

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 12 Sayı: 1 2023
Volume: 12 Issue: 1 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

Review Article / Derleme Makalesi

A comprehensive survey on deep packet inspection for advanced network traffic analysis: Issues and challenges

Modern ağ trafiği analizi için derin paket incelemesi hakkında kapsamlı bir çalışma: Sorunlar ve zorluklar

Merve Çelebi, Alper Özbilen, Uraz Yavanoğlu

001-029

Research Article/Araştırma Makalesi

Classification of cancer images with CNN-based deep learning approach

CNN tabanlı derin öğrenme yaklaşımı ile kanser görüntülerinin sınıflandırılması

Halit Çetiner

030-038

Araştırma Makalesi/Research Article

Transfer öğrenmeli ve transfer öğrenmesiz derin ağlar ile inşaat alanında kask tespiti

Helmet detection on the construction site with transfer learning and without transfer learning deep networks

Mehmet Uğur Türkdamar, Murat Taşyürek, Celal Öztürk

039-051

Araştırma Makalesi/Research Article

Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak gelişmekte olan ülkelerin finansal enstrümanlarının etkileşimi ile Bist 100 tahmini

Estimating Bist 100 with the interaction of financial instruments of developing countries using deep learning and machine learning methods

Serap Akbulut, Kemal Adem

052-063

Araştırma Makalesi/Research Article

Şeker hastalığı teşhisi ve önerilen modellerinin karşılaştırılması

Diagnosis of diabetes and comparison of proposed models

Merve Korkmaz, Kaplan Kaplan

064-071

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Küresel COVID-19 salgın döneminde kentsel katı atık yönetiminde karşılaşılan güçlükler ve öneriler

Challenges and suggestions for municipal solid waste management during the global COVID-19 outbreak

Hülya Durmaz Bekmezci, Zehra Şapıcı Ayas

072-081



Araştırma Makalesi/Research Article

Elma posasından biyohidrojen üretimine farklı yükleme oranlarının etkisi

Effect of different loading rates on biohydrogen production from apple pulp

Furkan Baş, Hamdi Muratçobanoğlu, Begüm Öznur Gökçek, Sevgi Demirel

082-087

Araştırma Makalesi/Research Article

Reçine atıksuyu karakterizasyonu

Resin wastewater characterization

Zeynep Özcan, Gamze Sönmez, Mustafa Işık

088-095

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Gri Kurt optimizasyon algoritması ile güç ve dağıtım türü transformatörlerin ağırlık optimizasyonu

Weight optimization of power and distribution type transformer by Gray Wolf optimization algorithm

Murat Tören, Hakkı Mollahasanoğlu

096-103

Araştırma Makalesi/Research Article

İzolesiz bir off-grid PV destekli elektrikli araç şarj istasyonunun şarj ünitesi tasarımı

Design of a non-isolated charging unit of an off-grid PV supported electric vehicle charging station

Mohamad Nedal Sahloul, Ahmet Deniz, Fatih Onur Hocaoğlu

104-112

Research Article/Araştırma Makalesi

Design and fabrication of compact Wilkinson power divider on gallium nitride coplanar technology

Galyum nitridür koplanar dalga kılavuzu teknolojisinde kompakt Wilkinson güç bölücü tasarımı ve üretimi

Galip Orkun Arıcan

113-118

Araştırma Makalesi/Research Article

X-Bant uydu uygulamaları için dielektrik ölçüm yaklaşımı tabanlı kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı

Dielectric measurement approach based compact U-slot patch antenna design for X-band satellite applications

Orçun Kiriş

119-125

Research Article/Araştırma Makalesi

Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS

ASM'nin MUS tabanlı hız-algılayıcısız öngörülü moment kontrolü

Rıdvan Demir, Recep Yıldız, Murat Barut

126-133



Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Süt ve süt ürünleri için depo seçimi

Selection of suitable warehouse for milk and dairy products

Sena Nur Kaplan, Ülkü Can Üner, Tuğba Danışan, Tamer Eren

134-143

Araştırma Makalesi/Research Article

EDAS ve WASPAS yöntemleriyle tıbbi malzeme tedarikçisi belirleme

Determination of the right medical equipment supplier using the EDAS and WASPAS methods

Aşır Özbek, Muhammet Arif Özbek

144-158

Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Derleme Makalesi/Review Article

Geleneksel et üretimi ve tüketimine alternatif: Et analogları

Alternative to traditional meat production and consumption: Meat analogues

İbrahim Ender Künili, Selin Özge Dinç, Fatma Çolakoğlu

159-174

Araştırma Makalesi/Research Article

Antalya ilindeki 4 ve 5 yıldızlı otel mutfaklarında uygulanan gıda güvenliği yönetimi sistemlerinin değerlendirilmesi

Evaluation of food safety management systems applied in the kitchen of 4 and 5 stars hotels in Antalya

Mihriban Ülkü Körk, Bedia Şimşek, İlhan Gün

175-182

Harita Mühendisliği / Geomatic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

CBS tabanlı nominal değerlendirme yönteminin değer haritalarının oluşturulmasında kullanımı: Foça/İzmir örneği

Usage of GIS-based nominal valuation method in creating value maps: The case of Foça/İzmir

Mert Kayalık, Zeynel Abidin Polat

183-192

Araştırma Makalesi/Research Article

Elektrikli araç şarj istasyonları için AHP yöntemi ile uygun yer seçimi: Konya örneği

Suitable site selection for electric vehicle charging stations with AHP method: The case of Konya

Tansu Alkan, Ömer Faruk Atiz, Süleyman Savaş Durduran

193-199

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Taş kolon tasarım parametrelerinin konsolidasyona etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of stone column design parameters on consolidation

Firdevs Uysal, Abdulazim Yıldız

200-206

Araştırma Makalesi/Research Article

Tarihi uydu görüntüleri ile 1980 Aşağı Seyhan Ovası taşkın olayının yeniden değerlendirilmesi

Reassessment of 1980 Lower Seyhan Plain flood event by using historical satellite data

Şerife Pınar Güvel, Mehmet Ali Akgül, Recep Yurtal

207-215

Araştırma Makalesi/Research Article

Hiperstatik eksenel yüklü viskoelastik çubukların analizi için yeni enerji fonksiyoneli

New energy functional for analysis of statically indeterminate axially loaded viscoelastic bars

Gülçin Tekin, Fethi Kadioğlu

216-224

Araştırma Makalesi/Research Article

İnce pomza agreganın çimento esaslı kendiliğinden yayılan tesviye şapının performansına etkisi

Effect of fine pumice aggregate on performance of cement based self-leveling screed

Lütfullah Gündüz, Şevket Onur Kalkan

225-238

Araştırma Makalesi/Research Article

TBDY 2018' e göre farklı döşeme tiplerinin yüksek bina sınıfındaki yapıda doğrusal olmayan davranışa olan etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of different floor types on non-linear behavior in high-rise building class according to TBDY 2018

İlker Fatih Kara, Yunus Emre Akkaş

239-248

Araştırma Makalesi/Research Article

Okul servislerinde biniş sürelerine ilişkin istatistiklerin Bootstrapping yöntemiyle kestirimi

Estimation of statistics on boarding times in school buses using Bootstrapping

Yusuf Kağan Demir, Hatice Göçmen Demir

249-255

Araştırma Makalesi/Research Article

Yeraltı suyunun spektral davranışa etkisi

Effect of groundwater on spectral behavior

Ebru Civelekler, Kamil Bekir Afacan

256-264



Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Yakıt biyokatki maddesi ve yeşil solvent metilalin UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membran kullanılarak pervaporasyon prosesi ile saflaştırılması

Purification of fuel bioadditive and green solvent methylal by pervaporation process using UiO-66 doped PEI nanocomposite membrane

Derya Ünlü

265-271

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Doğrudan enerji biriktirmesi ve seçimli lazer ergitmesi uygulamalarının Inconel 718 mikroyapısında yol açtığı değişimler

The influence of selective laser melting and directed energy deposition applications on the microstructure of Inconel 718 alloy

Murat Işık

272-279

Araştırma Makalesi/Research Article

Elektrohidrolik bir sistemin pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyici ile konum denetiminin gerçekleştirilmesi

Reinforcement learning based position control of an electro-hydraulic system

Mustafa Yavuz Coşkun, Mehmet İtik

280-288

Araştırma Makalesi/Research Article

Katı oksit yakıt pillerinde elektrolit-elektrot arayüzey iyileştirilmesi

Enhancement of electrolyte-electrode interfaces in solid oxide fuel cells

Çiğdem Timurkutluk

289-296

Research Article/Araştırma Makalesi

Synthesis of MoS₂ thin films using the two-step approach

İki adımlı yaklaşım kullanılarak MoS₂ ince filmlerin sentezlenmesi

Serkan Erkan, Ali Altuntepe, Recep Zan

297-301

Research Article/Araştırma Makalesi

Investigation of effects of sand particles on aerodynamic performance of NACA 0012 airfoil

NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik performansı üzerinde toz partiküllerinin etkilerinin incelenmesi

Fuat Kaya

302-309



Malzeme ve Metalürji Mühendisliği / *Materials and Metallurgical Engineering*

Araştırma Makalesi/Research Article

Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikroyapısal, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of microstructural, thermal and mechanical properties of Al₅₀Si₂₅B₂₅ alloy

Hakan Yaykaşlı, Musa Gögebakan

310-316

Diğer / *Other*

Araştırma Makalesi/Research Article

Parkinson hastalarının aktivitelerinin tanınmasında TinyML tabanlı uç bilişim sistemi

TinyML-based edge information system for recognizing the activities of parkinson patients

Mine Boz, Yeliz Durgun

317-323

Düzeltilme / *Erratum*

Düzeltilme Makalesi/Erratum Article

Düzeltilme Yazısı “KBH₄ hidrolizinde ince film nikel katalizörünü kullanarak hidrojen üretimi ve proses optimizasyonu”
[NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi 11(4), 1097-1102, 2022]

Erratum to “Hydrogen production and process optimization using thin film nickel catalyst in KBH₄ hydrolysis”
[NOHU Journal of Engineering Sciences 11(4), 1097-1102, 2022]

Meryem Sena Akkuş

324



A comprehensive survey on deep packet inspection for advanced network traffic analysis: Issues and challenges

Modern ağ trafiği analizi için derin paket incelemesi hakkında kapsamlı bir çalışma: Sorunlar ve zorluklar

Merve Çelebi^{1,*}, Alper Özbilen², Uraz Yavanoğlu³

¹ Gazi University, Department of Computer Forensics, Informatics Institute, 06500, Ankara, Türkiye

² Interprobe, 06800, Ankara, Türkiye

³ Gazi University, Department of Computer Engineering, 06570, Ankara, Türkiye

Abstract

Deep Packet Inspection (DPI) provides full visibility into network traffic by performing detailed analysis on both packet header and packet payload. Accordingly, DPI has critical importance as it can be used in applications i.e network security or government surveillance. In this paper, we provide an extensive survey on DPI. Different from the previous studies, we try to efficiently integrate DPI techniques into network analysis mechanisms by identifying performance-limiting parameters in the analysis of modern network traffic. Analysis of the network traffic model with complex behaviors is carried out with powerful hybrid systems by combining more than one technique. Therefore, DPI methods are studied together with other techniques used in the analysis of network traffic. Security applications of DPI on Internet of Things (IoT) and Software-Defined Networking (SDN) architectures are discussed and Intrusion Detection Systems (IDS) mechanisms, in which the DPI is applied as a component of the hybrid system, are examined. In addition, methods that perform inspection of encrypted network traffic are emphasized and these methods are evaluated from the point of security, performance and functionality. Future research issues are also discussed taking into account the implementation challenges for all DPI processes.

