olması mikroyapıda oluşan intermetalik faz yoğunluğunun diğer numunelerden daha az olacağına işaret etmektedir. Öte yandan alaşıma düşük miktarda ilave edilen bakırın mikroyapıda bulunan diğer intermetalik fazlar veya matris faz ile etkileşime girmesi sonucu yapıda dağılması da muhtemeldir. Bu sebeple ağırlıkça %0.5 bakır içeren alaşımın akım yoğunluğu nispeten referans alaşıma göre daha az çıkmıştır. Bununla

birlikte artan bakır oranının genel olarak korozyon akım yoğunluğunu artırdığı söylenebilir. Bunun bir sonucu olarak artan bakır oranı ile korozyon hızı artmakta, yani korozyon direnci azalmaktadır.

Tablo 2. Tafel test parametreleri

	E_{kor} (mV)	I_{kor} (uA/cm ²)	β_a	β_c	KH (mpy)
Cu0	-652.508	8.23	28	465	17.063
Cu0.5	-660.162	6.997	33.2	241.2	14.593
Cu1	-644.058	9.195	32.3	370.9	19.27
Cu2.5	-665.046	8.843	38.3	438.3	18.907
Cu5	-687.105	10.202	29.1	1240.7	22.642

4 Sonuçlar

Bu çalışmada Etial 180 (LM2) alaşımı içerisine farklı oranlarda bakır ilave edilmiş ve değişen bakır oranının alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkileri, sertlik üzerindeki etkileri, ve korozyon direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular şu şekildedir;

1) Etial 180 alaşımına içerisine ilave edilen bakırın artması ile mikroyapıda yeni oluşan fazlar optik mikroskop görüntüsü ile tespit edilebilmektedir. Mikroyapılardan alınan SEM görüntüsü, EDS ve MAP analizine göre artan bakır oranı ile Al₂Cu fazının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte artan bakır oranı ile mikroyapıda tanımlanamayan fakat XRD analizinde küçük pikler olarak kendini gösteren eser miktarda CuZn₅ fazına rastlanmıştır.

2) Döküm alaşıma ilave edilen bakır ile alaşımın sertliğinde doğrusal bir değişim meydana geldiği görülmüştür. Öte yandan artan bakır oranı ile mikroyapıda oluşan Al₂Cu fazlarının sertliğinin artmasında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Çalışmada en düşük sertlik Cu0 kodlu referans numunede ölçülürken en yüksek sertlik değeri Cu5 kodlu ağırlıkça %5 oranında bakır içeren numunede ölçülmüştür.

3) Etial 180 alaşımı içerisinde ilave edilen bakırın korozyon potansiyeli üzerinde doğrusal bir değişime neden olmadığı gözlemlenmiştir. Fakat artan bakır oranı ile korozyon akım yoğunluğunun genel olarak arttığı tespit edilmiştir. Döküm numuneler içerisinde en düşük korozyon direnci ağırlıkça %5 bakır içeren Cu5 kodlu numunede ölçülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü BAP 2021-73338635-01 nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

[1] J.R. Davis, Aluminum and Aluminum Alloys, Light

- Met. Alloy. 66, 2001. <https://doi.org/10.1361/autb2001p351>.
- [2] B. Stojanovic, M. Bukvic, I. Epler, Application of aluminum and aluminum alloys in engineering, Appl. Eng. Lett. 3 (2), 52–62, 2018. <https://doi.org/10.18485/aeletters.2018.3.2.2>.
- [3] E. Kocaman, S. Şirin, D. Dispınar, Artificial Neural Network Modeling of Grain Refinement Performance in AlSi10Mg Alloy, Int. J. Met. 15, 338-348, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00472-9>.
- [4] R.S. Rana, R. Purohit, D. S, Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Alloy Composites, Int. J. Sci. Res. Publ. 2 (6), 1–7, 2012
- [5] J.F. King, 6 - Aluminium products, in: J.F.B.T.-T.A.I. King (Ed.), Woodhead Publishing, pp. 6–36, 2001. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-151-6.50012-4>.
- [6] M. Çolak, S.H. Yetgin, Investigation of the Effects of Casting Method on Cooling Plate on Tribological Properties of A357 Aluminum Alloy with Taguchi Method, 7 (83), 99–103, 2018.
- [7] Q. Miao, D. Wu, D. Chai, Y. Zhan, G. Bi, F. Niu, G. Ma, Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing, Mater. Des. 186, 108205, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108205>.
- [8] M. Warmuzek, Aluminum-silicon casting alloys, ASM International, Ohio, 2004.
- [9] M. Çolak, R. Kayıkcı, A356 Döküm Alaşımında Elektromanyetik Karıştırmanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 15 (3), 345–351, 2009.
- [10] A. Lakshmanan, S. Shabestari, J. Gruzleski, Microstructure Control of Iron Intermetallics in Al-Si Casting Alloys, 86, 457–465, 1995. <https://doi.org/doi:10.1515/ijmr-1995-860704>.
- [11] M. Başaranel, N. Saklakoğlu, SIMA prosesiyle üretilmiş ETİAL 180 alüminyum alaşımına eser miktarlarda magnezyum ve kalay ilavesinin etkilerinin incelenmesi, Journal. 3 (2), 83–90, 2012.
- [12] E. Uslu, R. Çatar, M. Çolak, Si ve Cu Elementleri İçeren Alüminyum Döküm Alaşımının Korozyon Özelliklerinin Belirlenmesi ve Karşılaştırılması, Eng. Sci. 12 (3), 133–140, 2017. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.3.1A0381>.
- [13] N. Nafsin, H.M.M.A. Rashed, Effects of Copper and Magnesium on Microstructure and Hardness of Al-Cu-Mg Alloys, 2 (5), 533–536, 2013.
- [14] Y.A. Muhi, Effect of Copper Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Alloy, Al-Qadisiya J. Eng. Sci. 7, 366–381, 2014.
- [15] I. Bacaicoa, M. Wicke, M. Luetje, F. Zeismann, A. Brueckner-Foit, A. Geisert, M. Fehlbier, Characterization of casting defects in a Fe-rich Al-Si-Cu alloy by microtomography and finite element



- analysis, Eng. Fract. Mech. 183, 159–169, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.015>.
- [16] C.M. Dinnis, J.A. Taylor, A.K. Dahle, As-cast morphology of iron-intermetallics in Al–Si foundry alloys, Scr. Mater. 53 (8), 955–958, 2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.06.028>.
- [17] E. Sjölander, S. Seifeddine, Optimisation of solution treatment of cast Al–Si–Cu alloys, Mater. Des. 31, 44–49, 2010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.035>.
- [18] M. Başaranel, N. Saklakoğlu, S.G. İrizalp, Etial 180 Alüminyum Alaşımına İlave Edilen Mg ve Sn Elementlerinin İntermetalik Fazlara Etkisi - The Influence of Sn And Mg Contents on the Intermetallic Phases of Etial 180 Alloy, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg. 9, 17–24, 2015. <http://dergipark.gov.tr/cbayarfbe/issue/4056/53423>.
- [19] N.C.W. Kuijpers, F.J. Vermolen, C. Vuijk, P.T.G. Koenis, K.E. Nilsen, S. van der Zwaag, The dependence of the β -AlFeSi to α -Al(FeMn)Si transformation kinetics in Al–Mg–Si alloys on the alloying elements, Mater. Sci. Eng. A. 394, 9–19, 2005. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.09.073>.
- [20] M. Djurdjevic, T. Stockwell, J. Sokolowski, The effect of strontium on the microstructure of the aluminium-silicon and aluminium-copper eutectics in the 319 aluminium alloy, Int. J. Cast Met. Res. 12, 67–73, 1999. <https://doi.org/10.1080/13640461.1999.11819344>.
- [21] Z. Li, A.M. Samuel, F.H. Samuel, C. Ravindran, S. Valtierra, Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl₂ phase in Al-Si-Cu 319 alloys, J. Mater. Sci. 38, 1203–1218, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022857703995>.
- [22] A.M. Samuel, J. Gauthier, F.H. Samuel, Microstructural aspects of the dissolution and melting of Al₂Cu phase in Al-Si alloys during solution heat treatment, Metall. Mater. Trans. A. 27, 1785–1798, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF02651928>.
- [23] H. Wang, Y. Zhang, C. Wang, S. Cao, W. Bai, C. Wu, J. Qian, Effect of Al Content on Microstructure and Properties of Zn-Cu-Al Alloy, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 746, 12018, 2020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/746/1/012018>.
- [24] O. Zobac, A. Kroupa, A. Zemanova, K.W. Richter, Experimental Description of the Al-Cu Binary Phase Diagram, Metall. Mater. Trans. A. 50, 3805–3815, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05286-x>.
- [25] M. Emamy, A.R. Emami, K. Tavighi, The effect of Cu addition and solution heat treatment on the microstructure, hardness and tensile properties of Al–15%Mg₂Si–0.15%Li composite, Mater. Sci. Eng. A. 576, 36–44, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.066>.
- [26] M. Zeren, E. Karakulak, S. Gümü, Influence of Cu addition on microstructure and hardness of near-eutectic Al-Si-xCu-alloys, Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed. 21, 1698–1702, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60917-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60917-5).
- [27] M. Emamy, N. Nemati, A. Heidarzadeh, The influence of Cu rich intermetallic phases on the microstructure, hardness and tensile properties of Al-15% Mg₂Si composite, Mater. Sci. Eng. A. 527, 2998–3004, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.063>.
- [28] C.P. student Castella, Politecnico di Torino Porto Institutional Repository [Doctoral thesis] Self hardening aluminum alloys for automotive applications, DOI 10.6092/Polito/Porto/2598757 2016-07-28, 2015. <https://doi.org/10.6092/polito/porto/2598757>.
- [29] C. Vargel, Chapter C.13 - Galvanic corrosion, in: C.B.T.-C. of A. (Second E. Vargel (Ed.), Elsevier, Amsterdam, 295–315, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099925-8.00025-9>.
- [30] M.J. Robinson, Mathematical modelling of exfoliation corrosion in high strength aluminium alloys, Corros. Sci. 22, 775–790, 1982. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X\(82\)90013-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0010-938X(82)90013-0).
- [31] A. Hossain, F. Gulshan, A.S.W. Kurny, The effect of 4 wt.% Cu addition on the electrochemical corrosion behavior of automotive engine Al-6Si-0.5Mg alloy, Chem. Met. Alloy. 8, 69–74, 2015. <https://doi.org/10.30970/cma8.0307>.
- [32] A.T. Mayyas, M.M. Hamasha, A. Alrashdan, A.M. Hassan, M.T. Hayajneh, Effect of Copper and Silicon Carbide Content on the Corrosion Resistance of Al-Mg Alloys in Acidic and Alkaline Solutions, J. Miner. Mater. Charact. Eng. 11, 335–352, 2012. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2012.114025>.
- [33] M. Abdulwahab, I.A. Madugu, S.A. Yaro, A.P.I. Popoola, Degradation Behavior of High Chromium Sodium-Modified A356.0-Type Al-Si-Mg Alloy in Simulated Seawater Environment, J. Miner. Mater. Charact. Eng. 10, 535–551, 2011. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.106041>.





Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleri ile oluşturulması

Creation of sinkhole susceptibility map using Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP) methods in Aksaray province

Süleyman Sefa Bilgilioğlu^{1,*} , Hacer Bilgilioğlu² 

¹ Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray.

² Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray.

Öz

Afetler, can ve mal kayıpları gibi büyük zararlara yol açan beklenmedik ve istenmedik durumlardır. Doğal afetlere örnek olarak deprem, sel, heyelan, çığ ve obruklar gösterilebilir. Önemli bir afet türü olan obruklar meydana geldiği alanda ciddi güvenlik sorunları meydana getirmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de, yeraltı su kaynaklarının giderek azalması, iklim özelliklerini hesaba katmadan yapılan yoğun tarımsal faaliyetler ve bunlara ek olarak ilgili bölgelerin jeolojik yapısı gibi faktörler obruk oluşma riski bulunan alanlarda sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Can ve mal kaybına yol açan, kontrol edilemeyen ve aniden gelişen obruk olayları tamamen engellenemese de, önlem alabilmek mümkündür. Bu çalışmada Aksaray ilinde hızla sayısı artan obrukların mekânsal olabirliğini tahmin eden ve gösteren duyarlılık haritalarının oluşturulması amacı ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemleri kullanılmıştır. Literatür çalışmaları ve uzman görüşleri dikkate alınarak duyarlılık haritası oluşturmak için 12 kriter belirlenmiş, kriter önem dereceleri AHS ile hesaplanmış ve obruk duyarlılık haritası oluşturulmuştur.

Anahtar kelimeler: Afet yönetimi, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Obruk duyarlılık, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

1 Giriş

Obruklar topluma ve çevreye çok ciddi zararlar verebilecek doğal bir afet olarak kabul edilmektedir. Öngörülemeyen bu tür jeolojik afetler özellikle yerleşim yerlerine ve tarım alanlarına geri dönüşü olmayacak zarar verebilme potansiyeline sahiptir. Yapay ve doğal boşluklar, yer altı suları veya doğal mağaralar gibi yer altında bulunan yapıların tam anlamıyla tespit edilememesi farklı boyut ve şekildeki obrukların ani oluşmasına ve dolayısı ile çevreye zararın boyutlarını arttırmaktadır [1]. Obruklar, genellikle dolomit ve kireçtaşı gibi kalsiyum karbonatlardan oluşan kayaların yüzeyde çözünmesinin neden olduğu çöküntüler olduğundan karstik kayacık alanlar diğer bölgelere göre daha da savunmasızdır [2]. Özellikle bu gibi bölgelerde yer üstü ve yer altı doğal yapıyı değiştirecek insan faaliyetleri

Abstract

Disasters are unexpected and undesirable situations that cause significant damage, such as loss of life and property. Examples of natural disasters are earthquakes, floods, landslides, avalanches, and sinkholes, etc. can be displayed. Sinkholes, an essential type of disaster, create serious security problems in the area where they occur. In Turkey, as in the whole world, factors such as the gradual decrease of groundwater resources, intensive agricultural activities without taking into account the climatic characteristics, and in addition to these, the geological structure of the relevant regions cause problems in areas where there is a risk of sinkhole formation. Although uncontrollable and suddenly developing sinkhole events that cause property loss and life cannot be wholly prevented, it is possible to take precautions. In this study, Geographic Information Systems (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHS) methods were used to create susceptibility maps that predict and show the spatial likelihood of the rapidly increasing number of sinkholes in Aksaray. Considering the literature studies and expert opinions, 12 criteria were determined to create a sensitivity map, criteria importance levels were calculated with AHP, and a sinkhole sensitivity map was created.

Keywords: Disaster management, Geographic Information Systems (GIS), Sinkhole susceptibility, Analytical Hierarchy Process (AHP)

bölgenin savunmasızlığını daha da arttıracaktır [3–5]. İnsan faaliyetlerinin yanı sıra iklim ve jeolojik olaylar karstik oluşumunu etkileyen diğer faktörlerdir [6, 7]. Obruk oluşumundaki ana kriterler; jeolojik, hidrojeolojik, tektonik ve klimatolojik gibi doğal olaylar olurken, hızlandırıcı etken ise insan faaliyetleridir. Türkiye’de en çok obruk oluşumunun meydana geldiği Konya Kapalı Havzası (KKH)’nda yapılan birçok çalışmada araştırmacılar obrukların ve zemin çökmelerinin meydana gelmesinin temel sebebi olarak kontrolsüz yer altı suyu kullanımı, buna bağlı olarak su seviyesinin düşmesi ve yer altında boşlukların oluşması olduğuna dikkat çekmektedir [8, 9, 18, 10–17].

Obruk risk değerlendirmesi çalışmaları ile afet önleme ve zarar azaltma politikaları geliştirilebilir ve afete yönelik

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sbilgilioglu@aksaray.edu.tr (S. S. Bilgilioğlu)
Geliş / Received: 21.12.2022 Kabul / Accepted: 01.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1222497

planlamalar yapılarak obrukların sebep olduğu bu zararlar azaltılabilir. Obruk gibi afetlerin, risk değerlendirmesinin ve yönetiminin en önemli adımlarından biri gelecekte meydana gelebilecek afetin mekânsal olabilirliğini tahmin eden ve gösteren duyarlılık haritalarının oluşturulmasıdır [19–22]. Afet duyarlılık haritalarının oluşturulması işlemi Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) analizlerini kapsayan kompleks bir işlem sürecidir ve klasik yöntemler ile gerçekleştirilmesi oldukça zaman alıcı ve zor bir işittir. Mekânsal verinin toplanması ve analiz edilmesinde etkin bir araç olan CBS, bu ve benzeri birçok mekânsal problemin çözümünde etkili bir şekilde kullanılmaktadır [23].