Keywords: Deep packet inspection, Network traffic analysis, Security, Survey

1 Introduction

Modern networks with large number of nodes, such as IoT, need to be regularly monitored in order to maintain their performance. Maintaining performance in these networks with different purposes may include prioritizing one or more of the issues such as ensuring quality of service (QoS) requirements, identifying problems that threaten network security or improving resource consumption. These objectives can be achieved through the application of network traffic monitoring and analysis (NTMA) techniques such as network security, network traffic classification, fault management and traffic forecasting. In the process of

Öz

Derin Paket İnceleme (Deep Packet Inspection-DPI), hem paket başlığı hem de paket yükü üzerinde ayrıntılı analizler gerçekleştirerek ağ trafiğinin tam görünürlüğünü sağlar. Ağ güvenliği veya devlet gözetimi gibi uygulamalarda kullanılabilmesi yönüyle DPI, kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, DPI hakkında kapsamlı bir araştırma sunulmuştur. Diğer inceleme çalışmalarından farklı olarak bu çalışmanın amacı, modern ağ trafiğinin analiz edilmesi sürecinde performansı sınırlayan parametreleri belirleyerek DPI tekniğinin ağ analizi mekanizmalarına verimli ve etkili bir şekilde entegrasyonunu sağlamaktır. Karmaşık davranışlar gösteren ağ trafiği modelinin incelenmesinin birden fazla tekniğin bir araya getirilerek güçlü hibrit sistemlerle gerçekleştirildiği göz önünde bulundurularak, DPI metodu, ağ trafiğinin analizinde kullanılan diğer tekniklerle birlikte incelenmiştir. Ağ güvenliği hususunda kritik öneme sahip DPI metodunun IoT ve SDN mimarileri üzerindeki güvenlik uygulamaları tartışılmış ve DPI'nin IDS'lere hibrit sistemin bir bileşeni olarak uygulandığı mekanizmalar incelenmiştir. Ayrıca, Şifreli ağ trafiğinde inceleme gerçekleştiren yöntemler üzerinde durulmuş ve bu yöntemler güvenlik, performans ve fonksiyonellik açılarından değerlendirilmiştir. Son olarak, tüm DPI süreçleri için uygulama zorlukları ve bu zorluklarla ilişkili gelecek araştırma konuları ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Derin paket inceleme, Ağ trafiği analizi, Güvenlik, Araştırma

implementing NTMA techniques, different requirements can be defined for the acquisition of traffic data. In this regard, network packets are generally considered as targets to be examined at the traffic data collection tasks [1]. Packet inspection can be expressed as an ability to inspect network traffic for a specific aim in real-time or offline. Three basic methods, classified according to depth, are used to monitor network traffic and evaluate its performance [2]. In Shallow Packet Inspection (SPI) technique, only header information of each packet is examined, and the payload is not taken into account. This technique focuses on the second and the third layers in the OSI model. With SPI method, IP addresses of the sender and the receiver, the number of packets that a

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: merveorakci@gazi.edu.tr (M. Çelebi)

Geliş / Recieved: 04.10.2022 Kabul / Accepted: 14.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1184020

message is broken into, the number of hops per packet and the synchronization data that allows for reassembling packets can be examined. Medium Packet Inspection (MPI) technique inspects header and payload of network packets up to the presentation layer. MPI technologies can prioritize some packets by examining application commands in the application layer and file formats in the presentation layer. This examination method is commonly used by application proxies and provides a more comprehensive analysis than SPI technique [3]. Unlike SPI and MPI techniques, DPI performs a detailed inspection covering all headers of the whole layers and the packet payload.

The ability to have information on both packet header and payload in real-time provides control over the communication between two endpoints. Network controllers such as Internet Service Providers (ISP) use network technologies that enable real-time monitoring of network packets. This technology is known as DPI [4]. DPI generally provides an in-depth analysis of packets passing through a certain network point and makes some decisions based on the analysis. This method is called DPI because analysis covers both packet header and packet payload. There are two main processes of DPI; identification and action. Identification is the process of examining packets and discovering their hidden features. After identification, operations such as keeping logs for analysis of the network or dropping from the network for network security can be performed in the action process [5].

DPI technique is used to detect well-known malware signatures. Additionally, the attack pattern which includes the attack order, the path followed by the attacker and the techniques used by the attacker can be detected in connection with the network flow. Besides detecting known attack patterns with high accuracy, new exploitation techniques can also be discovered via DPI. This allows explorers to build new protection mechanisms and signatures [2]. Thus, DPI can be used in network security and government surveillance applications. Moreover, DPI can be used in content filtering to detect and block harmful or illegal content, bandwidth management, copyright management and applications that allow ISPs to inject advertisements into websites according to users' interests [6-8]. Many open-source tools such as the Linux firewall and commercial tools such as Norton Core use the DPI approach in their products for analysis of the network traffic [9]. Additionally, IDS commonly use payload-based classifiers to identify malicious network activity [10].

There are numerous reviews on current applications of DPI technology [5,11-13]. In the next sub-section, these reviews are examined. Also, the contribution of this paper to the literature are discussed. In the second sub-section of the introduction, the organizational structure of this paper is presented.

1.1 Existing surveys on DPI

In the study numbered [11], the literature review was conducted on the techniques required to develop DPI systems. The impact of challenges associated with complex signature sets and hardware or operating system on DPI

implementations are discussed. The analysis of open source DPI modules used in traffic classification is presented in the study numbered [12]. This analysis evaluates classification accuracy and computational requirements over a real data set. The study numbered [5] provides a detailed review of the Regular Expression (RE) Matching Technique. In this study, the state explosion problem in the Finite State Machine (FSM) created for *RE Matching* is emphasized. In this direction, suggested methods for avoiding or mitigating state explosion have been examined, and these suggestions are presented for the creation of compact and efficient automata. Parallel platforms such as Graphics Processing Unit (GPU) or Field-Programmable Gate Array (FPGA) that accelerate the pattern matching process are also discussed. In the study numbered [13], the existing literature on infrastructure and communication for the energy sector and smart grids, also a review of DPI techniques and application areas are presented. The study pays attention to the use of the DPI technique as a security tool for smart grids, and proposes a SDN-based security monitoring framework that uses a hybrid model combining DPI and Deep Learning (DL) technique. Also, an additional framework that performs network forensic analysis is proposed to expand the capabilities of this framework.

These studies numbered [5, 11, 12] and [13], which focus on DPI technology, mainly examine DPI and the application areas of these techniques. Only in the study numbered [11], the parameters that limit the performance of DPI systems are partially mentioned. Despite the widespread use of encrypted network traffic, it is an important shortcoming that a detailed analysis of DPI techniques in this field is not existing in the current literature. In addition, there is no study examining the difficulties of implementing DPI techniques in SDN or IoT architectures in today's modern networks. Accordingly, this paper aims to present a roadmap for the application of DPI technology in today's modern networks. Considering that the analysis of the state-of-the-art network traffic model is carried out with powerful hybrid systems by combining more than one technique, the DPI method is examined together with other techniques used in the analysis of network traffic. In order to protect the confidentiality of network traffic, the proposed techniques for analyzing encrypted traffic are discussed with their advantages and disadvantages. In addition, a comprehensive review of DPI implementation challenges for scenarios that generate state-of-the-art network traffic such as IoT or SDN architectures is conducted, and the security applications of DPI technique on these architectures, whose main focus is a security concern, are discussed. The main purpose of this paper is to perform a detailed analysis on detection and improvement of performance-limiting parameters in all processes from collecting state-of-the-art network traffic and analyzing it via DPI, and to evaluate the contribution of DPI technique to the mechanisms created to analyze the network traffic by examining DPI applications in the existing literature. The contributions of this paper can be listed as follows:

- We comprehensively review the challenges of advanced network traffic analysis, performance-

limiting parameters and implementation of difficulties of DPI techniques.

- We identify implementation challenges and open research issues for DPI systems, and provide insight into topics that will shed light on future work.
- We create a roadmap that enables the use of appropriate DPI techniques to address advanced network analysis challenges.
- We point to the other techniques that complement the DPI technique instead of focusing only on this technique in determining the procedures to be applied in future mechanisms.
- We present a classification of the proposed methods to perform an inspection on encrypted traffic, and discuss the advantages and disadvantages of the techniques that directly use or do not use the DPI approach or limit the usability of this approach.
- We evaluate the role of IDS in ensuring the security of IoT and SDN architectures whose main focus is on security concerns, and discuss the implementation challenges of DPI on these architectures.

1.2 Paper organization

The structure of the paper is shown in Figure 1. In this direction, the schedule in this paper is as follows: In Section 2, the problems encountered in the process of receiving and processing network packets from Network Interface Card (NIC) are determined and the solutions to these problems are presented. In addition, the platforms developing based on these solution methods are examined. In the first sub-section of Section 3, considering that the analysis of the network traffic model with complex behaviors is carried out with powerful hybrid systems by combining more than one technique, the DPI method is examined together with the other techniques used in the analysis of network traffic. In the following sub-section, the software and hardware-based

methods proposed to improve DPI performance are examined. In the last sub-section of the section, suggested methods for the analysis of encrypted traffic are presented. The advantages and disadvantages of these methods, which directly use or do not use the DPI approach or limit the usability of this approach, are discussed. In Section 4, the role of IDS in ensuring the security of IoT and SDN architectures, whose main focus is on security concerns, is evaluated, and implementation challenges of DPI on these architectures are discussed. Finally, in Section 6, DPI implementation difficulties are evaluated and deficiencies in this field are identified. In addition, new discussion issues are suggested.