Literatürde, heyelan [24–27], sel [28–30], çığ [31–33], yangın [34, 35] gibi birçok afete yönelik duyarlılık haritalarının oluşturulması çalışmaları başarı ile uygulanmıştır. Özellikle son yıllarda obruk duyarlılık haritalarının üretilmesinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; uzman görüşüne dayalı yöntemler [36–38], istatistiksel yöntemler [22, 39], deterministik yöntemler [40–42] ve makine öğrenme modelleridir [21, 43–45]. Fiziksel temellere dayalı olarak geliştirilen deterministik modeller mekanik yasaları kullanmakta olup detaylı jeolojik, jeoteknik ve hidrojeolojik verilere ihtiyaç duymaktadır ve bu nedenle geniş alanlı çalışmalar için uygun değildir [46, 47]. İstatistiksel ve makine öğrenme yöntemleri veri güdümlü yöntemlerdir ve envanter ile kriterler arasındaki ilişki kullanılmaktadır. Dolayısı ile bu yöntemlerin uygulanması ve doğru sonuçların alınabilmesi için güvenilir bir envanter veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Uzman görüşüne dayalı yöntemlerde kriter önem dereceleri uzman görüşü alınıp belirlenerek model oluşturulmaktadır [48]. Özellikle envanter verisinin güvenilir olmadığı ya da yetersiz olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Literatürde uzman görüşüne dayalı olarak oluşturulan afet duyarlılık haritalarında sıklıkla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında ÇKKV metotlarından AHS yöntemi ve CBS yardımıyla Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının oluşturulması hedeflenmiştir. Sarı vd. [17] yapmış oldukları KKH'nın bir bölümünde obruk duyarlılık haritası oluşturulması gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı olarak aldıkları sınırdaki Aksaray ilinin sadece Güney Batı kısmı yer almaktadır. Son yıllarda obruk olaylarının görülmeye başladığı Aksaray ili jeolojik, hidrojeolojik, topografik ve iklim özellikleri bakımından obruklara karşı oldukça duyarlı bir ildir. Buna rağmen literatürde il genelinde yapılmış bir çalışma bulunmaması, bu çalışmanın literatüre sağlayacağı en büyük katkıdır. Bu bağlamda bölgedeki uzmanlar ve literatürdeki ilgili çalışmalar dikkate alınarak 12 değerlendirme kriteri belirlenmiş ve ağırlıklandırılarak obruk duyarlılık haritası oluşturulmuştur.

2 Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak seçilen Aksaray ili, Ankara, Adana karayolu ile Kayseri, Konya karayolu üzerinde ve 38-39° kuzey paralelleri ile 33-35° doğu meridyenleri arasında bulunmaktadır (Şekil 1). Aksaray ilinin yüzölçümü yaklaşık olarak 7700 km²'dir. 1929-2021 yıllarını kapsayan uzun yıllar ortalama en yüksek sıcaklık 30.7 °C, en düşük sıcaklık -3.6 °C dir. Bölge yıllık ortalama 361.7 mm yağış almakta

olup yaz aylarında (Temmuz-Ağustos) ortalama 5.4-7.1 mm dir ve bu bakımdan Aksaray ili Türkiye'nin kurak illerinden biridir.

Çalışma alanında gerçekleştirilen arazi çalışmalarında bölgede 5 adet obruk oluşumu tespit edilmiştir. Tespit edilen obrukların mekânsal dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Arazi çalışmalarında tespit edilen obrukların genişlikleri 3.5 m ile 25 m arasında değişiklik göstermektedir.

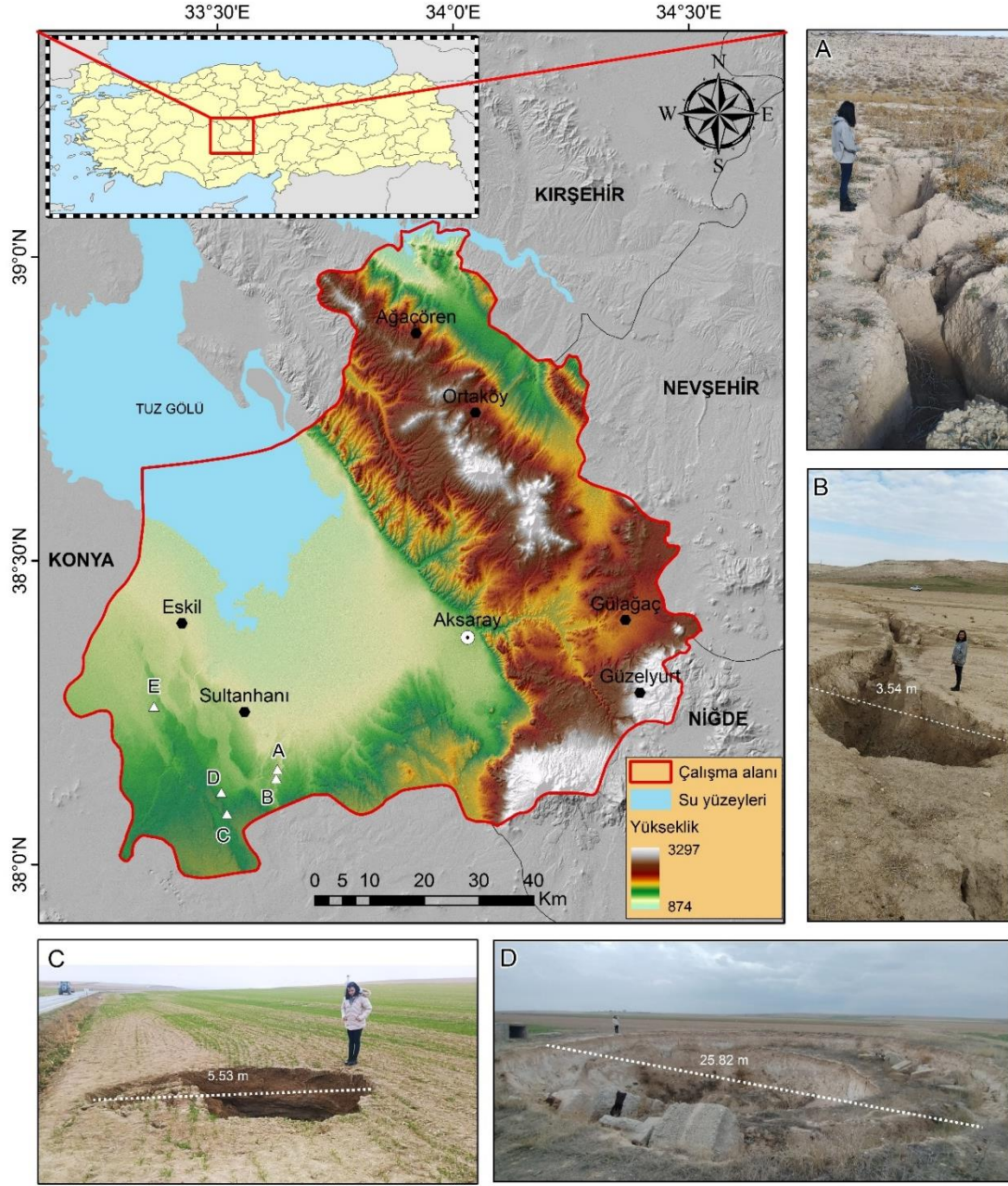
2.1 Çalışma alanı jeolojisi

Çalışma alanını bölgesel jeoloji açısından ele alındığında Türkiye tektonik birliklerinden Kırşehir Bloğu içerisinde yer almaktadır. İnceleme alanında metamorfik, magmatik ve sedimanter birimler yer almaktadır. Orta Anadolu Kristalen Karmaşığına ait metamorfik ve magmatik kayalar gözlenmekte olup bunlar üzerine ise uyumsuz olarak sedimanter ve volkanik kayalar gelmektedir [49, 50].

Bölgedeki en yaşlı birim Orta Anadolu Metamorfiklerine ait Paleozoyik yaşlı Kalkanlıdağ, Tamadağ ve Bozçaldağ metamorfikleridir. Bu metamorfik birimler alttan üste doğru gnays, biyotitist, piroksenist, amfibolist, kalsilikatik şistler, kuvarsit ve kuvarssist karmaşığı (Kalkanlıdağ Formasyonu), mermer-şist ve gnays ardalanması (Tamadağ Formasyonu) ve çeşitli özellikte mermer, metaçörtlü yarı mermer ve metaçört (Bozçaldağ Formasyonu) kayaç topluluğundan oluşmaktadır [51]. Metamorfik birimler Orta Anadolu Granitoidlerine ait Üst Kretase yaşlı gabro, granit ve granodiyorit bileşimli magmatik kayalar tarafından kesilmektedir [50]. Bu magmatik kayaçlar mafik bileşimli (gabro ve Mesozoyik ofiyolitik seri) ve feslik bileşimli (granitik, monzonitik ve siyenitik) magmatik kaya gruplarından oluşmaktadır.

Sedimanter birimler, inceleme alanının güneydoğusunda denizel fliş niteliğinde Eosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı kayaçlarla denizel karasal geçişler sunan Oligosen yaşlı kayaçlar şeklinde gözlenmektedir. Litoloji, Konya – Aksaray arasında oldukça geniş alanlarda yüzeyleyen Miyo-Pliyosen yaşlı kırıntılı ve karbonatlı kayaç ardalanmaları ile devam etmektedir. İnceleme alanının doğu kesimlerinde göl sel sedimanlarla yanal düşey geçişli olarak andezit, dasit, bazalt, riyolit ve riyodasitik bileşimli tüf, tüfit, aglomera ve lavlarla temsil edilen volkanik kayaçlar gözlenmektedir. Pleyistosen-Holosen dönemlerinde ise çeşitli karasal faaliyetlerle temsil edilen kırıntılı ve yer yer karbonatlı kayaçlar yaygın bir şekilde yüzeylemiştir [52].

Bu çalışma kapsamında bölgenin temel jeolojik birimleri metamorfik kayaçlar, magmatik kayaçlar, sedimanter kayaçlar, Kuvarterner yaşlı genç birimler ve çalışmanın esas konusuyla bağlantılı olan İnsuyu formasyonu olarak sınıflandırılmıştır (Şekil 3a). Aksaray ili içerisinde obrukların tamamının gözleendiği birim, genellikle göl sel ve akarsu ortamını karakterize eden kırıntılı (kıltaşı, çamurtaşı, marn, kumtaşı ve çakıltaşı), karbonatlı (kireçtaşı, killi kireçtaşı) ve az miktarda jips ve tuz gibi evaporitik kayaçlarla temsil edilen Miyo-Pliyosen yaşlı İnsuyu formasyonudur [52].



Bu çalışma alanının jeolojik olarak en önemli birimi olan İnsuyu formasyonu başlıca kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn ve bu karbonatlı kayalarla ara seviyeli olarak gözlenen konglomera, kumtaşı, çamurtaşı ve kilttaşları ile temsil edilmektedir. Birim birçok araştırmacı tarafından [53–56] İnsuyu formasyonu olarak tanımlanmıştır.

İnsuyu formasyonu genellikle beyaz, açık gri, bej renkli, yer yer pembe ve sarımsı renkli, ince-orta tabakalı yer yer fosilli kireçtaşı, marn, kumlu kireçtaşı, killi kireçtaşı, karbonatlı kilt taşı gibi karbonatlı kayalarla temsil edilmektedir. Alttan üste doğru kumtaşı ve çamurtaşı ara katkılı marn, killi kireçtaşı, karbonatlı kilttaşları ve kilttaşları aralanmaları gözlenmektedir. Bazı yerlerde marnlar daha baskın olup içlerinde kireçtaşı ara tabakaları vardır [54, 55].

İnsuyu formasyonu genel olarak yatay veya yataya yakın tabakalı olup yamaçlarda yamaç eğiminin morfolojisine uygun olarak az eğimli bir yapı kazanmıştır. İnceleme alanının batısında kireçtaşı ara tabakalı marnlar ve killi karbonatlar daha yaygın olup bölgedeki eski obrukların çoğunluğu bu alanda oluşmuştur. İnsuyu formasyonunun baskın kaya türü olan kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn ve karbonatlı kilttaşları karstlaşmaya oldukça yatkın olup inceleme alanını da kapsayan obruk, uvala, polye vb. karstik yapıların en çok gözlemlendiği birimdir [52].

3 Materyal ve metod

Bu çalışmada, Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının oluşturulması için üç temel adımdan oluşan bir metodoloji

uygulanmıştır. İlk adım çalışmada kullanılacak ve obruk duyarlılık haritasının oluşturulmasında etkili olduğu düşünülen kriterlerin belirlenmesi ve veri tabanının oluşturulmasıdır. Daha sonra AHS yöntemi ile her bir kriterin ağırlıkları belirlenmiştir. Son olarak, obruk duyarlılık haritası oluşturulmuştur.

Bu çalışmada obruk duyarlılık haritasının oluşturulmasında kullanılan kriter ve kriter alt sınıfları (sınıflar, eşik değerleri vb.) literatür araştırmalarına [2, 5, 7, 14, 17, 19, 21, 36–39, 44, 45] ek olarak uzman görüşleri alınarak belirlenmiştir. Ayrıca kriter ve kriter alt sınıflarının ağırlıklarının hesaplanmasında da uzman görüşlerinden yararlanılmıştır. Bu kapsamda obruk konusunda çalışmaları olan ve en az yüksek lisans derecesine sahip Jeoloji, Hidrojeoloji, Jeofizik ve Harita Mühendislerinden oluşan 12 kişi belirlenmiştir. Tüm bu uzmanların görüşlerini almak için 26 sorudan oluşan bir anket oluşturulmuş ve her bir uzman ile görüşülerek anketler uygulanmıştır. Sonuç olarak obruk duyarlılık haritasının oluşturulması için 12 kriter ve 72 kriter alt sınıfı belirlenmiştir. Tüm kriterlerin detaylı açıklamaları

“3.1. kullanılan kriterler” bölümünde anlatılmıştır. Elde edilen tüm veriler WGS 84 (36) projeksiyon koordinat sistemine dönüştürülmüştür.

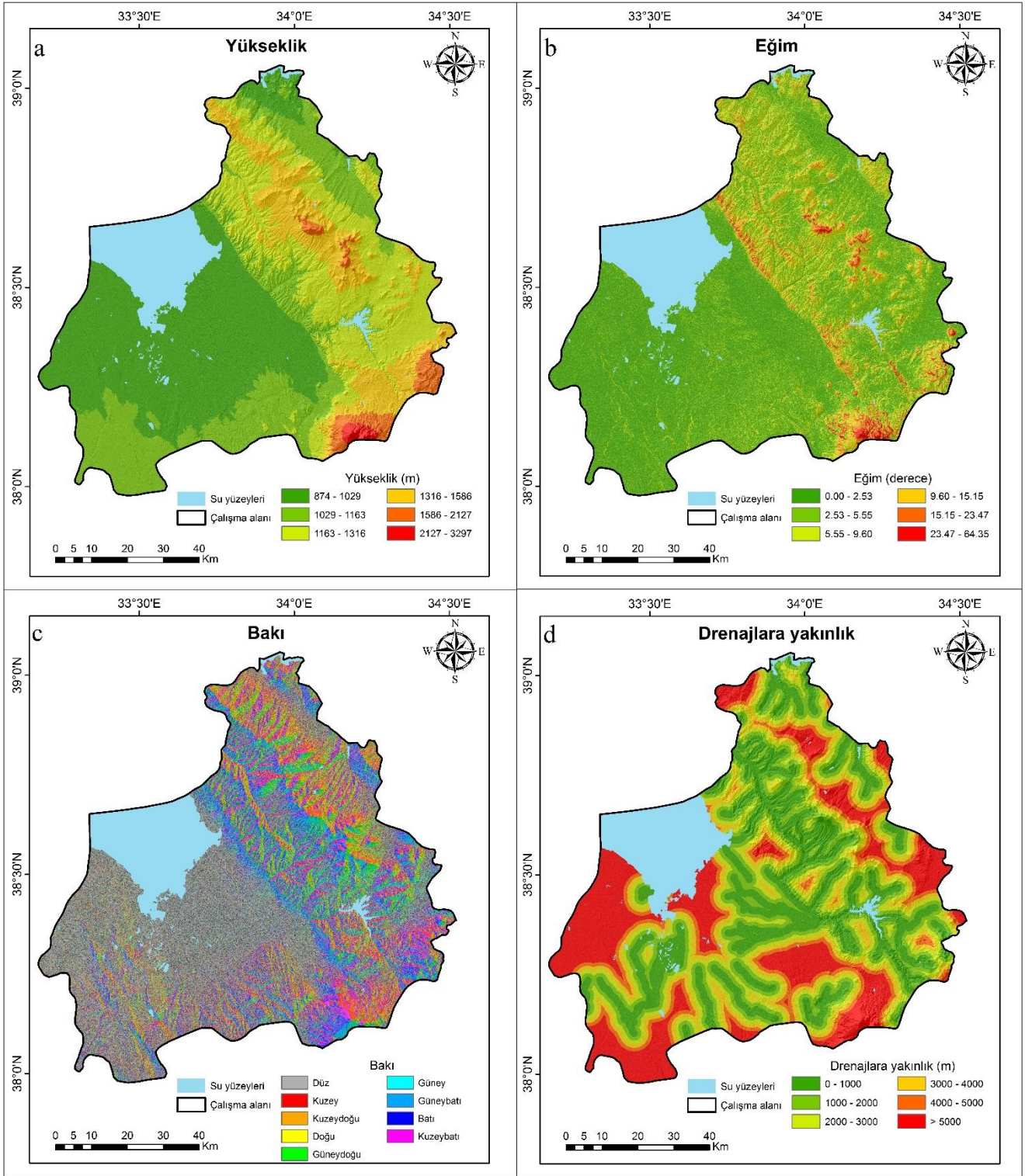
3.1 Kullanılan kriterler

Obrukların oluşumunda birçok kriter rol oynamaktadır. Bu kriterlerin doğru bir şekilde belirlenmesi ve elde edilmesi obruk duyarlılık çalışmalarında en önemli adımlardan biridir. Bu çalışmada, literatür ve uzman görüşleri alınarak 12 adet kriter seçilmiştir. Bu kriterler; eğim, bakı, yükseklik, litoloji, faylara yakınlık, geçirgenlik, yağış, arazi kullanımı, kuyu yoğunluğu, su yüzeylerine yakınlık, drenajlara yakınlık, yer altı suyu değişimidir ve Tablo 1’de kriterlerin temel özellikleri ve veri kaynakları sunulmuştur.