2 Packet capturing and processing with commodity hardware

In this section, the problems encountered in the process of receiving and processing network packets from the NIC are determined and the solutions to these problems are presented. In addition, the platforms developed based on these solution methods are examined. Accordingly, a common software application for network packet processing using commodity hardware is examined. In this direction, Unix-based operation systems are used as an example.

The first step in packet processing is transferring the network packets to the main memory. In the Linux kernel, the network packets are stored in a *sk-buff* structure in the main memory. Also, NIC has a ring queue that stores the descriptors used for these *sk-buff* structures. This ring queue is called a *ring buffer*. When a packet is accepted by NIC, the *sk-buff* structure is mapped to kernel memory space using the Direct Access Memory (DMA) Mechanism. Then, NIC schedules hardware interrupt to notify the kernel that a packet is available. Central Processing Unit (CPU) responds to this by calling the driver's interrupt handler. Since using kernel version 2.4.20, New API (NAPI) is used by drivers [8].

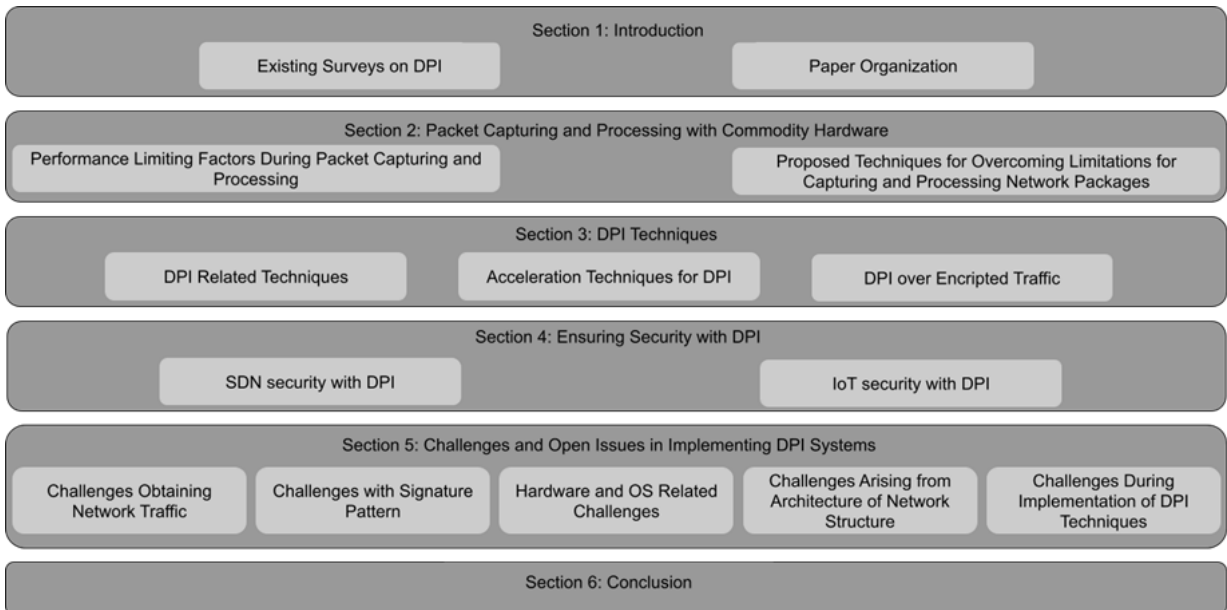


Figure 1. The structure of the survey

NIC is added to a poll list, and a soft interrupt is scheduled by the interrupt handler. Then, each of the devices in the list is polled to receive network packets from the *ring buffer* by the CPU. After the packets are processed at the network and transport layers, they are forwarded to the application layer. The *sk-buff* data is copied to the user space by using socket API. Driver must load the packet descriptor into the transmitting *ring buffer* to be transmitted of a network packet. Then, the driver notifies NIC that packets are ready to be transmitted. Finally, NIC informs the CPU via an interrupt to release the *sk-buff* structure [14,15].

NAPI contributes to the acceleration of the capturing of network packets process with two principles [16]:

Interrupt mitigation. Accepting high-speed network traffic using the traditional structure causes large number of interrupts per second. These interrupts cause the CPU to become overloaded and therefore to lose performance. The NAPI-aware driver initiates the interrupt routine when a packet RX/TX interrupt occurs to solve this problem. Unlike the traditional approach which copies and queues a packet directly, the interrupt routine uses a *poll()* function to disable similar interrupts in the future. *Polling* mode consumes more CPU cycles compared to interrupt-driven while a load of network traffic is low. However, the performance of the *polling* mode increases at higher speeds. NAPI-aware drivers fit themselves into the network load to improve performance in any case.

Packet Throttling. Packets must be dropped when high-speed traffic exceeds system capacity. Legacy drivers that do not use the NAPI approach drop network packets at the kernel level. This causes CPU cycle consumption unnecessarily. NAPI-aware drivers drop packets at the network adapter through flow control mechanisms, avoiding performance losses from redundant CPU cycles.

2.1 Performance limiting factors during packet capturing and processing

Linux networking stack is designed for general-purpose networks. Besides being used as a router, it supports many protocols at network or transmission layers. Although this design choice is suitable for running applications with a speed of 1 Gbit/s, the operating system starts to drop packets and reaches the limit when approaching 10 Gbit/s speed since it cannot process more packets [17]. NAPI technique is not suitable for capturing high-speed network traffic. In this direction, architectural problems in capturing network packets from NIC, processing them in the Linux network stack and transmitting them to the application layer cause performance losses [16].

One of the major constraints that cause performance losses is the use of main memory. The *sk-buff* structure must be allocated for each packet and released when a packet is transferred to the user level or forwarded to another endpoint. This behavior consumes unnecessary CPU cycles to transfer data from main memory to CPU. In addition, the effort to make the network stack compatible with many protocols resulted in a complex *sk-buff* structure. The *sk-buff* structure contains metadata for several protocols that are not required

for packet processing. This complexity results in the creation of a very large data structure, slowing down the process. Another problem with main memory usage is that a packet has to go through different points until it arrives the userspace. This results in at least two copies for each network packet. After the packets are accepted by the NIC, the packets are copied from the DMA-capable memory area to the `sk_buff` structure and then to the user-level application. A single copy of data can spend up to 2000 CPU cycles, depending on network packet length. Also, *sk-buff* conversion operations and memory allocation consume 1200 CPU cycles per network packet, and 1100 cycles are required to free the buffer [18]. *sk-buff* operations spend 63 % of the CPU cycles in receiving a single 64B packet [19].

Context switches that switch between user and kernel modes affect performance significantly. The user-level application has to make a system call for the context switch when it requires to send or receive a packet. These operations can spend up to 1000 CPU cycles per network packet [18].

The important step in the development of modern NICs is the Receive Side Scaling (RSS) Technology [19]. RSS Technology takes a load of network traffic from the NIC and shares it among the cores of a multi-core system. In this way, the load between system resources can be balanced. This allows avoiding bottlenecks in packet processing by using a single core and optimizing cache [16]. After capturing network packets using RSS technology, all network packets are concatenated at a certain point, and analyzed in the transport layer. The merging of traffic at a single point causes a bottleneck. This may also cause packet disordering [20]. System performance is adversely affected as the acceleration achieved at the driver level is lost at the user level.

Spinlock is another performance-limiting factor. During the transmission of a network packet, two spinlocks are required that control the NIC's access to the transmission queue [21]. These locks may cause congestion by preventing parallel processing when using multiple CPUs.

The main bottleneck of software architecture is about inefficient memory access. Non-Uniform Memory Architecture (NUMA) is widely used in the process of capturing and processing high-speed network traffic. NUMA architecture distributes system memory among different Symmetric Multi-Core Processors (SMPs) by assigning a memory segment to each. This architecture increases system efficiency from the point of cache misses and memory accesses [22]. However, scheduling of tasks must be done carefully when using this architecture. When NIC is plugged to the PCIe slot reserved to a NUMA node, the threads assigned to capture packets must be run on the dedicated cores for this NUMA node. Assigning these threads to another NUMA node causes to transfer of data between processors. Therefore, it reduces performance because of cache misses and access latency [16]. On the other hand, the first access to the DMA-capable memory area causes cache misses as it invalidates cache lines of DMA operations. Such cache miss spends 13.8% of the CPU cycles for a single 64B packet [19].

2.2 Proposed techniques for overcoming limitations in capturing and processing network packets

Various techniques are developed to overcome the problems encountered in the process of capturing network packets and transmitting them to the user area [16, 23]. These techniques are listed below:

- Preallocation and reuse of memory resources to avoid bottleneck generated by per packet allocation/releasing buffers
- *Zero copy*: Mapping the DMA-capable memory region directly accessed by NIC where an application can read and write to these regions without intermediate copies
- *Batch processing*: Copying packets into kernel or user memory by grouping them in a buffer to avoid the overhead resulted from additional calculations and function accesses such as system calls and context switches
- *Prefetching*: Loading memory locations that may be used in the processor's cache in the near future to reach them faster in case of need
- *CPU Affinity*: Determining the execution region for using the threads
- *Memory Affinity*: Determining the memory space for using the threads
- *Lock-Free Multi-Threading*: Avoiding the performance issues associated with the use of synchronization techniques such as mutexes and semaphores to ensure lock-free operation by using multiple hardware queues to allow threads to run on independent subsets of traffic
- *Compute Batching*: Applying network functions to handle a group of packets rather than single packets in order to decrease the overhead caused by additional calculations and function accesses such as context-switch and stack initialization
- *Parallel Direct Paths*: Using RSS queues and direct parallel paths between applications via the allocation of certain cores for both receiving packets from RSS queues and transferring them to the user space

There are many platforms based on the proposed solution to the problems encountered in packet processing. While the software-based platforms [23-28] developed as fast packet processing architectures use only the processing power of CPU in the packet processing, the hardware-based platforms [19, 29-32] aim to provide performance gain by executing part of the packet processing on specialized hardware such as FPGA or GPU.

Click [24] is one of the first modular software architecture used to build routers. Although it supports Linux interrupt structure which causes performance losses in packet transmission, Click uses *polling* instead of interrupt. Also, this architecture does not use *zero-copy*. Click-based Snap [29] is the hardware-based platform that offloads the part of the computational overhead to GPUs. Network packets in a batch may have different paths in Click. This separation may happen before packets reach GPU or inside

GPU. This process, which causes unnecessary copying of packets that are not processed on GPU, is time-consuming due to the limited PCIe bandwidth. Snap copies only the required packets to a contiguous memory space at the host level, and then creates a group of packets that are sent to GPU memory in a single transfer over PCIe. Indeed, it is aimed to avoid bottlenecks that may occur by transferring only certain parts of the network packet processing process to GPU. Snap adds predictive bits to each packet to solve the problem of the occurrence of different paths within GPU. In Snap, the *zero copy* technique is not implemented due to deviations before reaching GPU and copying only the necessary parts of the network packet for processing. PacketShader [19] is another hardware-based platform that benefits from GPU to reduce the computational load for fast packet processing. It uses a *batch processing* technique to reduce the processing load for each packet. PacketShader uses copying, which allows flexibility of the user buffer, instead of the *zero-copy* technique for better abstraction. It also facilitates the recycling of large packet buffer cells.

Netmap [25] is a userspace packet handler that does not require special hardware and minimizes packet processing cost by using techniques such as *resource preallocation*, *batch processing*, and *zero-copy*. This framework maps the NIC rings to an equivalent number of network map rings so that the load is spread across multiple CPU cores without lock contention. GASPP [30] is the hardware-based platform that benefits from GPU to perform fast packet processing. This architecture uses the Netmap library for I/O operations in packet processing. In this way, it is possible to avoid network packet copies and context switches that cause additional overhead. In this framework, reassembling TCP streams and flow management are entirely performed on GPU. Additionally, a packet scheduling technique that eliminates load imbalance and controls flow irregularity is applied for GPU threads. Also, the *zero-copy* technique which increases throughput between devices is applied between GPU and NICs. Data Plane Development Kit (DPDK) [26] is another userspace packet handler to perform fast packet processing. This framework is developed for Intel's multi-core processors that deliver packets to applications by using acceleration techniques such as *resource preallocation*, *batch processing*, and *zero-copy*. The forwarding process of packets called the data plane operation, is performed by DPDK libraries that forward network packets to the application network stack directly without any Linux kernel overhead [33]. In addition to the libraries, DPDK also includes Poll Mode Drivers (PMD) that accesses RX and TX descriptors without any interrupts to receive, process and transmit packets to the user space. This decreases the overhead caused by interrupt operations in high speed scenarios. APUNet [31] is a hardware-based platform that leverages the power of integrated GPUs for network packet processing and uses DPDK infrastructure for packet forwarding. APUNet uses the *zero-copy* technique in the entire processing steps. This structure implements persistent GPU kernel execution to reduce communication latency between CPU and GPU. Thus, GPU threads run in parallel for constant input network packet flows. For the

solution to the cache coherency problem between CPU and GPU, synchronization of cache memory access technique is suggested by integrated GPU to present GPU's processing results to CPU at a low cost. FastClick [27] is a high-speed userspace packet processor that integrates both DPDK and Netmap into Click. Fastclick benefits from these two versions to increase packet processing speed. It also increases the efficiency of Click by using *zero-copy*, *multi-queue support*, *I/O* and *computation batching*.

PF_RING [28] performs active traffic analysis on commodity hardware and provides a performance improvement in direct proportion to the increased number of cores. This library uses PF_RING ZC drivers that implement a *zero-copy* technique to achieve maximum packet processing speeds. Packets are read directly from NIC by using these drivers. The network packets are polled from NICs by using NAPI in PF_RING architecture. Packets are copied from the NIC to the circular buffer, and the user area application reads the packets from the ring. Accordingly, the CPU is used both to transmit from the NIC and to process network packets. In PF_RING DNA (Direct NIC Access) [34], NIC NPU (Network Process Unit) architecture is used instead of NAPI. In this structure, NIC maps memory in userspace. As a result, the CPU is only used to process packets.

Vector Packet Processing (VPP) [23] is a framework capable of high-speed packet processing in the user space to benefit from general-purpose CPU architectures. DPDK or Netmap can be used as I/O nodes in the VPP. VPP resources are organized into two basic groups composed of a low-level libraries used to implement specialized network packet processing applications and high-level libraries, called plugins, that perform a specific processing task. VPP master code and plugins create a forwarding graph that defines the possible paths of a packet. Vectors are arrays located in pre-allocated contiguous memory segments, and per-vector processing is a basic principle in VPP. Vectors are efficiently managed by VPP in reusable lists before they are released. Vectors are reused and managed efficiently without releasing in reusable lists by VPP. The main innovation of VPP is that it provides performance gain by processing network packets in vectorized format. Each node of the VPP processes all packets in the vector instead of allowing each packet to traverse the entire graph. The underlying assumption of the vectorized process is that subsequent packets require similar operations. Since the instruction cache is only loaded for the first packet in the vector, other packets in the vector tend to be processed at high performance. Also, this approach provides an efficient prefetching strategy. It is known which packet data is required to process the specific feature when the node is called. Thus, (i+1)th packet's data can be prefetched while the node is processing the i'th packet. VPP also uses the multi-loop approach to take advantage of low-level hardware support. The approach of multi-loop can be defined as a function written to process N packets in parallel. In this process, the computations for all network packets are independent of each other. With the help of this approach, CPU pipelines are allowed to fill up constantly, and the

latency caused by cache miss is shared with N packets instead of a single packet.

ClickNP [32] is a hardware-based platform that aims to provide performance gain by executing part of the packet processing in FPGA. FPGAs are programmed in complex low-level Hardware Description Languages (HDL) such as Verilog or VHDL. This may cause low productivity and debugging difficulties in FPGAs. Therefore, ClickNP applies three basic approaches to overcome the programming difficulties on FPGA. In the first approach, each complicated network function is decomposed and determined as well-defined elements via ClickNP's modular architecture. Another approach is to write ClickNP elements in a high-level language that is easier to understand. The final approach is to use the high-performance PCIe channel between CPU and FPGA. This channel works with low latency and high efficiency, allowing cooperation in the processing of network packets on CPU and FPGA. Additionally, ClickNP uses a *batch processing* approach to reduce DMA overhead.

3 DPI techniques

Today's network traffic model has complex behaviors due to device mobility and network heterogeneity [1]. Analyzing this complex network traffic requires more efficient mechanisms by which multiple techniques are combined to create hybrid systems. The packet payload is used with or separately from the packet header in DPI applications such as content-based recognition, traffic classification or IDS whereas the packet header is used with its fixed format or statistical character for analysis of network traffic [5]. For this reason, it is more accurate to examine the DPI method together with other techniques used in the analysis of network traffic. In the first sub-section, DPI techniques and DPI-related techniques are examined. State-of-the-art network traffic with complex behavior causes DPI implementations to be computationally intensive and time-consuming. In this direction, improving DPI performance becomes an important working area. In the second sub-section, recommended software and hardware-based methods which improve DPI performance are discussed. On the one hand, it is important to enhance the existing literature with a well-detailed analysis of DPI applications on the network composed of encrypted traffic mostly [35]. Indeed, the methods that directly use or do not use the DPI approach or limit the usability of this approach are examined, and the advantages and disadvantages of these methods are discussed in the process of analyzing the encrypted network traffic in the last sub-section.

A classification of the literature based on DPI techniques is presented in Figure 2. This classification which focuses on the application of DPI techniques is created for the requirements of a state-of-the-art network which has complex behavior and encrypted traffic mostly. In this direction, three main categories are identified for classification DPI techniques, acceleration techniques for DPI and techniques for performing DPI on encrypted traffic. Within the first category DPI techniques, two subcategories are identified: Pattern matching and protocol decoding

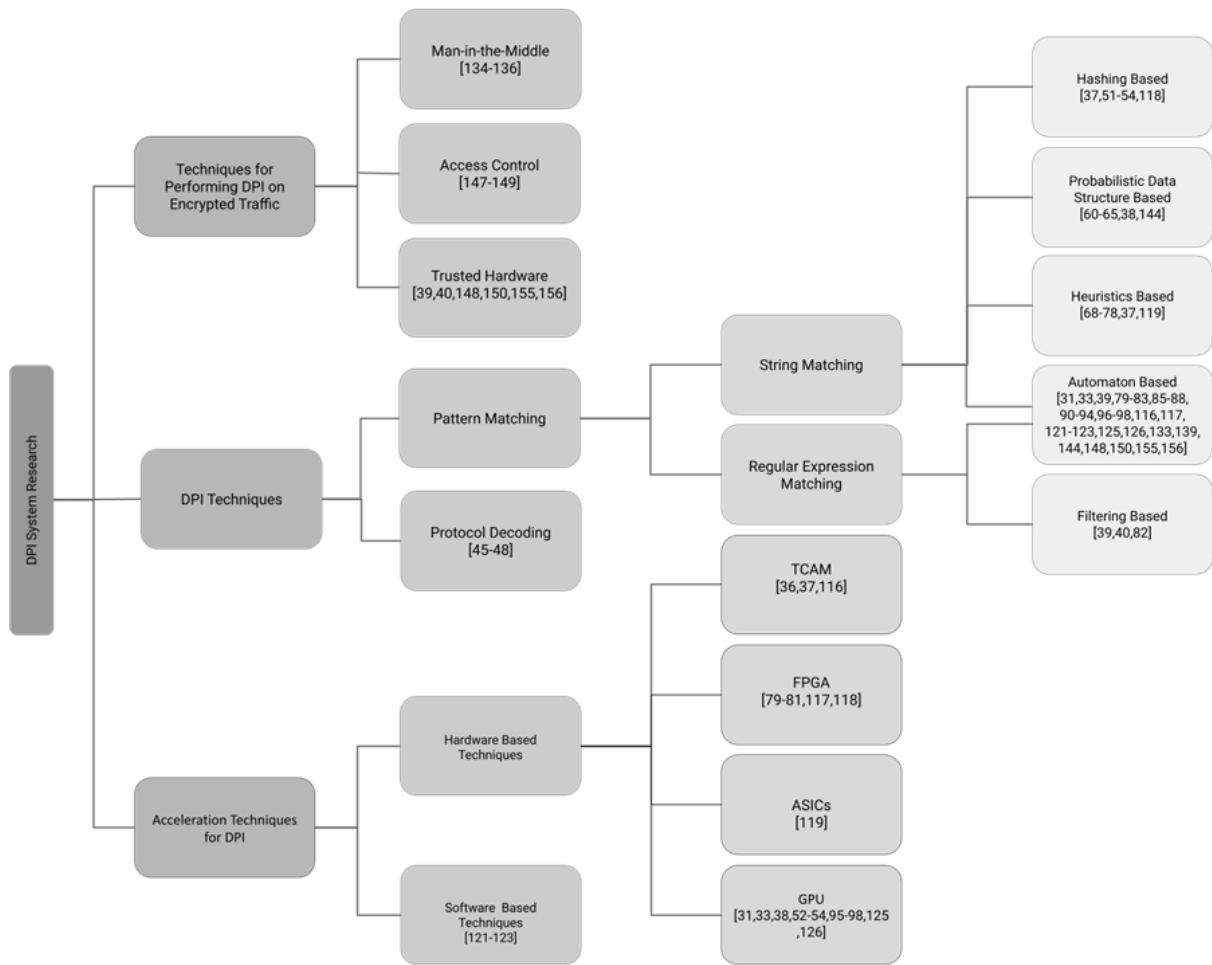


Figure 2. Overview of the surveyed research works classified according to the proposed classification