Yükseklik, eğim, bakı ve direnajsız yakınlık kriterleri obruk oluşumunda etkili topografik kriterlerdir ve birçok çalışmada bu kriterler kullanılmıştır [17, 62]. Çalışmada bu dört kriter 12.5 m çözünürlüğe sahip ALOS PALSAR yükseklik verisi kullanılarak oluşturulmuş ve Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan kriterler

Kriterler	Birim	Veri modeli	Ölçek/Çözünürlük	Veri kaynağı
Yükseklik	(m)			
Bakı	Kategorik	Raster	12.5 m	ALOS PALSAR
Eğim	Derece			
Drenajlara yakınlık	(m)			
Litoloji	Kategorik	Alan	1/100000	[57]
Faylara yakınlık	(m)	Çizgi	1/100000	[57, 58]
Geçirgenlik	Kategorik	Alan	1/100000	[57, 59, 60]
Yağış	(mm)	Raster	0.86 km	WorldClim 2.1 veri seti
Arazi kullanımı	Kategorik	Raster	10 m	[61]
Kuyu yoğunluğu	Kuyu/km ²	Nokta	3267 adet kuyu'dan enterpole	Aksaray İl Özel İdare ve İl AFAD Müdürlüğü
Yer altı suyu değişimi	(m)	Nokta	585 adet kuyu'dan enterpole	Aksaray İl Özel İdare ve İl AFAD Müdürlüğü
Su yüzeylerine yakınlık	(m)	Alan	1/100000	Çevre düzeni planı



Şekil 2. a: yükseklik, b: eğim, c: bakı ve d: drenajlara yakınlık haritası.

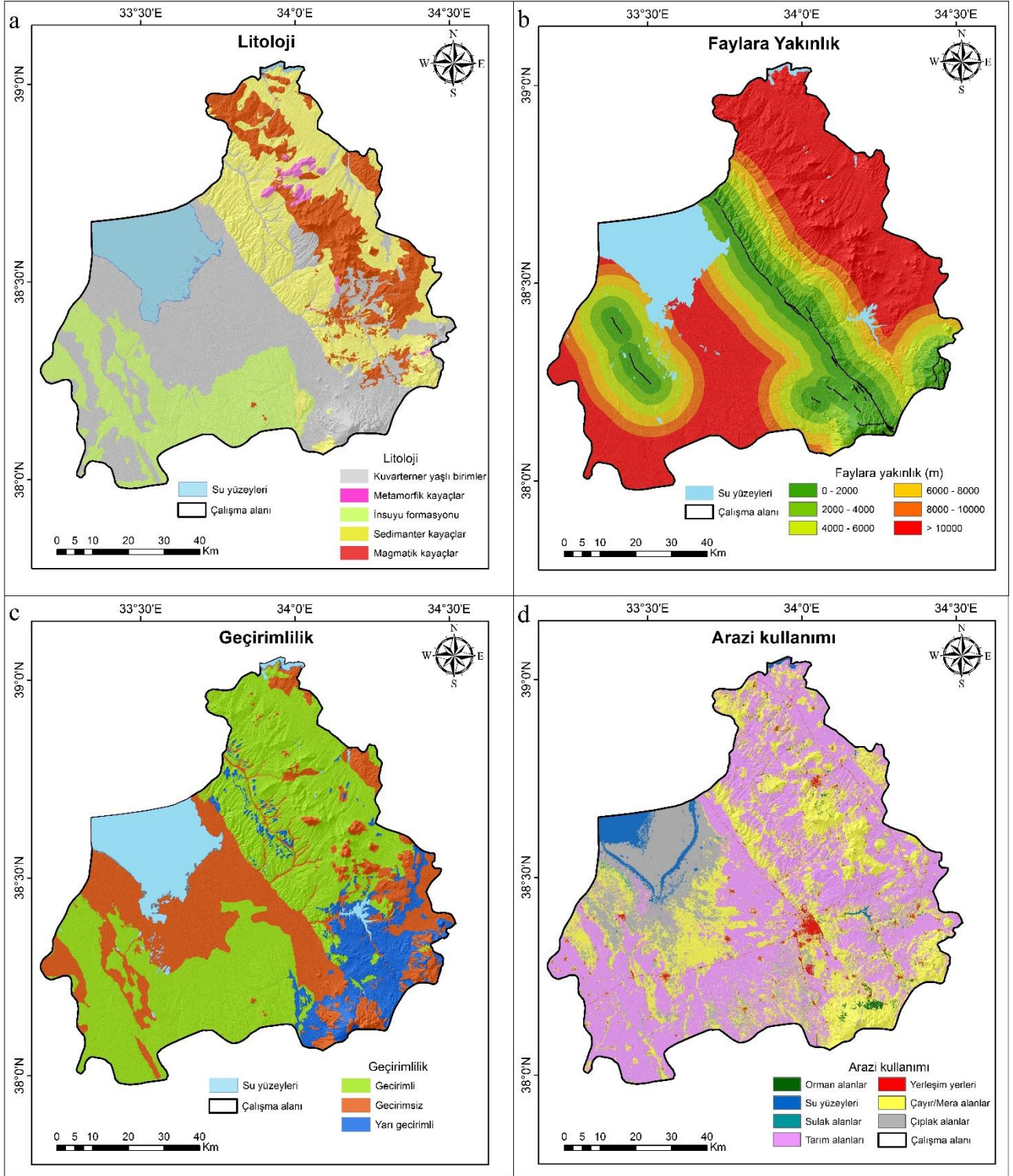
Faylara yakınlık birçok obruk duyarlılık haritalama çalışmasında kullanılan önemli bir kriterdir [39]. Faylara yakınlık haritası Şekil 3b'de gösterildiği gibi 6 sınıfta tampon bölgeler oluşturularak hazırlanmıştır. Obruk çalışmalarında toprak yüzeyinin çökme süresi ile toprak geçirgenliği arasında doğrusal bir ilişki olduğu belirtilmiştir

[37, 63]. Bu nedenle çalışma alanındaki kayalar Tekocak-Yardımlı [59] hidrojeolojik verilerine göre geçirimli (granit, mermer, kum/kumtaşı, traverten), yarı geçirgen (piroklastik kayalar, silt/silttaşı), geçirimsiz (şist, gnays, kil/kiltaşı, bazalt, andezit) olarak sınıflandırılmıştır. Çalışma alanına ait

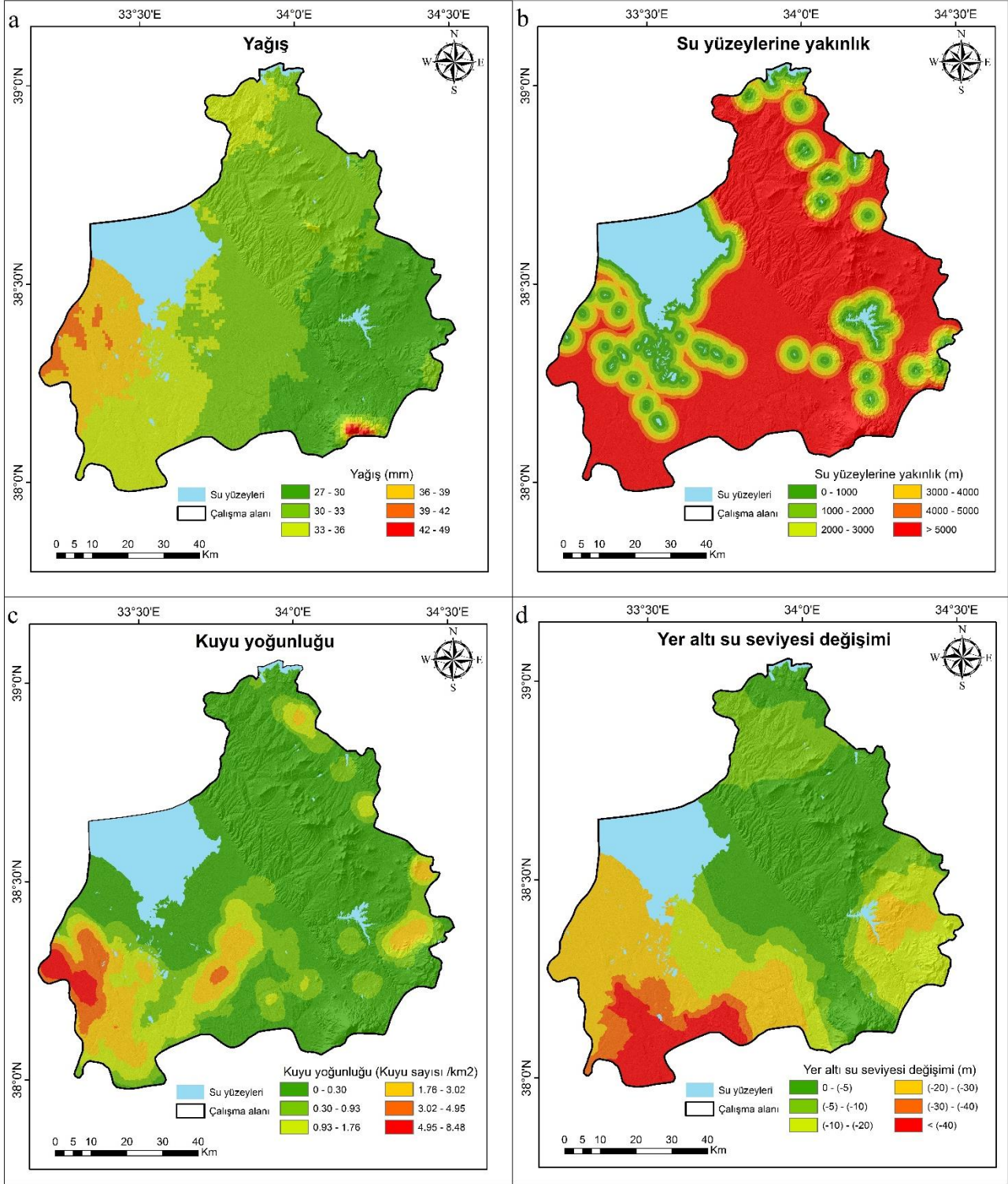
geçirgenlik haritası MTA [57], Tekocak-Yardımlı [59] ve Tulun vd. [60]'den değiştirilerek oluşturulmuştur (Şekil 3c).

Obruk oluşumunda en önemli etkenlerden biride arazi kullanımıdır [14, 17, 37]. Yanlış uygulanan tarımsal faaliyetler gibi antropolojik etkenler yer altı ve yerüstü kaynaklarını olumsuz etkilemekte ve obruk oluşumunu

hızlandırmaktadır. Bu çalışmada, arazi kullanım verileri Avrupa Uzay Ajansı tarafından 2021 yılında üretilen ve 10 m çözünürlüğe sahip arazi kullanım verisi kullanılmıştır [61]. Yedi sınıfa ayrılarak üretilen arazi kullanım haritası Şekil 3d'de sunulmuştur.



Şekil 3. a: litoloji, b: faylara yakınlık, c: geçirimsizlik ve d: arazi kullanımı.



Şekil 4. a: yağış, b: su yüzeylerine yakınlık, c: kuyu yoğunluğu ve d: yer altı su seviyesi değişimi.

Obruk oluşumunu hızlandırdığı için birçok çalışmada kullanılan bir diğer önemli kriter ise yağıştır [17, 64]. Çalışmada evrensel olarak kabul görmüş ve birçok çalışmada kullanılmış olan WorldClim iklim modeli kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4a).

Su yüzeylerine yakınlık obruk oluşumunu etkilediği için birçok çalışmada kullanılan bir kriterdir [65–67]. Bu çalışmada su yüzeyleri verisi Kırşehir-Nevşehir-Niğde-

Aksaray Planlama Bölgesi 1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planı sayısallaştırılarak elde edilmiş ve Şekil 4b'de gösterilmiştir.

Birçok araştırmacı, KKH'de meydana gelen obrukların yer altı suyunun azalması nedeniyle oluştuğunu belirtmiştir [8, 9, 12, 14, 17, 18]. Özellikle bölgede uygulanan sulu tarım politikası, çok fazla kuyunun açılmasına, dolayısıyla yer altı suyu seviyesinin hızla azalmasına neden olarak bölgede

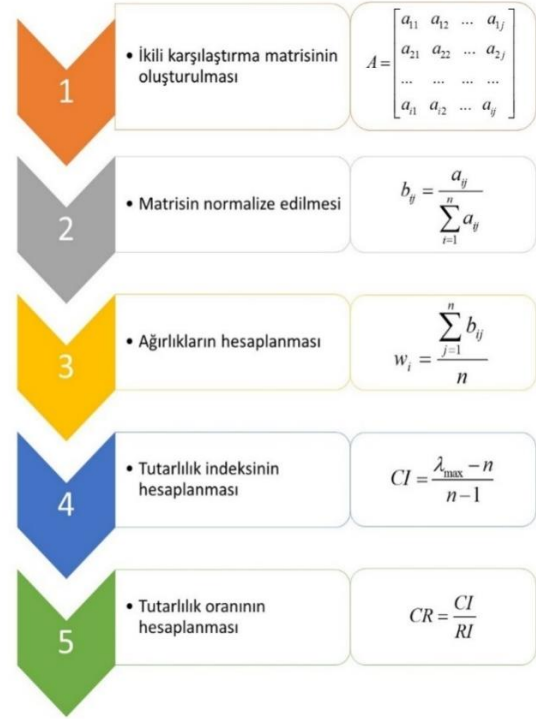
obruk oluşumunu hızlandırmaktadır. Çalışma bölgesinde daha önce açılan toplam 3267 adet kuyu verisi (Koordinat ve su seviyesi), Aksaray İl Özel İdaresi ve Aksaray AFAD İl Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. 2008-2021 yıllarına ait olan bu kuyuların yoğunluk haritası Şekil 4c'de gösterilmiştir. 2008-2010 yılları ve 2018-2021 yıllarında Temmuz ve Ağustos aylarında açılmış olan kuyulardan iki farklı yer altı su seviyesi haritası oluşturulmuş ve aralarındaki fark alınarak yaklaşık 10 yıl içerisindeki yer altı su seviye değişimini gösteren harita oluşturulmuştur (Şekil 4d).

3.2 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

AHS, Thomas L. Saaty tarafından 1977 yılında geliştirilen ÇKKV yöntemidir. AHS yöntemini kullanmanın en önemli avantajlarından biri, esnekliği ve farklı türdeki problemlere uygulanabilirliğidir. Ayrıca diğer ÇKKV tekniklerine göre daha kolay uygulama adımlarına sahiptir [68–70]. AHS, karar verme sürecinde çeşitli faktörlere göre değerlendirilen alternatifler arasından en iyisinin seçilmesi için tasarlanmıştır. Karar verme sürecini kolaylaştırmak ve öncelikleri belirlemek için ikili karşılaştırmalar yapılmaktadır [71]. Karar verme probleminde yer alan faktörlerin belirlenmesinin ardından ikili karşılaştırma matrisinin hazırlanması gerekmektedir. n adet faktörlü bir problemde $n(n-1)/2$ adet karşılaştırma yapılarak bir karşılaştırma matrisi oluşturulur [68]. Her faktörün ikili karşılaştırmasında Saaty'nin 1-9 ölçeği kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan AHS yönteminin adımları Şekil 5'te özetlenmiştir.

AHS sonuçlarının doğruluğu, karar verici tarafından yapılan ikili karşılaştırmaların tutarlılığına bağlıdır [72, 73]. AHS, bu tutarlılığın hesaplanmasına izin veren bir tutarlılık analizi sunar. Karşılaştırma matrisi ancak tutarlılık analizi sonucunda elde edilen tutarlılık oranı 0,10'dan küçükse tutarlı kabul edilebilir. Aksi takdirde karşılaştırma matrisinin yeniden oluşturulması gerekmektedir [68]. AHS kullanılarak faktör ağırlıklarının belirlenmesinden sonraki adım ise faktörlerin kombinasyonu ve obruk duyarlılık haritasının oluşturulmasıdır. Bu adımda, ağırlıklı doğrusal kombinasyon (WLC) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemi

kullanmanın amacı, her bir faktörün öznel değerlerini normalleştirmek ve normalize edilen her bir kriteri birbiriyle toplayarak bir uygunluk indeksi oluşturmaktır. Her bir alternatifin normalleştirilmiş toplam ağırlığı, o alternatifin değerinin kendisine atanan ağırlık ile çarpılması ve ardından tüm sonuçların toplamı ile elde edilir [23].



Şekil 5. AHS yöntemi işlem akışı

4 Bulgular ve tartışma

Obruk duyarlılık haritasının oluşturulması için belirlenen her bir kriter ve alt kriterlerin ağırlıkları için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuş ve Microsoft Excel programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ana kriterler için ikili karşılaştırmalar matrisi Tablo 2'de verilmiştir. Bu matris, obruk duyarlılık konusunda uzman kişilerle yapılan görüşmeler ile oluşturulmuştur.