techniques. In the second category, acceleration techniques for DPI, two subcategories are identified: Hardware-based and software-based techniques. In the third category, techniques for performing DPI on encrypted traffic, three subcategories are identified: Man-in-the-Middle Attack (MITM), Access Control (AC) and Trusted Hardware (TH) techniques. With the help of this classification, it is aimed to facilitate the reader's access to references that examine a specific field. However, as a natural consequence of this classification, there are many studies in which techniques in different categories are used together. The categorization of studies numbered [36-39] and [40] can be given as an example of this case. The studies numbered [39] and [40] performed filter-based pattern matching by using the TH technique are examined in the categories of both DPI techniques and techniques for performing DPI on encrypted traffic. Likewise, the study numbered [38] performed by using Cuckoo filter (CF) [41] on GPU is examined in the categories of both DPI techniques and acceleration techniques for DPI. The study numbered [37], which proposes Ternary Content Addressable Memory (TCAM) based multiple-pattern matching algorithm that uses a hybrid model of pattern matching techniques is examined in the three categories. These categories are acceleration techniques for DPI, hashing and heuristic-based pattern

matching techniques. The study numbered [36] which proposes TCAM based multiple-pattern matching algorithm is only examined in the category of acceleration techniques for DPI as it does not use any of the available DPI techniques. As seen in the classification, the most commonly used DPI technique is the automata-based pattern matching technique, whereas the filter-based pattern matching technique is the least used. Among the special-purpose hardware used to accelerate the packet processing in DPI applications, the most used hardware is the GPU, whereas Application Specific Integrated Circuit (ASIC) is the least used hardware. This classification is expanded by adding other methods related to DPI techniques. Accordingly, determining the necessary parameters for the construction of powerful mechanisms to examine the complex network traffic is an important aim of this paper.

3.1 DPI related techniques

In the study numbered [5], DPI is classified as narrow and general scope. According to this classification, generalized DPI includes an examination of both the packet payload and header. In the narrow scope, DPI represents only payload-based detection, and the detection is performed by matching the payload with signatures. On the other hand, this classification, which accepts port-based and statistical-based

analysis as a DPI technique, is not valid because it ignores the task of examining packet payload, which is the most basic feature of DPI. Therefore, DPI is considered as a part of network traffic analysis (NTA) methods in this paper. DPI and DPI-related methods are shown with references to studies numbered [5, 11] and [12] (Figure 3).

3.1.1 Port based technique

Using the port-based technique in NTA is the most traditional technique for application protocol detection. This approach is used to detect the protocol using the port fields in the TCP/UDP headers. However, reasons i.e peer to peer (P2P) applications using random port numbers, the emergence of encrypted protocols, some applications using ports assigned to other protocols for deception and replacement of one protocol by another indicate that this method is not safe for identifying the application protocol [5,10]. HTTP protocol may be considered as an example of this case. The HTTP protocol is actively used to download or upload files. Hence, it replaces FTP, which is designed specifically for downloading and uploading files. Also, many P2P applications (skype etc.) use the HTTP protocol to bypass the firewall if other ports are blocked. Additionally, HTTP is used by social networks, geomaps, and video streaming services [42]. The fact that the port-based approach is insecure and insufficient to determine the application protocol leads to the application of this technique as an auxiliary technique in the analysis of network traffic. For example, the nDPI library [42] uses the port-based approach to determine the appropriate protocol decoder. By means of this approach, protocol detection time can be reduced.

3.1.2 Protocol decoding technique

Protocol decoding is another method of analyzing network traffic. This method may be considered as the DPI technique since it performs payload inspection. Protocols can be detected by using the protocol behavior as well as the characteristic protocol headers in this method. Therefore, this technique is based upon re-establishment sessions with captured packets at the application layer [5]. Different verification methods can be applied in the protocol decoding processes. Syntactical verification aims to check the accuracy of the transferred data in terms of syntactical. For instance, the HTTP headers must be present if there is an

HTTP payload. Verifiers must decode the message and ensure that the message is well-formed. Another method is protocol conformance. The process of confirming that the HTTP GET request is answered by the server in a valid manner may be considered as an example of this method. This method is more valid because it can verify the runtime behavior of the protocol when it compares to the canonical state machine. Inspecting the semantic integrity of the data is another verification method. For example, confirming whether an image object transferred by the HTTP protocol is actually an image or some other form of content [43]. The protocol decoding method, which needs a deep understanding of the application protocol, achieves high accuracy with a low false-negative rate. However, protocol decoding process is computationally intensive and time-consuming [5,12,42]. In this direction, the application of hybrid approaches in the analysis process of network traffic can be applied to improve performance.

The commercial PACE [44] software and the open-source nDPI library are examples of hybrid use of protocol decoding technique. PACE tool which has capable of detecting encrypted protocols uses ML techniques along with behavioral and heuristic analysis in the analysis of network traffic. nDPI is an open-source library that uses port-based approach, protocol decoding and pattern matching technique. In order to analyze encrypted network traffic, the nDPI library can perform protocol detection by using strings that match the metadata obtained from the network stream. In addition, nDPI supports DPDK which is a kernel bypass technology to minimize performance losses caused by the hardware or the operating system. There are many studies comparing the accuracy of nDPI and PACE libraries according to the degree of granularity in terms of detection of the application protocol [45-48]. According to these studies, nDPI is the library with the highest accuracy among the open-source classifiers, except for the study numbered [47]. In the study numbered [47], in which performances are evaluated according to different classification levels, nDPI is the best performing classifier at the protocol level, whereas PACE is the most successful technique at the application level. PACE is a commercial tool that cannot be accessed by the entire research community. nDPI is the most successful classifier among the open-source tools.

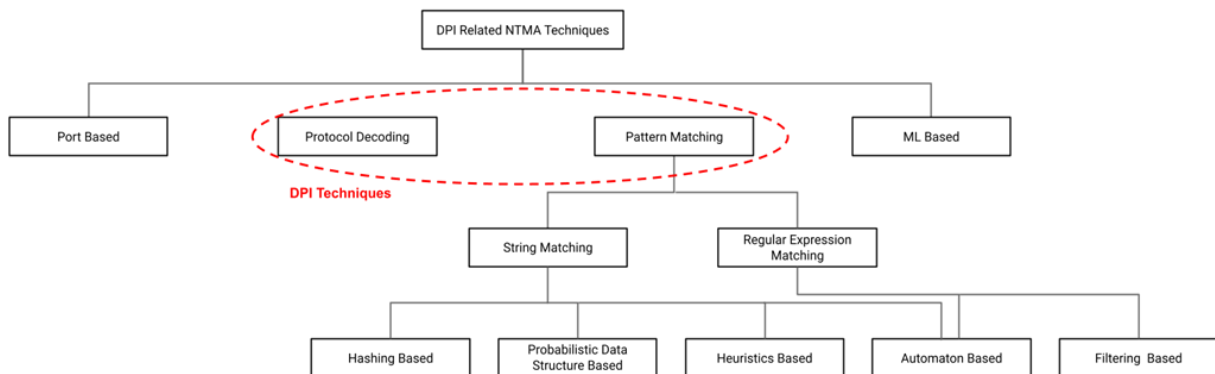


Figure 3. DPI related network traffic analysis techniques

3.1.3 Pattern matching-based technique

Pattern matching-based DPI methods can be implemented using hashing, heuristics, automaton, filtering or probabilistic data structure-based algorithms. These algorithms are based on string or *RE Matching* methods.

Hashing-Based Technique. Hash-based algorithms [49, 50] use the *string matching* method. This approach compares hashes instead of the contents of the packet payload with the pattern character by character. A hash value is calculated for each pattern of length m . At the same time, the hash value of the examined m -long substring is also calculated. If any pattern-substring matches are detected while the pattern is sliding over the target text, the pattern and substring are compared on a byte basis for verification. In addition to the study [51] in which the matching performance of hash-based Rabin-Karp (RK) [50] algorithm on IDSs is evaluated, there are some DPI applications that evaluates the matching performance of the parallel application of this algorithm on GPU [52, 53]. In the multi-pattern matching version of the RK algorithm performed on the GPU, each thread compares the hash code for all patterns starting from the position corresponding to the thread index. Thus, the matching process lasts too long, and RK is not an efficient algorithm for multi-pattern matching [53]. Additionally, the performance comparison of the RK from the point of execution time for variable-size network traffic is presented for both serial and parallel implementation in the study numbered [54]. RK algorithm parallelized on GPU outperforms the serial implementation encoded on CPU and increases the pattern matching speed.

Probabilistic Data Structure Based Technique. Bloom filter (BF) [55] is a probabilistic data structure used to represent a set for the purpose of performing membership testing. Using this data structure makes possible to query whether an element is present in the set at a low cost. BF does not produce false negatives. Indeed, if BF produces a result such as "The element is not present in this set.", it is true. However, there is also the possibility of producing false positives. BF may produce a result such as "Element is present in this set." for an element that is not present in the set. BF does not support delete operation. There are improved versions of BF which support deletion provide a better location or reduce the cost of space [56, 58]. A quotient filter (QF) [59] is a hash table that records fingerprints of elements to support deletion. In this data structure, encoding each entry is required additional metadata. This requires 10-25% more space than BF. In this data structure, table entry codes must be decoded before reaching the target element. Whereas the hash table is filled, operations increase at a similar rate. When the fill rate of the hash table exceeds 75%, the matching performance of the data structure drops dramatically [41]. CF is the membership query data structure in which elements can be dynamically added or removed. The biggest challenge facing CF performance is the use of three hash functions which causes additional computations. Quotient-based Cuckoo filter (QCF) [60] which uses only two hash functions has less

computational overhead than standard CF. This filter has higher insertion, query and deletion capability than CF.