Tablo 2. İkili karşılaştırma matrisi

Kriterler	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Yükseklik (A)	1											
Eğim (B)	1/2	1										
Bakı (C)	1/3	1/2	1									
Drenajlara yakınlık (D)	1	2	4	1								
Litoloji (E)	7	9	9	6	1							
Faylara yakınlık (F)	5	7	8	5	1/2	1						
Geçirgenlik (G)	4	5	6	3	1/2	1/2	1					
Su yüzeylerine yakınlık (H)	1	1	2	1	1/9	1/8	1/5	1				
Yer altı suyu değişimi (I)	6	8	8	5	1	1	2	8	1			
Kuyu yoğunluğu (J)	5	6	7	4	1/2	1	2	6	1	1		
Arazi kullanımı (K)	1	2	3	1	1/6	1/3	1/2	2	1/5	1/4	1	
Yağış (L)	3	4	5	2	1/3	1/2	1	5	1/2	1/2	2	1

Yapılan ikili karşılaştırmanın tutarlı olup olmadığının anlaşılabilmesi için tutarlılık analizi yapılmış ve hesaplamalar sonucu; Tutarlılık Vektörü Ortalaması (TVO) = 12.3088, Tutarlılık İndeksi (Tİ) = 0.0281, Tutarlılık Oranı (TO) = 0.0190 olarak hesaplanmıştır. TO 0.10'dan küçük olduğu için yapılan karşılaştırmaların tutarlı olduğu anlaşılmış ve kriterlere ait ağırlık değerleri hesaplanmıştır (Tablo 3). Analizler sonucunda, litoloji, yer altı suyu değişimi, faylara yakınlık ve kuyu yoğunluğu kriterlerinin obruk duyarlılık haritasının oluşturulmasında daha etkili oldukları tespit edilmiştir.

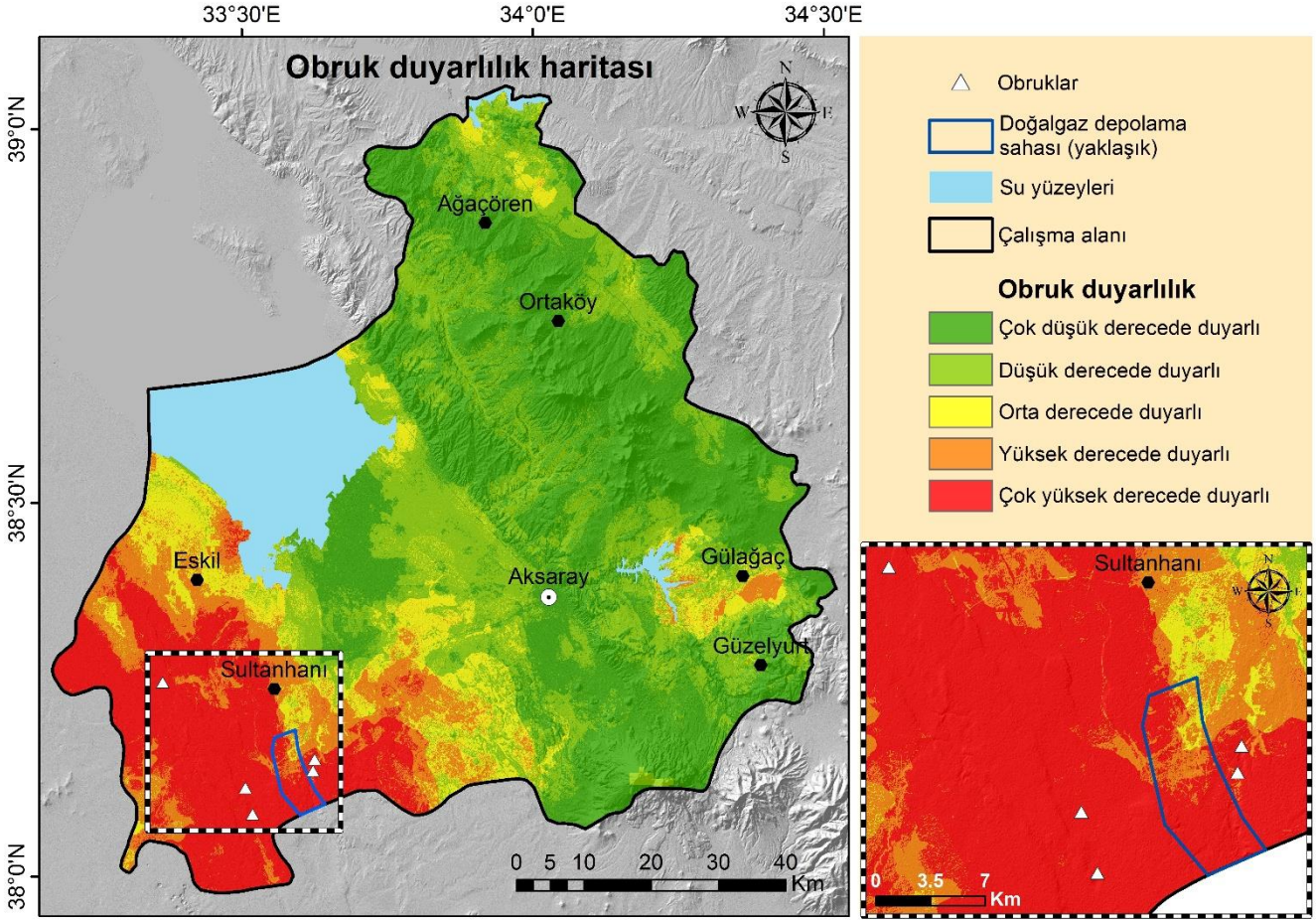
Bölüm 3.1'de belirtilen tüm veriler toplandıktan sonra, her bir kriter ArcGIS 10.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Drenaj, fay ve su yüzeyleri verilerine yakınlık analizi Öklid uzaklık analiziyle, Kuyu yoğunluğu Ters Mesafe Ağırlıklı Enterpolasyon yöntemi ile oluşturulmuştur. Daha sonra tüm kriterler 20 m çözünürlükte raster formata dönüştürülmüştür. Kriterler için oluşturulan bu raster veriler, AHS ile hesaplanan ve Tablo 4'te verilen ağırlık değerlerine göre yeniden sınıflandırılmıştır.

Tablo 3. Kriter ağırlıkları.

Kriterler	Ağırlıklar
Yükseklik	0.031
Eğim	0.021
Bakı	0.015
Drenajlara yakınlık	0.036
Litoloji	0.207
Faylara yakınlık	0.145
Geçirgenlik	0.091
Su yüzeylerine yakınlık	0.023
Yer altı suyu değişimi	0.165
Kuyu yoğunluğu	0.139
Arazi kullanımı	0.047
Yağış	0.080

Tablo 4. Kriter alt sınıflarına ait ağırlıklar.

Kriterler	Alt kriterler	Ağırlıklar	Kriterler	Alt kriterler	Ağırlıklar
Yükseklik	874-1029	0.321	Geçirimsizlik	Geçirimli	0.547
	1029-1163	0.254		Geçirimsiz	0.105
	1163-1316	0.174		Yarı Geçirimli	0.348
	1316-1586	0.129	Arazi kullanımı	Orman alanlar	0.019
	1586-2127	0.081		Su yüzeyleri	0.000
2127-3297	0.041	Sulak alanlar		0.047	
0.00-2.53	0.343	Tarım alanlar		0.414	
2.53-5.55	0.241	Yerleşim yerleri		0.084	
Eğim	5.55-9.60	0.171	Çayır/Mera alanlar	0.234	
	9.60-15.15	0.135	Çıplak alanlar	0.202	
	15.15-23.47	0.074	Yağış	27-30	0.028
	23.47-64.35	0.036		30-33	0.042
Bakı	Düz	0.033		33-36	0.087
	Kuzey	0.021		36-39	0.178
	Kuzeydoğu	0.068		39-42	0.264
	Doğu	0.232	42-49	0.401	
	Güneydoğu	0.265	Su yüzeylerine yakınlık	0-1000	0.316
Güneydoğu	0.171	1000-2000		0.287	
Güneybatı	0.131	2000-3000		0.194	
Batı	0.051	3000-4000		0.098	
Kuzeybatı	0.028	4000-5000		0.072	
Drenajlara yakınlık	0-1000	0.338	>5000	0.033	
	1000-2000	0.304	Kuyu yoğunluğu	0-0.30	0.023
	2000-3000	0.215		0.30-0.93	0.040
	3000-4000	0.068		0.93-1.76	0.071
	4000-5000	0.052		1.76-3.02	0.158
>5000	0.023	3.02-4.95		0.287	
Litoloji	Alüvyon	0.286	4.95-8.48	0.421	
	Metamorfik kayalar	0.079	Yer altı suyu değişimi	0-(-5)	0.012
	İnsuyu formasyonu	0.421		(-5)-(-10)	0.024
	Sedimanter kayalar	0.148		(-10)-(-20)	0.054
Magmatik kayalar	0.066	(-20)-(-30)		0.154	
0-2000	0.393	(-30)-(-40)		0.304	
Faylara yakınlık	2000-4000	0.254	>(-40)	0.452	
	4000-6000	0.151			
	6000-8000	0.114			
	8000-10000	0.061			
	>10000	0.027			



Şekil 6. Aksaray ili obruk duyarlılık haritası

Son olarak yeniden sınıflandırılan bu 12 raster harita, WLC analizi kullanılarak birleştirilmiş ve uygunluk indeks haritası üretilmiştir (Şekil 6). Oluşturulan bu uygunluk indeks haritasındaki pikseller, uygunluk derecesini gösteren 0 (çok düşük duyarlı) ile 1 (çok yüksek duyarlı) arasında değerlere sahiptir. Uygunluk haritası Doğal Kırıklar (Natural Break) sınıflandırma yöntemi ile çok düşük derecede duyarlı, düşük derecede duyarlı, orta derecede duyarlı, yüksek derecede duyarlı ve çok yüksek derecede duyarlı olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Elde edilen bu haritaya göre, çalışma bölgesinin %40.99'u çok düşük derecede duyarlı, %25.53'ü düşük derecede duyarlı, %9.97'si orta derecede duyarlı, %9.12'si yüksek derecede duyarlı ve %14.40'ı ise çok yüksek derecede duyarlı olarak hesaplanmıştır. Arazi çalışması ile tespit edilen obrukların tamamının çok yüksek derecede duyarlı alanlarda olduğu görülmektedir. Dolayısı ile çok az ve yetersiz sayıda obruk envanteri olmasına rağmen yapılan çalışmanın kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğu söylenebilir. Sarı vd. [17] KKH'nın bir bölümünde yapmış oldukları obruk duyarlılık haritalama çalışmasında Aksaray ilinin sadece Güney Batı kısmı yer almaktadır. İlgili çalışmada orta ve yüksek derecede duyarlı alanlar, bu çalışmada çok yüksek derecede duyarlı olan alanlar olarak belirlenmiştir. Sarı vd. [17]'nin yapmış oldukları çalışmada obruklara yakınlık yüksek ağırlık

değerine sahip önemli bir kriter olarak değerlendirilmiş ve ilgili çalışmada Aksaray ili içerisinde bulunan obruklar envanterlerinde yer almamaktadır. Bu nedenle aynı bölgenin iki çalışmada farklı duyarlılık derecesine sahip olduğu düşünülmektedir.

Bölgede belirlenen beş adet obruk oluşumlarının tamamının İnsuyu formasyonunda, yer altı suyunun ciddi derecede azaldığı ve kuyu yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde meydana geldiği tespit edilmiştir. Kireçtaşı, killi kireçtaşı, marn ve karbonatlı kilttaşları barındırmasından dolayı İnsuyu formasyonu obruklaşmaya oldukça duyarlıdır. Ayrıca bu bölgelerdeki yüzeylerin geçirimli olması obruk duyarlılığını daha da artırmaktadır.

Aksaray il ekonomisi genel olarak tarıma ve hayvancılığa dayalıdır ve il nüfusunun yaklaşık %70'i tarım ile uğraşmaktadır. İldeki tarımsal faaliyetlerin yaklaşık %30'u ise Eski ve Sultanhanı ilçelerinde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda özellikle jeolojik yapısı obruklaşmaya müsait olan alanlar başta olmak üzere, yüksek duyarlı alanlarda yapılan tarımsal faaliyetlerin bir an önce kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu bölgelerde tarımsal ürün seçiminde sulu tarım ürünlerinin yerine susuz tarım ürünlerinin tercih edilmesi önemlidir. Aksi takdirde yer altı su seviyesinin daha da azalması ile obrukların sayısının gitgide artacağı ve tarımsal faaliyetlere engel olacağı düşünülmektedir.

Ülkemiz açısından oldukça önemli bir proje olan Tuz Gölü Doğal Gaz Yer Altı Depolama Sahası'nın büyük bir kısmı çalışma bölgesinde yer almaktadır. Şekil 6'da sunulan haritaya bakıldığında bölgede meydana gelen obrukların bu depolama sahasına oldukça yakın olduğu görülmektedir (yaklaşık 500 m). Ayrıca üretilen duyarlılık haritasına göre yaklaşık olarak çizilen depolama sahası genel olarak obruk açısından çok yüksek derecede duyarlı alanlara denk gelmektedir. Bu kapsamda bölgede daha detaylı çalışmaların yapılarak gerekli olması durumunda ciddi önlemlerin alınması oldukça önemlidir. Sahada meydana gelecek bir obruk olayının önemli can ve mal kaybına neden olacağı düşünülmektedir.

5 Sonuç ve öneriler

Bu çalışmanın amacı Aksaray ili obruk duyarlılık haritasının oluşturulmasıdır. Bu amaçla, CBS ve AHS yöntemleri entegre edilerek etkin ve hızlı değerlendirme yapılabilen bir ÇKKV modeli geliştirilmiştir. Çalışma alanının özelliklerine ve konu ile ilgili uzman görüşlerine göre 12 kriter seçilmiştir. Her bir kriter ve kriter alt sınıflarının ağırlıkları uzman görüşleri alınarak hesaplanmış ve birleştirme analizi ile obruk duyarlılık haritası oluşturulmuştur. Uygunluk haritası çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek derecede duyarlı olmak üzere 5 sınıfa ayrılmıştır. Bu sonuçların yöneticiler ve karar vericiler tarafından da makul ve uygulanabilir olarak kabul edilebileceği düşünülmektedir. Bu ve benzeri afet duyarlılık çalışmalarının tüm toplumu etkileyeceği düşünüldüğünde özellikle kullanılacak kriterler son derece dikkatli bir şekilde ve uzman kişilerce belirlenmelidir. Ayrıca kullanılan kriterlerin doğruluğu sonuç haritasının doğruluğunu ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Gelecekte yapılacak bu ve benzeri çalışmaların başarılı olabilmesi ve bu çalışmaların ulusal ölçekte yapılabilmesi için kullanılacak faktör ve verilere ilişkin standartların geliştirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada görüşleri ile destek sağlayan uzmanlara, çalışmaya verdikleri destek için Aksaray İl Afet ve Acil Durum (AFAD) Müdürlüğü ile İl Özel İdaresi'ne ve ayrıca makaleye yapıcı yorumları ile katkıda bulunan hakemlere ve editöre teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %18

Kaynaklar

[1] F. Gutiérrez, M. Parise, J. De Waele and H. Jourde, A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61–88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.
[2] K. Taheri, T. M. Missimer, H. Mohseni, M. D. Fidelibus, M. Fathollahy and M. Taheri, Enhancing spatial prediction of sinkhole susceptibility by mixed waters geochemistry evaluation: application of ROC

and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 80 (14), 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09763-8>.
[3] E. Bruno, D. Calcaterra and M. Parise, Development and morphometry of sinkholes in coastal plains of Apulia, southern Italy. Preliminary sinkhole susceptibility assessment. *Engineering Geology*, 99, (3–4), 198–209, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.017>.
[4] F. Gutiérrez, Sinkhole Hazards. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*, 2016. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.40>.
[5] S. T. Kidanu, N. L. Anderson and J. D. Rogers, Using GIS-based spatial analysis to determine factors influencing the formation of sinkholes in Greene County, Missouri. *Environmental and Engineering Geoscience*, 24 (3), 251–261, 2018. <https://doi.org/10.2113/eeg-2014>.
[6] A. B. Tihansky, Sinkholes, west-central Florida. in: D. R. Galloway, Devin, Jones and S. E. Ingebritsen (Eds.), *Land subsidence in the United States*, U.S. Geological Survey Circular, pp. 121–140, Florida, 1999.
[7] Y. J. Kim, B. H. Nam, Y. H. Jung, X. Liu, S. Choi, D. Kim and S. Kim, Probabilistic spatial susceptibility modeling of carbonate karst sinkhole. *Engineering Geology*, 306, 106728, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106728>.
[8] R. Bozyiğit ve T. Tapur, Konya ovası ve çevresinde yeraltı sularının obruk oluşumlarına etkisi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21, 137–155, 2009.
[9] G. Günay, İ. Çörekçioğlu, S. O. Eroskay and G. Övül, Konya Karapınar Obruks (Sinkholes) of Turkey. in: B. Andreo, F. Carrasco, J. Durán and J. LaMoreaux, (Eds.), *Advances in Research in Karst Media*. *Environmental Earth Sciences*, Springer, Heidelberg, pp. 367–372, 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12486-0_57.
[10] C. Gezgin, The influence of groundwater levels on land subsidence in Karaman (Turkey) using the PS-InSAR technique. *Advances in Space Research*, 70 (11), 3568–3581, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.003>.
[11] K. Törk, B. Erduran ve P. N. Yılmaz, Konya Havzası'nda karstik çöküntü alanlarının belirlenmesi ve tehlike değerlendirmesi. *MTA Raporu*, Konya, Türkiye, Ocak 2013.
[12] M. Yılmaz, Karapınar çevresinde yeraltı suyu seviye değişimlerinin yaratmış olduğu çevre sorunları. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 145–163, 2010. https://doi.org/10.1501/csaum_0000000033.
[13] A. Üstün, E. Tuşat, S. Yalvaç, İ. Özkan, Y. Eren, A. Özdemir, İ. Ö. Bildirici, T. Üstüntaş, O. S. Kırtıloğlu, M. Mesutoğlu, S. Doğanalp, F. Canaslan, R. A. Abbak, N. B. Avşar and F. F. Şimşek, Land subsidence in Konya Closed Basin and its spatio-temporal detection by GPS and DInSAR. *Environmental Earth Sciences*, 73, 6691–6703, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3890-5>.

- [14] A. Ozdemir, Sinkhole susceptibility mapping using logistic regression in Karapınar (Konya, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75 (2), 681–707, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0778-x>.
- [15] F. Caló, D. Notti, J. P. Galve, S. Abdikan, T. Görüm, A. Pepe and F. Balik Şanlı, Dinsar-Based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote sensing*, 9(1), 83. 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9010083>.
- [16] O. Orhan, M. Yakar and S. Ekerin, An application on sinkhole susceptibility mapping by integrating remote sensing and geographic information systems. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (17), 1–17, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05841-6>
- [17] F. Sari, M. Kahveci, M. Somay-Altas and E. Tuşat, Evaluating sinkhole formation with multicriteria decision analysis: a case study in Karapınar-Konya, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (4), 1–15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06560-2>
- [18] V. Demir, Trend analysis of lakes and sinkholes in the Konya Closed Basin, in Turkey. *Natural Hazards*, 112 (3), 2873–2912, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05327-6>
- [19] J. P. Galve, F. Gutiérrez, J. Remondo, J. Bonachea, P. Lucha and A. Cendrero, Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*, 111 (3–4), 160–172, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.04.017>.
- [20] B. Pradhan, S. Mansor, S. Pirasteh and M. F. Buchroithner, Landslide hazard and risk analyses at a landslide prone catchment area using statistical based geospatial model. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (14), 4075-4087. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.484433>.
- [21] K. Taheri, H. Shahabi, K. Chapi, A. Shirzadi, F. Gutiérrez and K. Khosravi, Sinkhole susceptibility mapping: A comparison between Bayes-based machine learning algorithms. *Land Degradation and Development*, 30 (7), 730-745. 2019. <https://doi.org/10.1002/ldr.3255>.
- [22] S. I. Elmahdy, M. M. Mohamed, T. A. Ali, J. E. D. Abdalla and M. Abouleish, Land subsidence and sinkholes susceptibility mapping and analysis using random forest and frequency ratio models in Al Ain, UAE. *Geocarto International*, 37 (1), 315-331, 2020. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1716398>.
- [23] J. Malczewski, GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (7), 703-726, 2006. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
- [24] L. Ayalew and H. Yamagishi, The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65 (1–2), 15–31, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>.
- [25] H. R. Pourghasemi, B. Pradhan and C. Gokceoglu, Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards*, 63 (2), 965–996, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>.
- [26] T. Kavzoglu, E. K. Sahin and I. Colkesen, Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides*, 11 (3), 425–439, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0391-7>
- [27] O. Orhan, S. S. Bilgilioğlu, Z. Kaya, A. K. Ozcan and H. Bilgilioğlu, Assessing and mapping landslide susceptibility using different machine learning methods. *Geocarto International*, 37 (10), 2795-2820, 2020. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837258>.
- [28] M. Tiryaki and O. Karaca, Flood susceptibility mapping using GIS and multicriteria decision analysis: Sarıcaç-Çanakkale (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (14), 2018. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3675-3>
- [29] R. Abedi, R. Costache, H. Shafizadeh-Moghadam and Q. B. Pham, Flash-flood susceptibility mapping based on XGBoost, random forest and boosted regression trees. *Geocarto International*, 37(19), 5479-5496, 2021. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1920636>.
- [30] H. E. Aydın and M. C. Iban, Predicting and analyzing flood susceptibility using boosting-based ensemble machine learning algorithms with SHapley Additive exPlanations. *Natural Hazards*, 1–35, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05793-Y>.
- [31] K. Hepdeniz and O. Cengiz, GIS-Based avalanche susceptibility mapping for Davraz Mountain, Isparta, Turkey. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 9 (1), 62–68, 2019. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v9i1.1217>.
- [32] H. Akay, Spatial modeling of snow avalanche susceptibility using hybrid and ensemble machine learning techniques. *Catena*, 206, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105524>.
- [33] N. Varol, Avalanche susceptibility mapping with the use of frequency ratio, fuzzy and classical analytical hierarchy process for Uzungol area, Turkey. *Cold Regions Science and Technology*, 194, 103439, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103439>.
- [34] F. Sari, Forest fire susceptibility mapping via multicriteria decision analysis techniques for Muğla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Forest Ecology and Management*, 480, 118644, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118644>.
- [35] M. C. Iban and A. Sekertekin, Machine learning based wildfire susceptibility mapping using remotely sensed fire data and GIS: A case study of Adana and Mersin provinces, Turkey. *Ecological Informatics*, 69, 101647, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.econinf.2022.101647>.
- [36] K. Taheri, K., Gutiérrez, F., Mohseni, H., Raeisi, E. and M. Taheri, Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude-frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran. *Geomorphology*, 234, 64–79, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.005>.

- [37] P. Subedi, K. Subedi, B. Thapa and P. Subedi, Sinkhole susceptibility mapping in Marion County, Florida: Evaluation and comparison between analytical hierarchy process and logistic regression based approaches. *Scientific Reports*, 9 (1), 1–18, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43705-6>.
- [38] D. AlSanea and W. Abdullah, Sinkhole susceptibility hazard mapping using analytical hierarchy process and GIS tools for the State of Kuwait. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7(3), 04021029, 2021. <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001136>.
- [39] A. Ozdemir, Sinkhole susceptibility mapping using a -frequency ratio method and GIS technology near Karapınar, Konya-Turkey. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 502–506, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.059>.
- [40] T. M. Tharp, Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity. *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst*, 9, 110–123, 2003. [https://doi.org/10.1061/40698\(2003\)9](https://doi.org/10.1061/40698(2003)9).
- [41] K. He, C. Liu, and S. Wang, Karst collapse related to over-pumping and a criterion for its stability. *Environmental Geology*, 43 (6), 720–724, 2003. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0669-x/metrics>.
- [42] T. M. Tharp, Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology*, 52 (1–2), 23–33, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00051-9).
- [43] H. J. Oh, M. Syifa, C. W. Lee, and S. Lee, Land subsidence susceptibility mapping using bayesian, functional, and meta-ensemble machine learning models. *Applied Sciences*, 9 (6), 1248, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9061248>.
- [44] S. Bianchini, P. Confuorto, E. Intrieri, P. Sbarra, D. Di Martire, D. Calcaterra and R. Fanti. Machine learning for sinkhole risk mapping in Guidonia-Bagni di Tivoli plain (Rome), Italy. *Geocarto International*, 1-29, 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2113455>.
- [45] G. Bausilio, M. Annibali Corona, D. Di Martire, L. Guerriero, R. Tufano, D. Calcaterra, M. Di Napoli and M. Francioni, Comparison of two machine learning algorithms for anthropogenic sinkhole susceptibility assessment in the city of Naples (Italy). in: R. Lancellotta, C. Viggiani, A. Flora, F. de Silva, L. Mele (Eds.), *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III*, CRC Press, London, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003308867-88>.
- [46] M. T. J. Terlien, C. J. Van Westen and T. W. J. van Asch, Deterministic modelling in GIS based landslide hazard assessment. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, 57–77, 1995. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8404-3_4.
- [47] M. Ercanoglu and C. Gokceoglu, Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75 (3–4), 229–250, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.001>.
- [48] S. S. Bilgilioğlu, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci ile elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (1), 165–174, 2022. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1013244>.
- [49] A. M. C. Şengör, Y. Yılmaz and O. Sungurlu, Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: Nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys. *Geological Society*, 17 (1), 77–112, 1984. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1984.017.01.04>.
- [50] Y. Mustafa, A. Yıldız, A. Kahya ve S. Gürcan, Kızılkaya (Sevinçli / Aksaray) ignimbiritinin jeolojisi ve yapıtaşı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 30 (1), 1–8, 2014.
- [51] İ. Seymen, Kaman (Kirsehir) dolayında Kirsehir Masifinin metamorfizması. *Türkiye Jeoloji Kurultayı 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı, İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 12-16, 1981.
- [52] İRAP, İl Risk Azaltma Planı. AFAD Planlama ve Risk Azaltma Dairesi, Aksaray, 2021.
- [53] Ü. Ulu, H. Öcal, A. K. Bulduk, M. Karakaş, A. Arbas, L. Saçlı ve M. Karabıyıkoglu, Cihanbeyli-Karapınar yöresi geç Senozoyik çökeltme sistemi: Tektonik ve iklimsel önemi. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 9, 149-163, 1994
- [54] M. Dönmez and A. E. Akçay, 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No: 51, Aksaray L31 paftası, 2005.
- [55] M. Dönmez and A. E. Akçay, 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, No: 50, Aksaray L30 paftası, 2005.
- [56] K. Türk, N. P. Yılmaz, S. Sülükçü, S. Keleş, Ş. Köklü, L. S. Yeleser, Z. R. Aykaç Özerk, C. Acar, F. Savaş, K. Çakır ve K. Avcı, Konya Ovası Projesi (KOP) bölgesinde (Konya, Karaman, Aksaray, Niğde) karstik çöküntü alanlarının belirlenmesi ve tehlike değerlendirmesi projesi (Final Raporu). MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 263, Ankara, 2019
- [57] MTA, 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası serisi, 2005.
- [58] C. GezgİN, İ. Tiryakioğlu, S. Ekercin ve E. Gürbüz, Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ) güney kesimine ait tektonik hareketlerin GNSS gözlemleri ile izlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (3), 456–464, 2020. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.690886>.
- [59] B. B. Tekocak Yardımlı, Aksaray ili yer altı su kaynaklarının hidrojeokimyasal özelliklerinin coğrafi bilgi sistemi kullanılarak değerlendirilmesi. *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2017.
- [60] Ş. Tulun, E. Gürbüzü and T. Arsu, Developing a GIS-based landfill site suitability map for the Aksaray province, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80 (8), 1–15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09598-3/figures/12>.
- [61] D. Zanaga et al., ESA WorldCover 10 m 2021 v200, 2022. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7254221>.

- [62] I. Yilmaz, GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: A case study from Sivas basin (Turkey). *Engineering Geology*, 90, 1–2, 89–103, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.12.004>.
- [63] K. Rawal, Exploring the geomechanics of sinkholes: a preliminary numerical study. PhD Thesis, University of Toledo, USA, 2016.
- [64] A. M. S. Pradhan and Y. T. Kim, Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: A case study in Deokjeok-ri Creek, South Korea. *Natural Hazards*, 72 (2), 1189–1217, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1065-z>.
- [65] D. Whitman, T. Gubbels and L. Powell, Spatial interrelationships between lake elevations, water tables, and sinkhole occurrence in Central Florida: A GIS approach. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 65 (10), 1169–1178, 1999.
- [66] D. H. Doctor and K. Z. Doctor, Spatial analysis of geologic and hydrologic features relating to sinkhole occurrence in Jefferson County, West Virginia. *Carbonates and Evaporites*, 27 (2), 143–152, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13146-012-0098-1>
- [67] K. Z. Doctor, D. H. Doctor, B. Kronenfeld, D. W. S. Wong and D. K. Brezinski, Predicting sinkhole susceptibility in Frederick Valley, Maryland using geographically weighted regression. In: L. B. Yuhr, E. C. Alexander and B. F. Beck, *Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, ASCE, pp. 243–256, Virginia, 2008. [https://doi.org/10.1061/41003\(327\)24](https://doi.org/10.1061/41003(327)24).
- [68] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process (AHP) for decision making*, 1980.
- [69] M. Uyan ve Ş. Yalpir, Çok Kriterli Karar Verme modeli ve CBS entegrasyonu ile tıbbi atık sterilizasyon tesislerinin yer seçimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 642–654, 2016. <https://doi.org/10.1186/S40064-015-1404-X>.
- [70] S. S. Bilgilioğlu, Land suitability assessment for Olive cultivation using GIS and multi-criteria decision-making in Mersin City, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 (22), 1–16, 2021. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-08768-8>.
- [71] S. S. Bilgilioğlu, Site selection for radioactive waste disposal facility by GIS based multi criteria decision making. *Annals of Nuclear Energy*, 165, 108795, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108795>.
- [72] S. S. Bilgilioğlu ve C. Gezgin, Nevşehir ili uygun katı atık depolama sahalarının Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHS) yöntemlerinin entegrasyonu ile belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (4), 836–849, 2022. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1105426>.
- [73] F. Bunyan Unel and S. Yalpir, Valuations of building plots using the AHP method, *International Journal of Strategic Property Management*, 23 (3), 197–212, 2019. <https://doi.org/10.3846/IJSPM.2019.7952>.





Spatio-temporal change detection of built-up areas with Sentinel-1 SAR data using random forest classification for Arnavutköy Istanbul

Sentinel-1 verilerine rastgele orman sınıflandırma yaparak İstanbul Arnavutköy için yapılaşma alanlarının konumsal ve zamansal değişiminin tespiti

Hasan Bilgehan Makineci^{1,*} 

¹ Konya Technical University, Geomatics Engineering Department, 42130, Konya, Türkiye

Abstract

As one of the most populated cities in Türkiye and the world, the Istanbul metropolis has always attracted the crowd of people masses. Arnavutköy Town has become one of the critical points of Istanbul City with increasing built-up areas (BAs). The spatial-temporal change detection of the expansion of the BAs of this district is essential data on behalf of Istanbul City. This research aims to determine urban areas expansion zones, also defined as the BAs footprint, from Sentinel-1 radar data. The determination of Sentinel-1A data of the urban area change detection encountered in Arnavutköy Town between 2018-2021 with Random Forest (RF) classification machine learning algorithm is investigated in this study. Based on the changes in spatial-temporal data, the direction of urban development has been determined. In addition, to visually compare the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) and optical Sentinel-2A's false color urban RGB composite, which is a distinct data format, the processes have been proved. As a result of the study, SAR satellite data was found to be more appropriate than optical satellite data since not being affected by atmospheric conditions for extracting BAs with remotely sensed data.

Keywords: Built-up areas extraction; Change detection, NDBI, Sentinel-1A, Random forest classification

1 Introduction

The world population has been migrating heavily to big cities for the last fifty years [1, 2]. Significant metropolises such as Tokyo, London, Los Angeles, and Istanbul are exposed to international migration from the surrounding provinces and regular/irregular migrants. Urbanization is increasing fast since living conditions are better than in rural areas, and there are more job opportunities. As a result, unplanned settlements occur in megacities, so forest areas, consumable water resources, and natural habitats of different species are under threat [3, 4]. Local municipalities and governments' decision-making mechanisms should focus on megacities' sustainable and logical urban development, and these should be one of the most critical issues [5].