Probabilistic data structures are used as a matching tool in many DPI applications [60-65]. In the study numbered [61], Prefix BF (PBF) and Chain Heuristic methods are proposed, which allow pattern matching without defragmentation in order to reduce the required storage space. The PBF data structure allows the detection of the prefixes of patterns. In this way, it is possible to detect patterns on more than one network packet. Chain heuristic increases system throughput by reducing the false positive rate of PBFs without using any additional memory. In the study numbered [62], a new BF architecture is proposed by using the pipelining technique which notably reduces the overall power consumption of the BF. In the first stage of a two-stage pipelined BF, hashes are always calculated. If a match is found between the input and the pattern, the hash values are calculated in the second stage. Implementing a small number of hash functions in the first step increases power savings. In the study numbered [63], a new BF is proposed in which both two memory addresses are compressed into one I/O block of main memory. With the help of this data structure, the number of memory I/O required for the membership query is reduced. Accordingly, the average query latency is also significantly reduced. In the study numbered [64], the DPI application is performed by using QF. The results obtained from the real dataset show that QF achieves higher efficiency (30%-75%) and improves false positive rate compared to BF. In the study numbered [65], CF is used as a DPI matching tool. The developed system provides a significant time saving of 93% compared to BF and 87% compared to QF. In the study numbered [60], CF performance is tried to be increased with a new proposal called QCF. The Analysis shows that applying QCF in a DPI application results in time savings of up to 77% at CF and up to 98% at BF and QF.

Heuristic Based Technique. Heuristic-based matching algorithms use string matching. The primary principle of this approach is to jump as many payload characters as possible by using some heuristics to speed up the matching. Single-pattern matching algorithm Boyer-More (BM) [66] and multi-pattern matching algorithm Wu-Manber (WM) [67] are examples of heuristic-based matching algorithms. BM is a heuristic-based algorithm that improves the performance of the search model by making situational skips. BM algorithm which carries out control from the right to the left performs shifts according to the rules of "Good-Suffix" (matched suffix of target text and pattern) and "Bad-Character" (unmatched character of target text and pattern). Besides the studies focusing on reducing the number of character comparisons to increase the performance and efficiency of IDSs [68-70], the studies applying the BM algorithm to detect known attack patterns [71-74] are presented as an improved version of the BM algorithm. An important aspect that limits the performance of the BM algorithm is that it cannot process multiple patterns in parallel. In this direction, WM which is developed as an advanced version of the BM algorithm has the ability to process more than one pattern

simultaneously. WM consists of two phases called preprocessing and scanning. In the preprocessing phase, basic calculations required for the scanning phase are made, and three tables are created namely SHIFT, HASH and PREFIX. The created tables are used for pattern matching in the scanning phase. In order to improve the performance of IDSs, the studies numbered [75], [76] and [77] focus on reducing the number of CPU cycles by reducing the number of unnecessary matching attempts, and they are presented as an improved version of the WM algorithm. In addition, the study numbered [78] is presented as an advanced version of the WM algorithm in order to reduce the performance losses caused by short patterns that result from short shift distance. The study aims to reduce the effect of short patterns that limit performance by splitting patterns into the different pattern clusters according to their lengths and processing these clusters sequentially.

Automaton Based Technique. Automaton-based approaches can use both *string matching* and *RE Matching* methods. The matching process in DPI is computationally intensive and time-consuming as processing each byte in the payload requires one or more memory accesses. This situation is negative for the DPI process. Therefore, the DPI performance is highly dependent on the pattern matching throughput indeed the performance of the FSM [5].

There are two types of FSMs; Nondeterministic Finite Automata (NFA) and Deterministic Finite Automata (DFA). In fact, the two FSMs are equivalent. An equivalent DFA with NFA can be created, and this DFA accepts the same set of patterns. The main difference that distinguishes DFA from NFA is that any DFA state has a single pass for each character leaving to the specific state. Any NFA state can switch to different states more than once for the same character. Accordingly, a DFA can have only one active state at any one time while a NFA can have more than one active state. As a result, a NFA and a DFA have completely opposite characteristics in memory bandwidth requirement. A DFA is a memory-intensive structure while a NFA is a computationally intensive structure. Most current research aims to strike a balance between storage and performance [79-81].

RE defines a search pattern such as languages, or a set of strings. This structure can represent a set of exact strings while the exact string can represent only one string [5]. REs are widely used in many open source and commercial DPI applications under favour of their powerful and flexible detection capability [82-84]. A new RE-based DPI system that can process out of order packets without performing packet buffering and stream reassembly is proposed in the study numbered [85] that aims to improve the accuracy and speed of pattern matching, besides the studies numbered [86], [87] and [88] focusing on the creation of memory-efficient architectures for the RE pattern matching process. Exact-match strings, the simplest type of REs, are fixed-size patterns. Automaton-based Aho-Corasick (AC) [89] algorithm, which has a faster matching power than complex REs, is widely used for *string matching* by means of its easy implementation. Application of the AC algorithm in the pattern matching process makes the cache space useless for

large state transition tables. As a result of this situation, the matching speed decreases for large pattern datasets. Compressing a transition table in order to reduce the memory requirement and effectively use cache is one of the research topics of the AC algorithm. Whereas some improved AC algorithms [90-93] focus on reducing memory space required for storage of automata, the study numbered [94] proposes a variable stride pipelined Aho-Corasick Deterministic Finite Automaton (AC-DFA) to reduce the number of memory accesses and energy consumption in the pattern matching process. In addition, DPI is applied by using the AC algorithm in IDSs developed on the study numbered [29] and [31] platforms. However, the memory requirement of the AC algorithm using the large state transition tables and the slowing of the matching speed for large pattern datasets show that this algorithm cannot be a suitable solution especially for GPU-accelerated DPI applications as discussed in the studies numbered [95-97] and [98].

Filtering-based Technique. A filtering-based approach relies on excluding the parts of the input data that do not match the pattern. Multi-pattern matching algorithm DFC [99] which increases pattern matching performance by significantly reducing the number of memory accesses and cache miss compared to the AC algorithm is an example of filtering-based matching algorithms. DFC consists of three stages called initial filtering, progressive filtering and verification. In the initial filtering stage, A direct filter (DF) that does not require hash computation and uses a sliding window is constructed to exclude parts of the input data that do not match the pattern. In the progressive filtering stage, multiple layers of DF are constructed to categorize patterns based upon length and filter the window incrementally. In the last phase, the input is compared with the patterns to verify whether an exact match occurs. The studies numbered [39] and [40] in which the inspection is executed in the secure enclave can be given as examples of the use of the DFC algorithm. Also, in the study numbered [82], it is used a filtering system for *RE Matching* to exclude flows that include no segment characteristics of RE.

3.1.4 Machine learning based technique

Some legal restrictions to prevent access to the packet payload due to some reasons such as protecting the privacy of users [100] encourages researchers to use different methods for examining network traffic. The statistical methods collect payload-independent variables i.e port numbers, packet length, flow start/stop timestamp and inter-arrival time of packets in a stream to analyze the network traffic and predict which application or protocol the traffic may belong to [5, 101]. In many studies, Machine Learning (ML) algorithms are used [102-104] besides statistical methods [105-107] to classify network traffic. The studies numbered [103] and [104] use TLS header information and DNS data as well as flow metadata in the analysis of network traffic. ML is a subset of Artificial Intelligence (AI). AI approach aims to implement human-like AI by creating a set of rules. Although this approach successfully completed well-defined tasks, it is insufficient to perform more

complicated processes i.e image processing. ML is developed to overcome such challenges. DL approach which is a subdomain of ML uses Deep Neural Network (DNN) to get data representation at each layer [108]. The relationship between AI, ML and DL is shown in Figure 4. The number of layers used to model the data is defined as the depth of the created model. DL models may have hundreds of consecutive layers to handle complex tasks. Traditional ML algorithms are inadequate for the analytical requirements of modern networks. This situation increases the popularity of DL in the application of NTMA techniques [1].

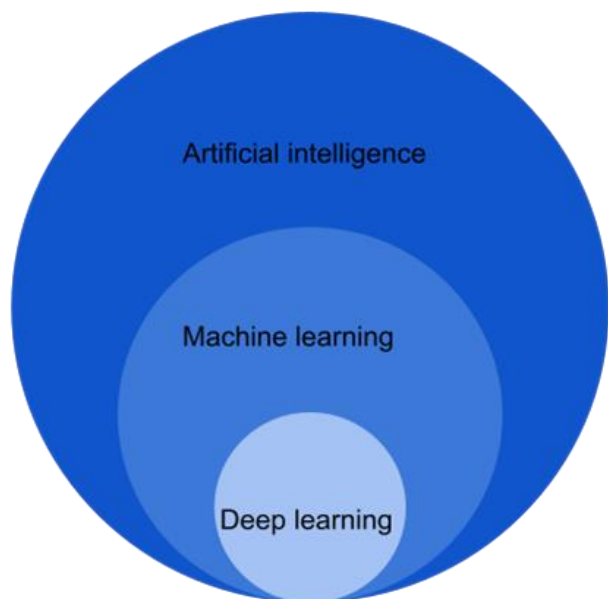


Figure 4. Relation between AI, ML, and DL

In a ML system, it requires expertise to create a feature extractor that converts raw data into a convenient representation [109]. Because DL algorithms use automatic feature learning, they remove the requirement for feature engineering in traditional methods. This characteristic of DL models is important for NTMA methods as a major part of the network traffic are unlabeled or semi-labeled [110]. Some useful features that cannot be detected by manual feature engineering can be detected by DL algorithms. Accordingly, many NTMA applications [111-114] implement by using DL algorithms.