It is known that collecting detailed information in an appropriate way on Built-up Areas (BAs) is fundamental for

Öz

Türkiye'nin ve dünyanın en kalabalık şehirlerinden biri olan İstanbul, her zaman kitleler halinde insanları kendine çekmiştir. Arnavutköy, artan Yapılaşma Alanları (YA'lar) ile İstanbul şehrinin kritik ilçelerinden biri haline gelmiştir. Bu ilçenin YA'larının genişlemesinin konumsal ve zamansal değişiminin tespiti, İstanbul adına önemli bir ihtiyaçtır. Bu çalışma, Sentinel-1 radar verilerinden YA ayak izi olarak da tanımlanan kentsel alanların genişleme bölgelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, 2018-2021 yılları arasında Arnavutköy Kasabasında karşılaşılan kentsel alan değişim tespitinin Sentinel-1A verilerinden makine öğrenmesi algoritması olan Rastgele Orman (RO) sınıflandırıcısı ile belirlenmesi incelenmiştir. Konumsal-zamansal verilerde yaşanan değişimlerden yola çıkarak, kentsel gelişimin yönü belirlenmiştir. Ayrıca, Normalize Fark Yapı İndeksi (NDBI) ve Sentinel-2A yalancı renkli RGB kompoziti görsel olarak kullanılarak karşılaştırmalı olarak yapısal değişim kanıtlanmıştır. Çalışma sonucunda uzaktan algılanan verilerle YA'ların çıkarılması konusunda, SAR uydu verilerinin atmosferik koşullardan etkilenmediği için optik uydu verilerine göre daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapılaşma alanları çıkarımı; Değişim analizi, NDBI, Sentinel-1A, Rastgele orman sınıflandırması

getting precautions against natural hazards (e.g., earthquakes, tsunamis, etc.) response strategies [6, 7]. Earth observation with remote sensing technique is an essential instrument for obtaining data on the features and improvement of BAs. Compared with optical sensors, synthetic aperture radar (SAR) systems can preferably because that system works both day and night and under all weather conditions [8, 9]. This yields more substantial data in cloudy and rainy regions as opposed to optical images. The SAR applications concerning settlement change detection, population growth estimation, analyzing urban mapping and land-use patterns, and monitoring socioeconomic characteristics have been represented in many studies before [10, 11]. Although SAR data do not strongly extract information on all kinds of structures because of the complexity of evaluating BAs [12],

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hbmakineci@ktun.edu.tr (H. B. Makineci)
Geliş / Received: 12.11.2022 Kabul / Accepted: 17.03.2023 Yayınlanma / Published: 15.04.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1203301

improvements have been made in extracting civilized town areas with high-resolution SAR data [13]. Advantages have reviewed SAR-based BAs-extraction methods on outcomes with MachineLearning (ML) methods [10, 14, 15] such as support vector machine (SVM) [16], Artificial Neural Network (ANN) [17, 18], and Random Forest (RF) [19-22]. Some researchers have created an Urban Extractor to estimate SAR data for global urban mapping using a processing chain [23]. The defined workflow involves post-processing, which has many enhancements to an existing technique, and urban extraction based on spatial indices and Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM) textures [24]. As show the reliability of the modified technique, ENVISAT Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) C-VV data at 30 m resolution were selected over ten metropolitan areas and a rural area from six continents [25]. The results determine that the KTH-Pavia Urban Extractor expertly selects urban areas and small towns from ENVISAT ASAR data. Additionally, BAs may be accurately mapped at 30 m resolution with just one or two SAR data. However, the method takes a while to run when GLCM texture features are used. [26]. A study proposes a BAs extraction method that combines nighttime light images and point of interest (POI) data. With that approach, they use nighttime light data and POI data to extract BAs and use a mathematical morphology-based method to merge them [27]. Since POI data have relatively accurate location information and a high spatial correlation with BAs, the proposed fusion method overcomes low resolution and overflow problems found in extraction methods based solely on nighttime light data [28, 29].

Sentinel-1 allows for time-series observations by turning two satellites on 12-day repeated cycles for global data [30]. Sentinel-1 data have been used for BAs extraction, land cover classification [31-33], and forest monitoring [34]. Sentinel-1A data usually performs well on localized growth map production with C-B and wavelength. In addition to this, Sentinel-1A offers a unique possibility to develop a service for detecting BAs at a global scale with its freely available data [35]. Sentinel-1 time series data have been used in several kinds of research with hopeful outcomes for change detection [36, 37].

BAs extraction from optical multispectral (MSI) satellite data is a preferred method. Especially with the use of different indexes, change detection of urban areas from high-resolution remote sensing satellite data is one of the popular topics of recent years. Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) are the most commonly used indexes in the literature [38-40].

This study aimed to evaluate the applicability of a BAs extraction and change detection approach using multiple time-series observations of Sentinel-1A Single Look Complex (SLC) data based on an ML algorithm in the Arnavutköy Town of İstanbul City, Turkey. Change detection and Regional Growing (RG) models were created for each observation (from years between 2018 and 2021) of Sentinel-1 using a Random Forest algorithm (RF). Subsequently, BAs extraction at each pixel position was

detected using the estimated time series of change probabilities [41]. The process may not be entirely suitable for BAs extraction with a modest resolution, approximately 20-30 m SAR data. Moreover, surfaces in BAs are much more distinct in data with higher resolution than in data with 30 m resolution, so extracting BAs only on coherence can lower overall accuracy. In this research, to overcome that difficulty, additional spatial and vectorial construction features are introduced using Sentinel-1 SLC data from coherence with RF algorithm. This research aims to generate a sustainable and momentarily method from Sentinel-1 SLC SAR data on the extraction step for proper BAs outcomes. In addition, false color urban RGB composite obtained from optical Sentinel-2A, which is a different data type, and the NDBI were visually compared in order to verify the operations performed. Thus, rough errors were avoided, and it was determined that SAR satellite data was more suitable than optical satellite data (due to not being affected by atmospheric conditions). Also, to see and evaluate how the region will take shape in the future, the 1/100.000 scaled environmental plan of the European side of İstanbul has been digitised and used in practice and analysis. The success of the suggested approach was tested in the fast-growing settlement area Arnavutköy Town, İstanbul, over Türkiye, including a wide variety of natural environments (water bodies, natural forests, etc.) and structural building types (airport, factories, high-rise buildings, detached houses, etc.). The contribution of this research to the literature is to monitor uncontrolled BAs in critically important districts of metropolitan cities through temporal analyses with multiple SAR data. Another contribution is to assure that a robust algorithm such as RF gives high-accuracy results in classification and analyses reliable results.

2 Material and methods

In this section, the methods and materials applied in the rest of the research are mentioned.

2.1 Study area

The rapid growth of world-renowned metropolises is, such as İstanbul, contingent on the supply-demand balance. The sustainability of population growth is a challenging situation in limited land conditions. For this reason, agricultural areas, forest areas, etc., regions that do not concur with construction are forced to settle plans to respond to demands [4, 42].

İstanbul City has a transitional climate with temperate, subtropical, Mediterranean, and oceanic climates, according to the Köppen climatic classification. Separate microclimates can be found in the city because of its size, topography, and coastline that faces two different seas in the north and south. A temperate subtropical and oceanic climate with relatively high humidity occurs in the areas that make up the city's northern half, near the Black Sea and the coasts of the Bosphorus [43]. İstanbul experiences hot, humid summers and cool, rainy, and occasionally snowy winters. The air may feel colder than it actually is because of the humidity, which makes it warmer than it actually is. Rain and snow are typical winter weather, and temperatures range from 2 to 9 °C. The typical summertime highs are 18 to 28

°C, and flooding and rain are expected. The two hottest months, with an average temperature of 23 °C, are July and August. With an average temperature of 5 °C, January and February are the coldest months [44, 45].

Considering its climatic features and land use situation, Istanbul City is a city that is growing rapidly in terms of structure and where the construction is continuous except in the winter season. In the winter seasons, generally, when the construction is static, remote sensing data analysis is not perfectly appropriate due to meteorological events such as clouds, snowy lands, fog, and rain. The situation is almost the same, especially in Arnavutköy, as in Istanbul in general. Located in the west of Istanbul (known as the European Side), the district has the Black Sea Coast (Figure 1). The latest construction of the Great Istanbul Airport and the Canal Istanbul Project planned to be built in the future are in Arnavutköy Town.

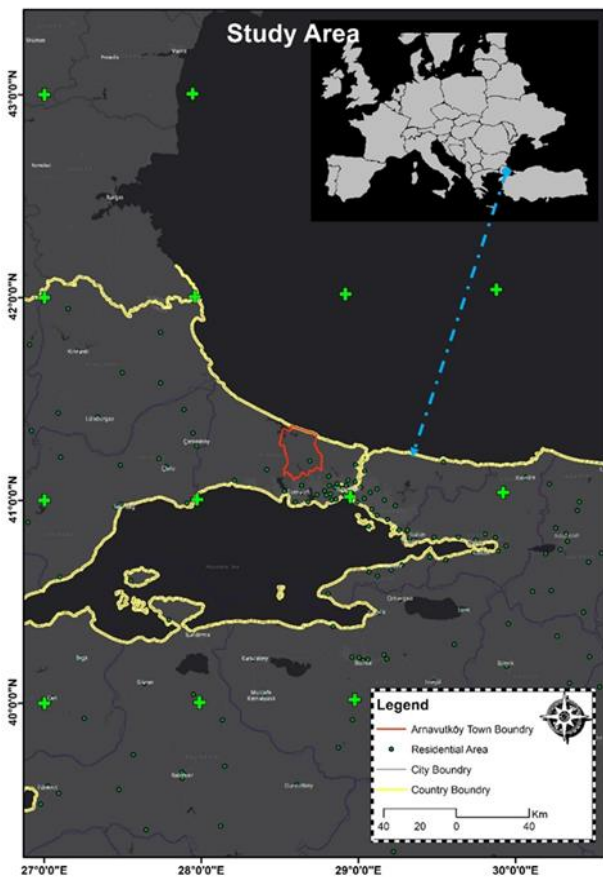


Figure 1. The study area of research (red lined area: Arnavutköy Town)

2.2 SAR data used in study

The sentinel-1 mission is made up of two polar-orbiting satellites that each carry a single C-band synthetic-aperture radar (SAR) sensor that can operate in four different acquisition modes with varied resolutions (down to 5 m) and coverage (up to 400 km). In this study, the Interferometric Wide Swath (IWS) mode products at Level-1 Single Look Complex (SLC) were preferred [33]. The IW swath mode acquires a 250 km swath for SLC products with a spatial

resolution of 5 to 20 meters. The wide-swath coverage is achieved using Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) [30]. This research presents a multi-temporal analysis, collecting data from February 2018 to April 2021 (Table 1). However, to achieve meaningful results with the same temporal baseline repeated coverage, only data derived from the Sentinel-1A within a twelve-day revisit time was considered. Since rapid urbanization in Arnavutköy Town, Istanbul, though the spatial resolution of the Sentinel-1 SAR data is not perfect for extracting urban footprint, the change of BAs detected in recent years cannot be disregarded. As a result, BAs can be considered fixed for all Sentinel-1 data obtained within a year. The Sentinel Open Access Hub has provided all of the Sentinel-1 data used in this research free of charge.

Table 1. The Sentinel-1 data specification

Acquisition Year	Acquisition Date	Temporal Baseline	Data Type
2018	26 February	12 Days	Sentinel-1A IW SLC
	10 March		
	22 March		
	03 April		
	15 April		
	27 April		
	09 May		
2019	21 February	12 Days	Sentinel-1A IW SLC
	05 March		
	17 March		
	29 March		
	10 April		
	22 April		
	04 May		
2020	11 March	12 Days	Sentinel-1A IW SLC
	23 March		
	04 April		
	16 April		
	28 April		
	10 April		
	22 May		
2021	03 June	12 Days	Sentinel-1A IW SLC
	17 January		
	29 January		
	10 February		
	22 February		
	06 March		
	18 March		
30 March			

11 April

Since Istanbul City is in the northern hemisphere, construction activities generally become stable during winter. Therefore, winter and spring months were preferred for the analysis of BAs change with SAR data in order to give more accurate results for the annual structural follow-up and change detection analysis. However, it cannot be said that winter, the beginning of spring, and the end of autumn are the perfect period for obtaining optical satellite imagery from a meteorological point of view. This primary feature that distinguishes SAR data from optical satellite data proves why the study was carried out with SAR data.

2.3 Methodology

Complex preprocessing procedures that use SNAP software from the ESA are necessary for the use and temporal analysis of SAR data. However, such techniques begin with the standard preprocessing carried out on Sentinel-1 output in order to obtain interferometric coherence [46, 47].

2.3.1 Preprocessing of Sentinel-1A data

Sentinel-1 SAR data has two polarizations (VH and VV). The output coherence data comprises two different raster files related to the other polarizations. At the workflow process (Figure 2), it was identified one of the three sub-swaths from the original data subsequently selected only those bursts that cover the study area. Then, it was determined the coherence estimation. Finally, the "Range-Doppler Terrain Correction" was used, which involves using a digital elevation model (DEM) automatically downloaded from the SRTM auto-download library, choosing WGS84-UTM 36N as the projected coordinate system and specifying 15 m as an average output resolution [10, 19, 31, 46, 48, 49].

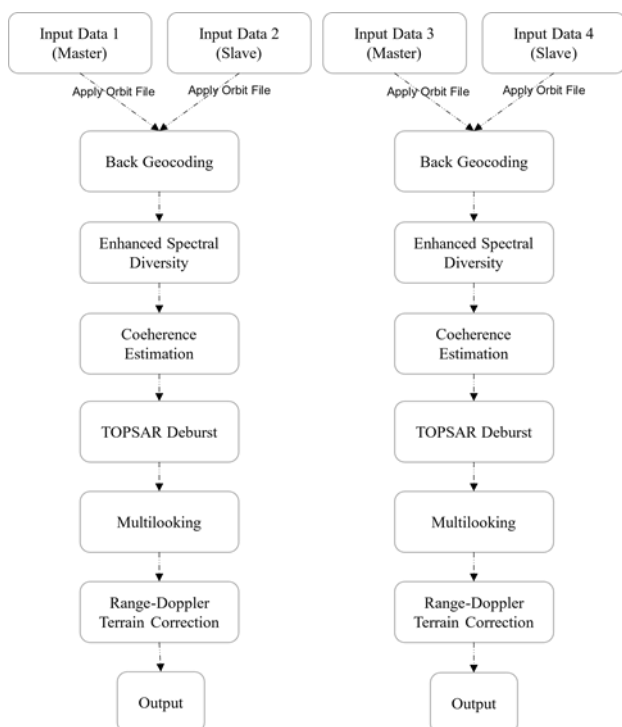


Figure 2. Workflow process of Sentinel-1A data on SNAP software

Using such a large number of SAR data increases the correlation between the data and the findings, helping to obtain more accurate results. On the other hand, the increased correlated findings obtained from SAR data provide high accuracy in classification with RF [50].

2.3.2 Built-up areas extraction and random forest algorithm

The RF algorithm has developed by combining the Bagging method [51] and the Random Subspace method. The basis of the algorithm is the evaluation of the predictions produced by multiple decision trees [52]. Each tree predicts a class, and the model prediction is the one that gets the most votes from the predicted classes. The RF algorithm consisting of 'n' trees is as in Figure 3.

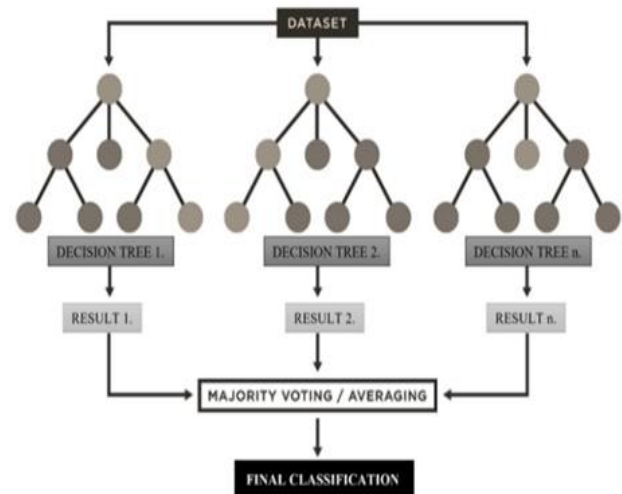


Figure 3. RF algorithm processing basics [51, 52]

In the supervised classification technique, the accuracy and the number of trees, nodes, branches, and leaves are directly proportional. In other words, the method's accuracy increases as the number of trees or other factors used in the method increases. On the contrary, the accuracy may decrease as the number of trees, and other factors decrease. Although RF and Decision Tree (DT) are similar in the algorithm, the main difference is that the formation of nodes and branches in RF occurs randomly. Therefore, as with other ML algorithms, some parameters must be determined beforehand to implement RF algorithm. These parameters are the number of trees to be created and the number of samples used in the node for each number of trees [3].

Sentinel-1A data became available for digitization after resampling at 15 m resolution. With this data, it is beneficial for extracting BAs to by applying supervised classification. The digitization process is defined as urban and non-urban in training and testing according to RF algorithm. Data set partitioning was preferred as 70% training set and 30% test set. According to the literature, the main reason for this preference is that the RF algorithm is shown as the training/test ratio with the highest success [18, 23, 51]. The

training dataset, together with the coherence estimated data, are presented in Figure 4.

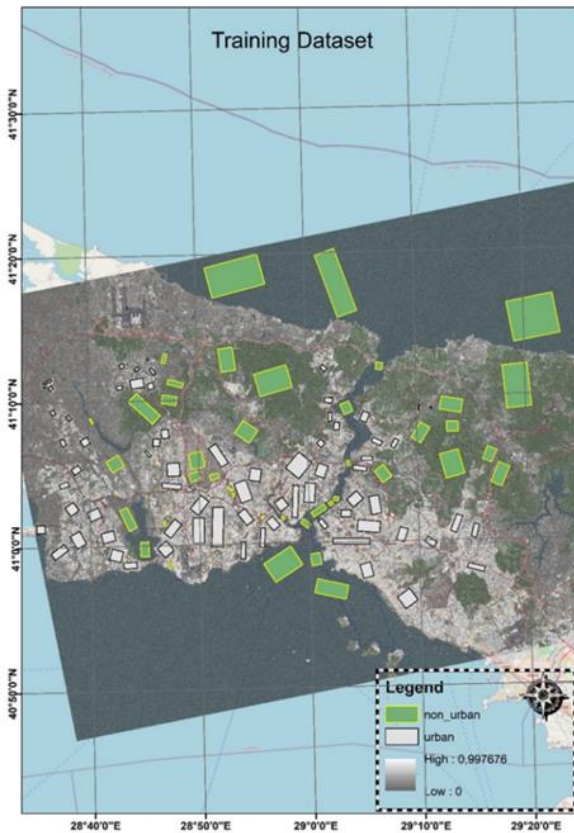


Figure 4. Training dataset of RF algorithm and coherence estimated processed data

2.3.3 Post-processing

After the training dataset of Sentinel-1 for all of Istanbul, the RF algorithm was started ideally. For RF testing, the algorithm was chosen the total samples as 1000 and the distribution of that samples as 50% Non-urban and 50% Urban area [19, 36, 52, 53, 54]. RF result conditions (Accuracy, Precision, Correlation, Error Rate, RMSE, Bias) for the 2018, 2019, 2020, and 2021 years are presented in Table 2. Indeed, the algorithm calculates those values by itself.

In order to list the general operations, first, Coherence Estimation data was obtained by using Sentinel-1A data for each year (divided into four masters and four slaves for each year). Next, urban and non-urban classes were created in the GIS software in order to classify the relevant data with RF. Then, training and testing processes were carried out with RF, and the results were revealed. Afterward, the generated

Table 2. Cross-validation assessments of RF for each year

Cross-validation (Number of Classes=2)	Accuracy (%)	Precision (%)	Correlation (%)	Error Rate (%)	RMSE (%)	Bias (%)	Year
Class 1 Non-urban	0.984	0.9734	0.9685	0.016	0.1265	-0.0112	2018
Class 2 Urban	0.984	0.9951	0.9685	0.016			
Class 1 Non-urban	0.9968	0.9956	0.9936	0.0032	0.0566	-0.0012	2019
Class 2 Urban	0.9968	0.998	0.9936	0.0032			
Class 1 Non-urban	0.9882	0.9841	0.9767	0.0118	0.1086	-0.0042	2020
Class 2 Urban	0.9882	0.9923	0.9767	0.0118			
Class 1 Non-urban	0.9976	0.996	0.9952	0.0024	0.049	-0.0016	2021
Class 2 Urban	0.9976	0.9992	0.9952	0.0024			

rasters were visualized in GIS software and combined with the 1/100.000 scaled environmental plan of the reserve building area of the European side of Istanbul. Finally, after the essential operations such as clip, reprojection, and map algebra, the outcome maps obtained were evaluated, and the results were collected.

2.3.4 Confirmation with Sentinel-2A data

On account of determining the accuracy of the findings obtained from the research, high-resolution (10 m spatial resolution) multispectral (MSI) optical satellite images were acquired with Sentinel-2A. Sentinel-2 MSI sensor satellite missions with 13 spectral bands on 443-2190nm range, 290km frame width and 10m spatial resolution (four visible and near-infrared bands NIR), 20m (red edge and shortwave infrared band SWIR), and 60m (three atmospheric correction bands) offer free access optical remote sensing data used for also used for BAs extraction. To overcome obstacles in measurement, inspection, and process-monitoring applications—often unattainable with conventional technologies—imaging systems employing SWIR and NIR wavelength bands offer unique distant sensing capabilities [38-40]. The high-resolution difference between SAR data and Sentinel-2A data has led to using optical multispectral images as ground-truth data and the investigation of the accuracy of analyzes made with SAR data. It was also an excellent opportunity to show that SAR data are typically less affected by atmospheric conditions since the periods when BAs footprints are investigated are from winter to spring. The acquisition dates of the most suitable optical satellite images obtained on the dates determined in this study are shown in Table 3.

Table 3. The Sentinel-2 data specification

Acquisition Year	Acquisition Dates	Data Type
2018	07 June 2018	MSI L2A
2019	03 May 2019	MSI L2A
2020	17 April 2020	MSI L2A
2021	12 May 2021	MSI L2A

BAs extraction was performed with False Color Urban RGB (B12-B11-B4 combination) Composite and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) from optical Sentinel-2 data. The NDBI is expressed as in Equation 1 [38].

$$NDBI = ((SWIR - NIR))/((SWIR + NIR)) \quad (1)$$

3 Results and discussion

As a result of ML, RMSE, and Bias values in Table 2 are within satisfactory limits as performing the RF algorithm [23, 51, 52, 53, 54]. The RF raster maps are imported into GIS software and made available for analysis. In this research, Arnavutköy Town boundaries were clipped in GIS software. The features and RF raster data in the boundaries of Arnavutköy Town obtained by digitizing the 1/100.000 scaled environmental plan of the reserve building area of the European side of Istanbul are combined and presented in a single display. The general workflow diagram representing these processes in order is presented in Figure 5. The resulting map produced and combined for each year subject to the research is seen in Figure 6.

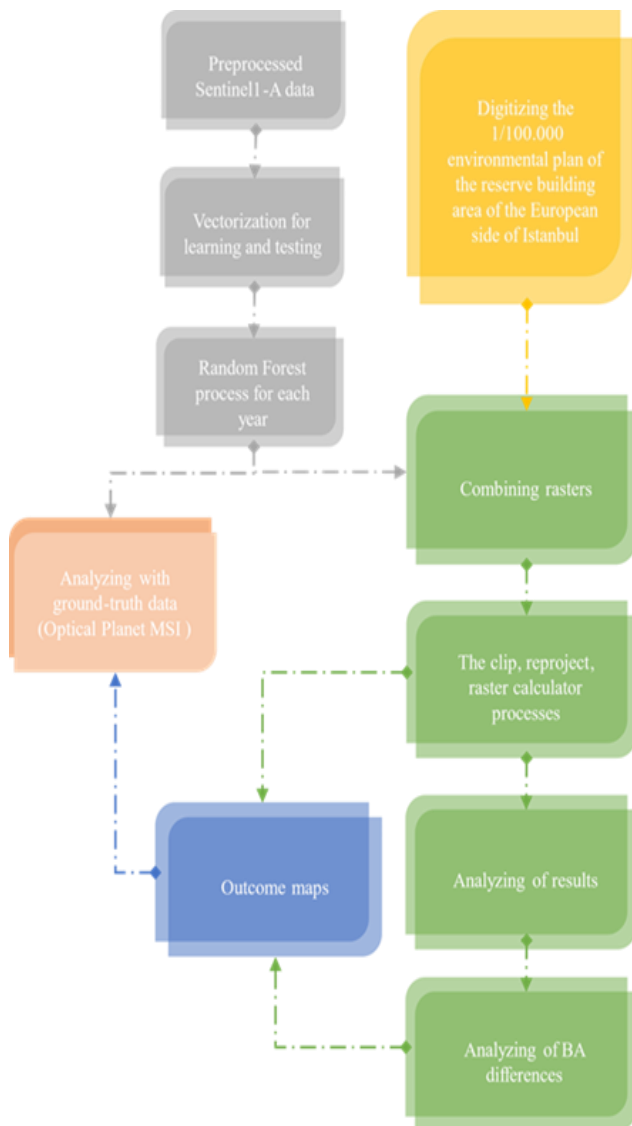


Figure 5. The workflow of research

To analyze the 15 m resampled RF raster maps, determining the differences between pixels was approved. This technique revealed the BAs differences in 2019, 2020, and 2021 by using 2018 as a basemap. As shown in Figure

7, where the differences are indicated, the constructed areas can be seen very clearly even with 15 m resolution data. The area converted as Arnavutköy Town boundaries in GIS software was calculated as 452 km². This area is expressed with a total of 2,013,721 pixels. While the RF raster map of 2018 is analyzed, it is related that the 696, and 122 pixel area is the BAs. Therefore, an additional BAs of 403,375 pixels was added in 2019. In addition, it has been determined that there are additional BAs in 2020 and 2021 with 536,490 and 553,284 pixels, respectively. The district's population was 270,549 in 2018, determined as 282,488 in 2019 and 296,709 in 2020. Since the population data is updated on 31 December of each year, the population information for 2021 is certainly not known. However, based on the annual population growth rate, approximately 310,000 are expected to live in the district in 2021 (Figure 7).

In 2018, BAs fields corresponded to 34.5% of the total area. However, with the increase in construction in 2019, the BAs was determined as 54.5% of the total area. Afterward, the increase continued in 2020 and 2021, and BAs were calculated as 61% and 62%, respectively.

Regions with more frequent BAs changes between 2018 and 2019 correspond to the north, northwest, and northeast regions of Arnavutköy Town center (Figure 8). This area, which can be defined as the neighborhood of Istanbul airport, has been opened for construction, especially for highways and the needs of the airport surroundings. Afterward, when examined between 2019 and 2020, the regions with more frequent BAs changes are the south of Arnavutköy Town center and its surroundings. Therefore, it is possible to say that the structuring for living people has increased, and the housing stock has caused the rise in BAs. Lastly, covering 2021 to 2020, the most frequently detected BAs changes are around the southwest, north, northeast, and east of Arnavutköy Town center.

In order to check the results, a visual evaluation was made with false color urban RGB composite, and the NDBI was obtained from Sentinel-2 optical data as a different data type (Figure 9). The Sentinel-2 data for 2018 is partially inaccurate due to cloud error, a common problem with optical satellite data. As seen in the URBAN RGB 2018 map in Figure 9, a part of the land can be detected due to cloud cover. Due to the higher spatial resolution of optical images, the areas with BAs are expected to be revealed more clearly. However, it can be seen when comparing Figure 8 and Figure 9 that SAR data is more successful in the BAs extraction process, thanks to the ability to receive day and night and not be affected by effects such as fog, cloud, and dust [38, 39].

As can be seen in Figure 7, Istanbul Airport initiates construction. Therefore, it would be relevant to state that the Kanal Istanbul project and the revised 1/100.000 scaled environmental plan of the reserve building area of the European side of Istanbul will increase with the construction of crowded human communities (from different nationalities) will come up to Arnavutköy Town. Just like in other towns of Istanbul, unplanned urbanization and irregular migration have been recognized as an urgent problem for Arnavutköy Town in the coming years [4, 42].

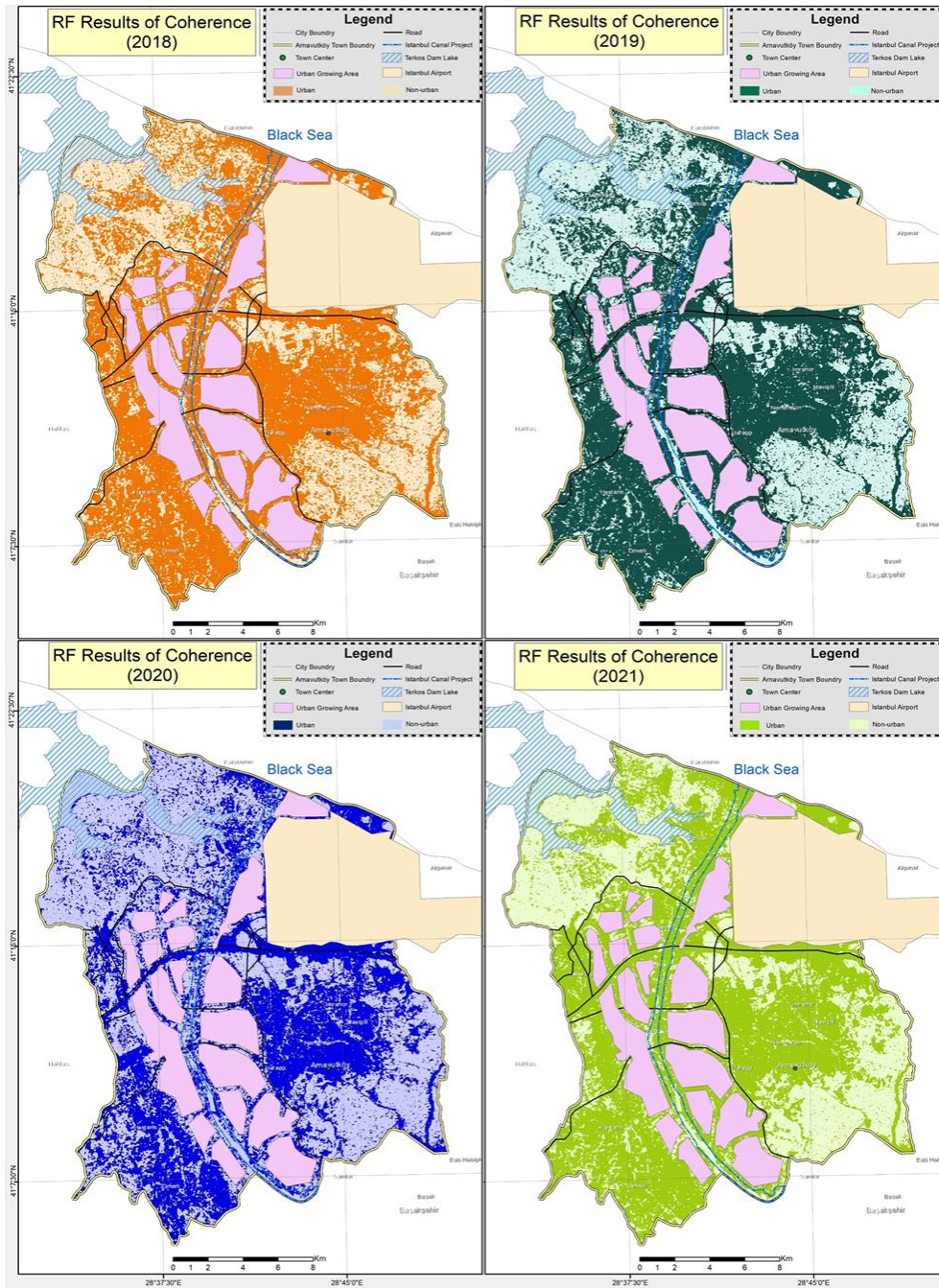


Figure 6. Combine maps of the 1/100.000 scaled environmental plan of the reserve building area of the European side of Istanbul and RF raster maps for each year

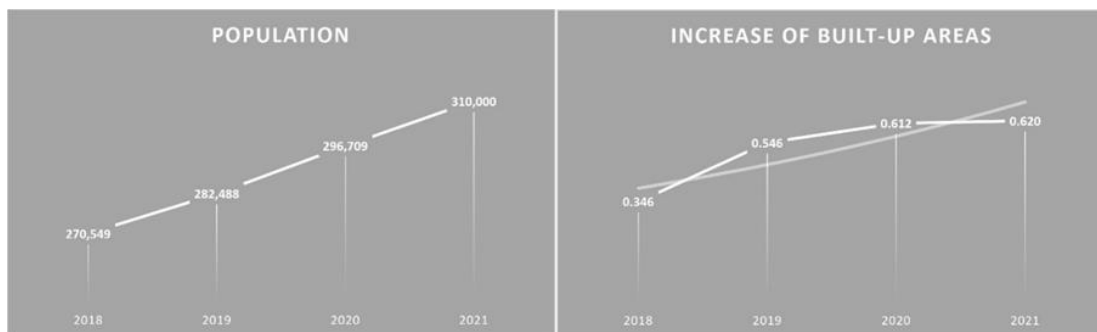


Figure 7. The graphs for changes in population number and BAs rate (%) between 2018 and 2021

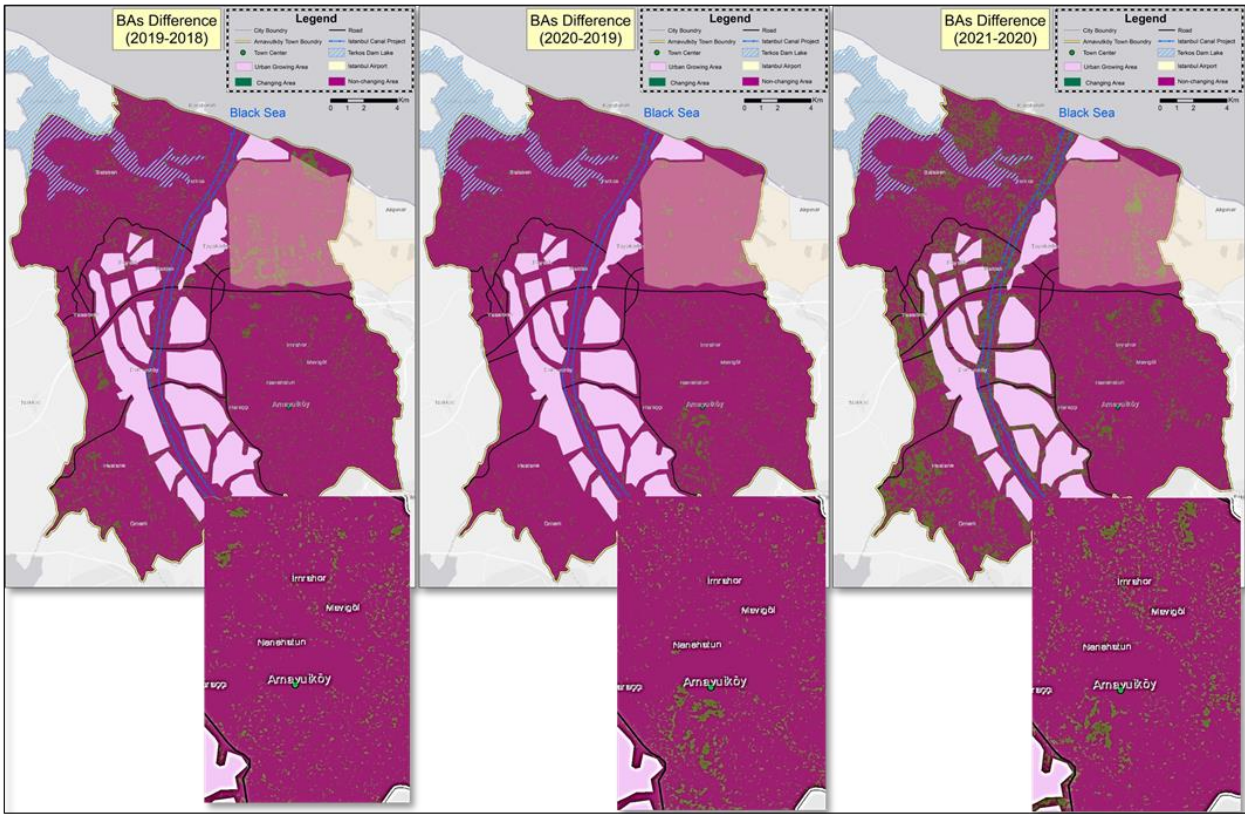


Figure 8. Combine maps of the 1/100.000 scaled environmental plan of the reserve building area of the European side of Istanbul and RF raster maps for each year