There are many disadvantages that affect performance in the process of performing NTMA techniques using ML approaches. The success of ML methods highly depends on the quality of data used for training. The networks trained with low-quality data result in unsuccessful NTMA implementations. In this process, DL algorithms need large amounts of network traffic data. The most of data are unlabeled or semi-labeled in the network applications [110]. However, labeling this data is time-consuming and computationally labor-intensive. Accordingly, training DL algorithms with a great number of training data and variables requires rich devices in computing, memory and power resources. On the other hand, resource-constrained AI-based devices such as IoT devices are insufficient to fulfill this

requirement. Also, ML-based models need to be retrained at frequent intervals to adapt to new situations in the network such as security violations or network behavior changes. Besides, high complexity in the training phase causes DL models to consume too many resources and time. Accordingly, DL models need to be improved from the point of time and resource consumption. Another issue to be evaluated in process of training the networks is about the use of the dataset. DL techniques must be trained by specific datasets collected from the network traffic and labeled with high accuracy due to the heterogeneous nature of networks. Accuracy of DL techniques trained by public datasets may decrease in several networks [1,115].

3.2 Acceleration techniques for DPI

Many techniques are proposed to accelerate packet processing in DPI applications. The hardware-based methods use special-purpose hardware such as FPGA, TCAM, ASIC, and GPU to reach high matching speed with device parallelism. The methods that propose TCAM as a hardware acceleration tool are based on TCAM's parallel processing capability [36,37,116]. The studies numbered [37] and [116], which propose TCAM based multiple pattern matching algorithms that allow multiple characters to be processed at once, aim to increase the matching speed by reducing the number of TCAM searches. The study numbered [36] is another schema that proposes TCAM based multiple-pattern matching algorithm. Unlike the algorithms proposed in studies numbered [37] and [116], this algorithm does not use any of the existing DPI techniques for packet processing. In this algorithm, patterns with a pattern length less than or equal to the specified TCAM width are classified as simple patterns. The pattern matching process for the simple patterns is as follows: The first w byte in a packet is mapped into TCAM to detect a match. Then, one byte is shifted, and the process is repeated. This iteration is performed for the entire packet. The first step of the pattern matching process for long patterns is to identify the prefix and the suffix patterns. Then the prefix patterns are combined with the corresponding suffix patterns. Three tables are stored in memory to perform this process. These tables are: Pattern table, Partial Hit List and Matching Table. FPGA is another hardware solution used for pattern matching. FPGAs consist of programmable logic blocks and interconnections between these logic blocks. These logic blocks and interconnects can be reprogrammed according to the desired purpose. Thanks to its reprogrammable and parallel processing capability, FPGA is one of the important solutions used for pattern matching. In order to achieve high pattern matching speed with device parallelism, many studies using FPGA aim to maintain a balance between storage and performance [79-81,117,118]. ASIC is an integrated circuit designed to perform a specific task, unlike general-purpose microprocessors. ASIC can run faster compared with programmable logic devices or logic integrated circuits. Despite their small size and low energy consumption, ASIC production is an expensive and time-consuming process. In the study numbered [119] developed ASIC for IDSs, FNP multiple pattern matching algorithm

which reduces the number of memory accesses and improves pattern matching performance is presented. FPGA has a more flexible structure than ASIC. However, programming difficulties of the FPGA prevent its widespread use [120].

The software-based methods using general-purpose processors provide greater flexibility and programmability compared with the hardware-based solutions. In the studies numbered [121,122] and [123], approaches that combine the advantages of NFA and DFA applications are proposed in order to benefit from multi-core architectures efficiently. It is aimed to increase the matching performance by using the existing parallelism provided by multi-core processors with the algorithm proposed in the study numbered [121] in which complex REs are divided and assigned to different cores. In the study numbered [122], a new pattern matching algorithm HBM is proposed by combining DFA and NFA. According to this algorithm, the pattern matching process has two stages: Head DFA (H-DFA) and body NFA (B-NFA). While H-DFA processes the pattern up to a certain length, it uses less memory space than AC algorithm. In the B-NFA phase, the matching process is applied over the entire pattern by using a variable stride data structure. Also, Single-Instruction Multiple Data (SIMD) approach is used for accelerating the matching process. In this direction, the HBM algorithm focuses on reducing the used memory space and increasing the matching speed. Contrary to the HBM algorithm which creates the head-body finite automaton according to the predefined depth values, the FHBM algorithm proposed in the study numbered [123] divides the head and body parts according to the head size. Accordingly, this study proposes an algorithm focusing on increasing the efficiency obtained in the pattern matching process by providing a more flexible structure in terms of AC-DFA partitioning.

After the development of high-speed networks, traditional approaches using CPUs become inadequate in meeting network packet processing speed requirements. Accordingly, GPU with superior parallel processing capability can be used to provide high matching speed compared to CPUs [97]. GPU is a multi-threaded and multi-core processor with high computational power. Therefore, GPU is well-suited to handle parallel computing problems with high arithmetic intensity. In 2006, NVIDIA introduced CUDA which is a parallel computing architecture to solve many complicated computing problems more efficiently than CPU. CUDA leverages the GPU's capabilities to increase computational performance [124]. CUDA-supported GPU cards consist of a Set of Stream Multiprocessors (SM), and each SM contains a Set of Stream Processors (SP). SMs are designed with a Single Instruction Multiple Thread (SIMT) architecture in order to run hundreds of threads simultaneously. In any clock cycle, each SP executes the same instruction by processing different data. The threads are organized according to warps. The warp is a structure that consists of 32 parallel threads, and it is the time unit of SM. A warp performs only one command at a time. Therefore, a high level of performance can be reached when all threads in the warp have the same instruction path.

GPU has performance sensitivities as well as its superior performance in computationally intensive tasks and parallel computing capability. The organization of warps significantly affects performance. The maximum performance can be achieved when threads in the same warp execute the same instructions. Otherwise, computations in the warp are done sequentially, resulting in processing latency. The warp executes each branch serially if threads in the warp have different execution paths due to any sort of divergent conditional branching. This situation which is called as thread divergence causes increasing the total time of executing instructions in the warp. Bank conflict is another factor that causes performance sensitivity. The multiple threads requesting access to the same bank at the same time results in bank conflict, and this situation increases execution time. Another factor limiting performance is the difference in access latency of GPU memory areas used in the packet processing. CUDA threads can access different memory areas while they are executing. Each memory area has its own individual purpose, accessibility and speed of access. Each thread block has a shared memory that can be accessed by all threads which belong to that block has the same lifetime as the block. It is possible for all threads to access the same global memory. The shared memory has less memory than the global memory. Like any device memory hierarchy, the local memories on GPU have less access latency than the global memories. Accordingly, executing the packet processing in shared memory instead of global memory reduces packet processing time [98].

In DPI applications, high-density computing and the speed factor are important. Therefore, GPU usage is common due to its high computational power and convenience for parallel computing problems [38,96-98,125,126]. In DPI applications based on GPU, performance sensitivities of this hardware are mostly emphasized, and it is aimed to make maximum use of GPU's parallel processing capability. Whereas the studies numbered [98] and [125] focus on reducing the used memory space, another study numbered [97] aims to increase the performance by reducing the processing load of GPU by using a pre-filtering mechanism on the CPU. In addition, BF, QF, CF and QCF probabilistic data structures are used as matching tools in many DPI applications. In the study numbered [38] performed by using CF on GPU, the parts of global memory that threads in the same block frequently access are detected and transferred to the shared memory. Then, it is aimed to reduce the execution time of threads by using the shared memory instead of the global memory. This approach only detects memory regions that threads access frequently. Infrequently accessed memory regions are accessed by using global memory. As a result, this approach cannot guarantee that all threads access only shared memory. Therefore, memory access latency in the study numbered [38] is much higher than the study numbered [98] that uses the P3FSM algorithm encoding the DFA state transition table to fit in the shared memory of GPU.

3.3 DPI over encrypted traffic

According to Google's September 2022 transparency report [35], 95% of traffic using the Chrome platform is HTTPS. The applications that require detailed analysis of the packet payload are completely disabled by the TLS protocol. Examples of these applications that are negatively affected by HTTPS are content filtering, IDS/ Intrusion Prevention System (IPS), Data Loss Prevention (DLP), fraud detection, parental control, ad blocker, transcoding and compression [127]. Additionally, the inability to detect user and session identifiers, URLs or timestamps due to encrypted traffic reduces the efficiency of repair services in troubleshooting difficulties or application layer problems. RFC8404 [128] points out that information provided by the application is insufficient in the absence of network packets to analyze. Therefore, new approaches are required to use existing techniques such as DPI to analyze encrypted traffic. Another research topic in the inspection of encrypted network traffic is the security of Middle Boxes (MB). With the advent of Network Function Virtualisation (NFV), dependence on specialized and expensive hardware decreases in the distribution of MBs responsible for performing network functions such as IDS or firewalls. The distribution of software-based MB functions starts to gain importance. Accordingly, MBs move from a hardware-based device to a cloud infrastructure that provides more flexibility. However, transferring data that is internally examined to the MB provider for processing raises security and privacy concerns [129,130]. This prompts researchers to develop different methods for examining network traffic.

This section focuses on suggested methods to perform an inspection on encrypted traffic. In this regard, inspection

methods on encrypted network traffic are shown with reference to the studies numbered [127] and [131] (Figure 5).

The classification in Figure 5 is based on whether the encrypted network traffic is decrypted or not. MITM, AC, and TH methods analyze network traffic by decrypting encrypted traffic, whereas Searchable Encryption (SE) and ML approaches perform their investigations over encrypted network traffic. The details of these approaches are presented in this sub-section, with the exception of the ML approach. The application of NTMA techniques using ML approaches is discussed in sub-section 3.1.4. However, it is important to evaluate the ML technique together with techniques developed for the analysis of encrypted network traffic. For this reason, in this sub-section, a comparison of the ML technique with the others is presented. In addition, a comparison of all the techniques developed for the analysis of encrypted network traffic is presented

3.3.1 MITM technique

MITM technique is implemented by establishing two TLS sessions, both between client-MB and MB-server. This approach requires the client to install the MB's root certificate [132]. The root certificate allows the MB to identify itself as a server to the client by copying and signing a new certificate based on the server's credentials. In this way, encrypted traffic originating from the client can be decrypted and analyzed by MB [133]. Then, MB re-encrypts data on behalf of the client and transmits it to the server via the second TLS session. MITM technique for encrypted traffic analysis is widely used in the applications such as antivirus and parental control, also incorporates network solutions [134-136]. There are also widely open-source tools such as MitMProxy [137] and SSLSplit [138].