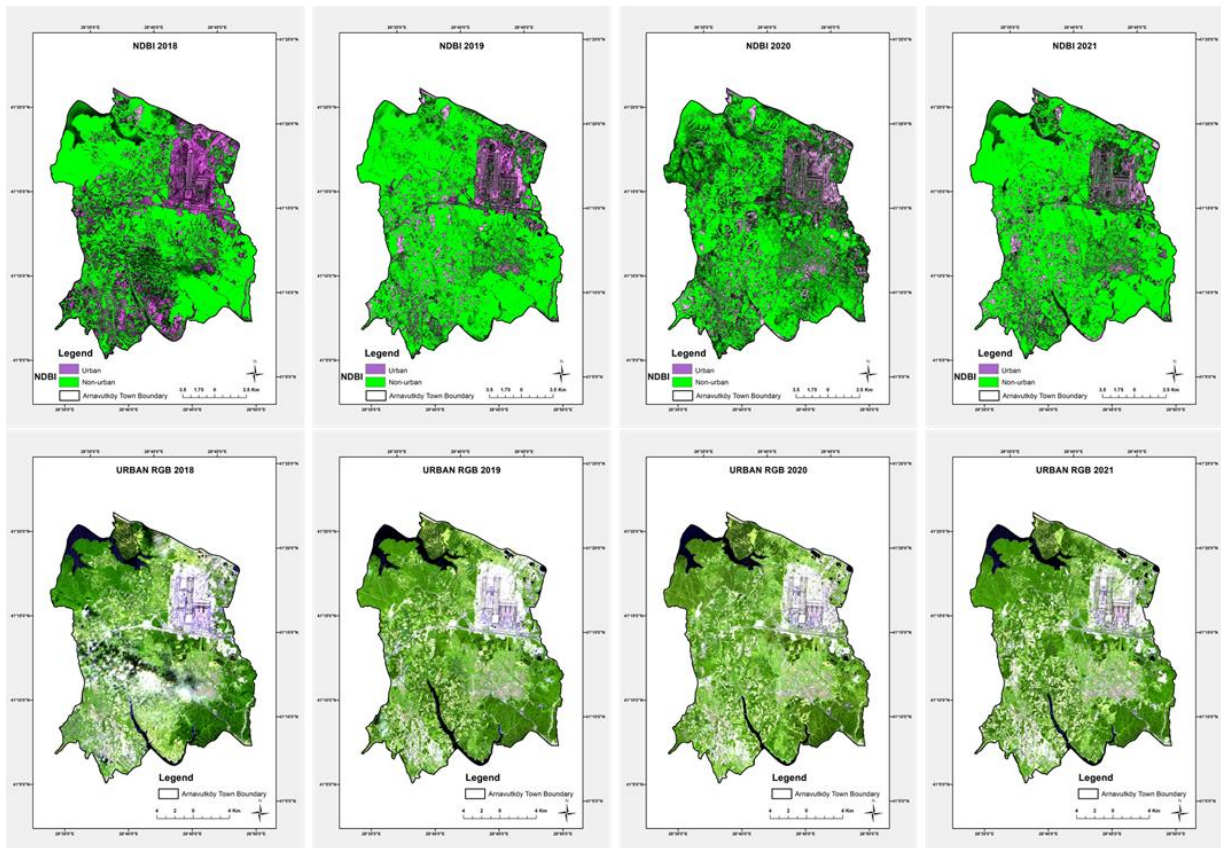


Figure 9. The false color urban RGB composite and the NDBI obtained from Sentinel-2A MSI data

4 Conclusions

After the preprocessing, 15 m of resampled data is obtained from Sentinel-1 radar data. This resolution is often sufficient to distinguish man-made objects. Man-made objects (presented as BAs in this research) express different values as coherence values compared to natural things such as water, tree, and soil. As a result, this difference revealed acceptable results in classification with RF. Based on 2018, the BAs differences in 2019, 2020, and 2021 indicate how rapidly Istanbul's Arnavutköy Town was built in the mentioned years. The highways covering the Great Istanbul Airport and its surroundings were built in the region form the construction mentioned. Most of the Kanal Istanbul megaproject planned for Istanbul covers the boundaries of Arnavutköy Town. Although this project is not yet in the construction phase, Arnavutköy Town has become a center of attraction. The critical point here is how much dense forests and extensive wetlands can be protected.

Acknowledgement

Many thanks to ESA for free SNAP software, Sentinel satellite data, and all kinds of support, and the Republic of Turkey Ministry of Environment and Urbanization for their open-access Spatial Strategy Planning.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 18%

References

- [1] M. Simwanda, Y. Murayama, and M. Ranagalage, Modeling the drivers of urban land use changes in Lusaka, Zambia using multi-criteria evaluation: An analytic network process approach. *Land Use Policy*, 92: p. 104441, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104441>
- [2] X. Li, Y. Zhou, M. Hejazi, M. Wise, C. Vernon, G. Iyer, and W. Chen, Global urban growth between 1870 and 2100 from integrated high resolution mapped data and urban dynamic modeling. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 201, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00273-w>
- [3] E. Tercan, and U. H. Atasever, Effectiveness of autoencoder for lake area extraction from high-resolution RGB imagery: an experimental study. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12893-y>
- [4] S. Demir, M. Basaraner, and A.T. Gumus, Selection of suitable parking lot sites in megacities: A case study for four districts of Istanbul. *Land Use Policy*, p. 105731, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105731>
- [5] Y. Lu, L. Yang, K. Yang, Z. Gao, H. Zhou, F. Meng, and J. Qi, A distributionally robust optimization method for passenger flow control strategy and train scheduling on an urban rail transit line. *Engineering*, 12, 202-220, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.016>
- [6] Y. Lv, W. Chen, and J. Cheng, Effects of urbanization on energy efficiency in China: New evidence from short run and long run efficiency models. *Energy Policy*, 147: p. 111858, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111858>
- [7] A. Varshney, and E. Rajesh, A comparative study of built-up index approaches for automated extraction of built-up regions from remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42(3): p. 659-663, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12524-013-0333-9>
- [8] A. Singh, and S. K. P. Kushwaha, Forest Degradation Assessment Using UAV Optical Photogrammetry and SAR Data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(3): p. 559-567, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01232-2>
- [9] S. K. Saha, Remote Sensing and Geographic Information System Applications in Hydrocarbon Exploration: A Review. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, p. 1-19, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01540-9>
- [10] H. Cao, H. Zhang, C. Wang, and B. Zhang, Operational built-up areas extraction for cities in China using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing*, 10(6), 874, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060874>
- [11] A. Ghodieh, Urban built-up area estimation and change detection of the occupied West Bank, Palestine, using multi-temporal aerial photographs and satellite images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(2): p. 235-247, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01073-8>
- [12] R. Guida, A. Iodice, D. Riccio, and U. Stilla, Model-based interpretation of high-resolution SAR images of buildings. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2), 107-119, 2008. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.2001155>
- [13] M. Massano, E. Macii, A. Lanzini, E. Patti, and L. Bottaccioli, A GIS Open-Data Co-Simulation Platform for Photovoltaic Integration in Residential Urban Areas. *Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.020>
- [14] A. Htitiou, A. Boudhar, Y. Lebrini, R. Hadria, H. Lionboui, and T. Benabdelouahab, A comparative analysis of different phenological information retrieved from Sentinel-2 time series images to improve crop classification: A machine learning approach. *Geocarto International*, 37(5), 1426-1449, 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1768593>
- [15] J. A. Gómez, J. E. Patiño, J. C. Duque, and S. Passos, Spatiotemporal modeling of urban growth using machine learning. *Remote Sensing*, 12(1), 109, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs12010109>
- [16] X. Niu, and Y. Ban, Multi-temporal RADARSAT-2 polarimetric SAR data for urban land-cover classification using an object-based support vector machine and a rule-based approach. *International journal of remote sensing*, 34(1): p. 1-26, 2013. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.700133>

- [17] L. Bruzzone, M. Marconcini, U. Wegmuller, and A. Wiesmann, An advanced system for the automatic classification of multitemporal SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6), 1321-1334, 2004. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.826821>
- [18] J. Geng, H. Wang, J. Fan, and X. Ma, Deep supervised and contractive neural network for SAR image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(4), 2442-2459, 2017. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2645226>
- [19] A. Jamali, and A.A. Rahman, SENTINEL-1 image classification for city extraction based on the support vector machine and random forest algorithms. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 42(4): p. W16, 2019. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-297-2019>
- [20] B. Wang, J Li, X. Jin, and H. Xiao, Mapping tea plantations from multi-seasonal Landsat-8 OLI imageries using a random forest classifier. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47, 1315-1329, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01014-5>
- [21] C. Kar, and S. Banerjee, Tropical Cyclones Intensity Estimation by Feature Fusion and Random Forest Classifier Using Satellite Images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01477-5>
- [22] H. Wu, J. Zhang, Z. Bao, G. Wang, W. Wang, Y. Yang, and J. Wang, Runoff modeling in ungauged catchments using machine learning algorithm-based model parameters regionalization methodology. *Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.12.014>
- [23] P.O. Gislason, J.A. Benediktsson, and J.R. Sveinsson, Random forests for land cover classification. *Pattern recognition letters*, 27(4): p. 294-300, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011>
- [24] J. Sharma, J. Eppler, and J. Busler, Urban infrastructure monitoring with a spatially adaptive multi-looking InSAR technique. *Proc. of Fringe, Frascati, Italy*, 2015.
- [25] H. B. Makineci, and H. Karabörk, Evaluation digital elevation model generated by synthetic aperture radar data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1: p. 57-62, 2016. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-57-2016>
- [26] Y. Ban, A. Jacob, and P. Gamba, Spaceborne SAR data for global urban mapping at 30 m resolution using a robust urban extractor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: p. 28-37, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.004>
- [27] Y. Yao, D. Chen, L. Chen, H. Wang, and Q. Guan, A time series of urban extent in China using DSMP/OLS nighttime light data. *PLoS One*, 13(5), e0198189, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198189>
- [28] F. Li, Q. Yan, Z. Bian, B. Liu, and Z. Wu, A POI and LST adjusted NTL urban index for urban built-up area extraction. *Sensors*, 20(10), 2918, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20102918>
- [29] Z. Jun, Y. Xiao-Die, and L. Han, The extraction of urban built-up areas by integrating night-time light and POI data—A case study of Kunming, China. *IEEE Access*, 9: p. 22417-22429, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3054169>
- [30] A. Braun, Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data—open applications, techniques, and limitations. *Open Geosciences*, 13(1): p. 532-569, 2021. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>
- [31] A. Mercier, J. Betbeder, F. Rumiano, J. Baudry, V. Gond, L. Blanc, C. Bourgoin, G. Cornu, C. Ciudad, M. Marchamalo, R. Pocard-Chapuis, and L. Hubert-Moy, Evaluation of Sentinel-1 and 2 Time Series for Land Cover Classification of Forest–Agriculture Mosaics in Temperate and Tropical Landscapes. *Remote Sensing*, 11, 979, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11080979>
- [32] L. Carrasco, A. W. O’Neil, R.D. Morton, and C. S. Rowland, Evaluating combinations of temporally aggregated Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 for land cover mapping with Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(3), 288, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030288>
- [33] A. Semenzato, S. E. Pappalardo, D. Codato, U. Trivelloni, S. De Zorzi, S. Ferrari, M. De Marchi, and M. Massironi, Mapping and Monitoring Urban Environment through Sentinel-1 SAR Data: A Case Study in the Veneto Region (Italy). *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 9, 375, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060375>
- [34] D. Colson, G.P. Petropoulos, and K.P. Ferentinos, Exploring the potential of Sentinels-1 & 2 of the Copernicus Mission in support of rapid and cost-effective wildfire assessment. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73: p. 262-276, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.011>
- [35] H. Karabörk, H. B. Makineci, O. Orhan, and P. Karakus, Accuracy assessment of DEMs derived from multiple SAR data using the InSAR technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 5755-5765, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05128-8>
- [36] S. Niculescu, J. Xia, D. Roberts, and A. Billey, Rotation Forests and Random Forest classifiers for monitoring of vegetation in Pays de Brest (France). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 727-732, 2020. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-727-2020>
- [37] T. T. H. Nguyen, T. N. Q. Chau, T. A. Pham, T. X. P. Tran, T. H. Phan, and T. M. T. Pham, Mapping Land use/land cover using a combination of Radar Sentinel-1A and Sentinel-2A optical images. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 652, No. 1, p. 012021)*. IOP Publishing, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/652/1/012021>
- [38] A. R. As-Syakur, I. W. S. Adnyana, I. W. Arthana, and I. W. Nuarsa, Enhanced built-up and bareness index (EBBI) for mapping built-up and bare land in an urban area. *Remote sensing*, 4(10), 2957-2970, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4102957>

- [39] P. Ettehad Osgouei, S. Kaya, E. Sertel, and U. Alganci, Separating built-up areas from bare land in mediterranean cities using Sentinel-2A imagery. *Remote Sensing*, 11(3), 345, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11030345>
- [40] C. Yang, Remote Sensing and Precision Agriculture Technologies for Crop Disease Detection and Management with a Practical Application Example. *Engineering*, 6(5): p. 528-532, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015>
- [41] K. Getu, and H.G. Bhat, Analysis of spatio-temporal dynamics of urban sprawl and growth pattern using geospatial technologies and landscape metrics in Bahir Dar, Northwest Ethiopia. *Land Use Policy*, 109: p. 105676, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105676>
- [42] E. Ustaoglu, and A.C. Aydmoglu, Suitability evaluation of urban construction land in Pendik district of Istanbul, Turkey. *Land Use Policy*, 99: p. 104783, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104783>
- [43] M.C. Peel, B.L. Finlayson, and T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(5): p. 1633-1644, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- [44] T. Kindap, A severe sea-effect snow episode over the city of Istanbul. *Natural Hazards*, 54(3): p. 707-723, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9496-7>
- [45] S.A. Swalih, and E. Kahya, Performance of gridded precipitation products in the Black Sea region for hydrological studies. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1): p. 465-485, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04054-z>
- [46] D. Amitrano, G. Di Martino, R. Guida P. Iervolino, A. Iodice, M. N. Papa, D. Riccio, and G. Ruello, Earth Environmental Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar: A Critical Review of Selected Applications. *Remote Sens.*, 13, 604, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13040604>
- [47] D. Amitrano, F. Cecinati, G. Di Martino, A. Iodice, D. Riccio, and G. Ruello, Urban areas extraction from multitemporal SAR RGB images using interferometric coherence and textural information. In *Fringe 2015 Workshop*, 2015. European Space Agency.
- [48] M. Stasolla, and P. Gamba, Spatial indexes for the extraction of formal and informal human settlements from high-resolution SAR images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(2): p. 98-106, 2008. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2008.921099>
- [49] W. K. Baek, and H. S. Jung, Precise Three-Dimensional Deformation Retrieval in Large and Complex Deformation Areas via Integration of Offset-Based Unwrapping and Improved Multiple-Aperture SAR Interferometry: Application to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Engineering*, 6(8): p. 927-935, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.012>
- [50] A.W. Jacob, F. Vicente-Guijalba, C. Lopez-Martinez, J.M. Lopez-Sanchez, M. Litzinger, H. Kristen, A. Mestre-Quereda, D. Ziolkowski, M. Lavalle, C. Notarnicola, G. Suresh, O. Antropov, S. Ge, J. Praks, Y. Ban, E. Pottier, J.J. Mallorqu Franquet, J. Duro, M.E. Engdahl, Sentinel-1 InSAR coherence for land cover mapping: a comparison of multiple feature-based classifiers, *IEEE J. Select. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 13, pp. 535-552, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2958847>
- [51] L. Breiman, Random Forests--Random Features. UC Berkeley TR567, 1999. Statistics Department, Berkeley, USA, Technical Report 567, September 1999.
- [52] L. Breiman, Random forests. *Machine learning*, 45(1): p. 5-32, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [53] S. Abdikan, C. Bayik, F. Balık Sanlı, and M. Ustuner, An Assessment of Urban Area Extraction Using ALOS-2 Data. In *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 403-406). IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/RAST.2019.8767819>
- [54] F. Calò, S. Abdikan, T. Görüm, A. Pepe, H. Kiliç, and F. Balık Şanlı, The space-borne SBAS-DInSAR technique as a supporting tool for sustainable urban policies: The case of Istanbul Megacity, Turkey. *Remote Sensing*, 7(12), 16519-16536, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs71215842>