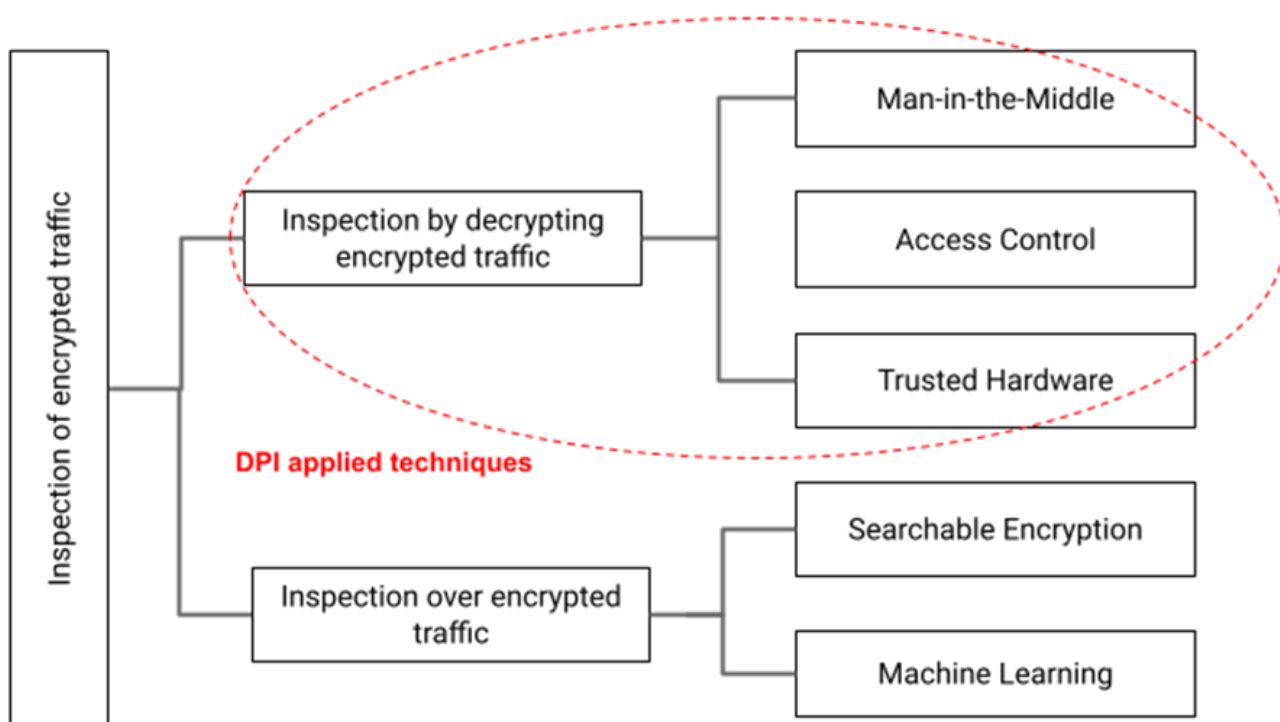


Figure 5. Methods for inspection encrypted traffic

3.3.2 SE technique

SE method tries to detect malicious traffic via token matching without decrypting the encrypted traffic. In this technique, the SE schema is used to perform a mapping between encrypted keywords and rule sets [127]. The study numbered [139] is the first DPI schema using the SE technique and protecting privacy. In this schema, the client establishes a TLS connection with the server and a second connection for token matching. Both of these connections are routed through MB. MB contains a rule set that is encrypted using a key derived from the session key of the TLS session. The client tokenizes and encrypts the message by using the same key. Then, it transmits the tokenized message by using the second connection. MB tries to match tokenized traffic with encrypted rule sets. When a match is found, traffic is considered malicious and blocked. In this schema, MB inspects only tokenized data. Thus, the SE technique has very limited functionality compared to the inspection performed on the unencrypted traffic. The study numbered [130] is designed as the first system handing over MBs to cloud providers while keeping network traffic private. In the study numbered [139], PrefixMatch which is a new and fast encryption schema is proposed in order to reduce the overheads arising from the cryptographic computations. In addition, the limited functionality of this study is extended by supporting different SE schemas that can be used for different MB services such as parental filter, IDS or firewall. The study numbered [140] which reduces the overhead from cryptographic computations in the study numbered [139] and memory space needed to perform MB functions uses decryptable SE [141] schema based on public-key cryptography. This schema replaces the existing TLS protocol by using a different approach to deploying the public key operation. As for the study numbered [142] presents another schema by using public-key encryption. Unlike the symmetric encryption schemas used in the study numbered [139], public-key encryption schemas increase functionality and reduce efficiency and overhead from the cryptographic computations during the setup phase. In contrast to the study numbered [140], the study numbered [142] uses public-key operation only in ML-based inspection for malware detection. The study numbered [139] uses a garbled circuit to generate encrypted rules used to examine encrypted traffic. However, setup latency and overhead size caused by garbled circuits are high. In this approach, computational and communication overheads are repeated as encrypted rules are created for each new session. In the study numbered [133], an obfuscated rule generation technique is proposed that provides better performance in encrypted rule generation and does not use garbled circuits. The intermediate values which can be reused in subsequent sessions are generated for repeated tokens by using a reusable obfuscation mechanism in this approach. Accordingly, this approach provides performance gain by reusing the rules, and it is aimed to accelerate the encrypted rule generation process by reducing the computational and communication overheads in the study numbered [139]. The

study numbered [143] provides hiding of rule sets from MB with significantly improved performance over the studies numbered [133] and [139]. Rule hiding is enabled when MBs are in untrusted cloud providers. Two schemas that host MBs in cloud providers and implement different approaches in these providers are presented in the studies numbered [144] and [145]. The study numbered [145] is based on two cloud systems where each rule is XORed with a random string and is split into many blocks to MBs located in one of the cloud systems. The cloud systems compute blocks together to be able to inspect the network traffic. The schema which has a two-layered architecture presented in the study numbered [144] is deployed on two non-colluding servers. The first layer filters the legitimate packets using BF. The second layer supports the exact rule matching for network packet analysis by using the conjunctive SE schema [146]. In addition, the results of the inspection are verified with the cuckoo hashing method.

3.3.3 AC technique

AC technique that allows traffic to be decrypted is an approach based on the client and the server accountability. In this technique, the client and the server are aware of all the MBs deployed between each other. The prominent feature of this technique is that MBs are visible to endpoints which decide MBs' right to access encrypted traffic. A flexible control mechanism that is provided with AC decides whether the data can be decrypted or not [147]. The study numbered [147] allows to exchange read and write secret keys besides session keys by modifying existing TLS protocol so that the client, MB and server establish a secure and authenticated channel. In this approach, MBs' access rights to encrypted traffic are determined by read/write keys. The inspection is performed on segmented encrypted traffic by using these keys. However, the main problem with this approach is that it changes TLS protocol. The study numbered [148] which does not change the underlying TLS protocol provides scalability for applications to use cloud-based MBs. It also leverages the secure enclave of the Intel SGX trusted hardware to isolate MB from cloud infrastructure. Another schema that aims to make MBs visible and auditable is presented in the study numbered [149]. MB certificates used to encrypt the channel are defined for each TLS segment to eliminate insecure practices i.e installing private root certificates by users or sharing private keys by servers with third parties. These certificates are logged on an MB transparency log server so that MBs can be audited. In addition to auditable MBs, the MaTLS protocol which ensures the security of MBs is designed in this study. This protocol includes security objectives such as server, MB and data source authentication, segment and individual secrecy and path integrity.

3.3.4 TH technique

TH is a technique where inspection is performed in the secure enclave of the Intel SGX trusted hardware while maintaining confidentiality. The basic principle in this approach is that the client or the server shares the session key with the secure enclave in the MB. The process of

decryption, inspection, and re-encryption are implemented in the secure enclave. MBs and service providers holding these MBs cannot access decrypted data [131]. The studies numbered [39] and [150] can be given as examples of the efficient schemas in which the inspection is executed in the secure enclave. In these studies, DPI is applied as the MB function. In the study numbered [150], an intrusion detection and prevention system (IDPS) is implemented by using the AC algorithm. In the study numbered [39], IDS is implemented by using DFC algorithm, which increases pattern matching performance by significantly reducing the number of memory accesses and cache miss compared to the AC algorithm, and PCRE2 library [151] for RE matching. In the study numbered [150] which presents a Click-based interface for designing and implementing network functions, the inspection of network traffic is performed in the secure enclave in MB located on the client, unlike schemas where MB is deployed between the client and the server. However, a decentralized system model which requires SGX-enabled hardware support for all client systems has high deployment costs [39]. The study numbered [39] which offers programming abstraction for MB developers to securely process encrypted traffic uses high-level APIs in a safe language, RUST [152] and boundary checking mechanism [153] to mitigate potential memory safety attacks [154] on enclave code. There are also studies aimed at the efficient deployment of MBs to untrusted cloud providers and providing secure MB functions by applying the TH technique in the NFV environment [40,155,156]. The study numbered [155] which uses the DPDK library for I/O operations in network packet processing uses the AC algorithm as a MB function in DPI implementation. This schema that allows the cloud provider to see only encrypted traffic protects rule sets and network function codes from the cloud provider. The study numbered [156] which presents a Click-based interface by using ready-to-use elements and C++ extensions to design and implement various network functions leverages SCONE [157] which is a shielded execution framework based on Intel SGX to securely handle network packets. Additionally, the Hyperscan RE library [158] is used to implement DPI as a MB function in this study which uses the DPDK library for I/O operations in the network packet processing. The study numbered [40] improves functionality and security of TH-based schemas such as the studies numbered [148], [155] and [156], and SE-based schemas such as the studies numbered [130], [139], [140], [142] and [145]. It maintains confidentiality of the network traffic metadata such as packet size, count and timestamps in addition to the L4 payload of the network packet. The study which uses the DFC pattern matching algorithm in the application of DPI as MB function suggests using DPDK and Netmap libraries for I/O operations in the network packet processing. In addition, the study numbered [148] using the AC technique benefits from Intel SGX trusted hardware to isolate MB from the cloud infrastructure.

3.3.5 Comparison

MITM technique is safe as long as a root certificate is securely stored, a current TLS version is used, and

decryption is done in a controlled manner through whitelists that contain data not to be decrypted. However, this approach may weaken TLS security on several counts. The proxies that implement the MITM technique are responsible for the certificate validation process while communicating with the server. The issues such as accepting any certificate which certificate chain cannot be verified or trusting an expired Certificate Authority (CA) list may weaken TLS security. Some distributions may be insecure due to weaknesses in implementing core protocols, i.e allowing deprecated cipher suites, and MITM proxies not being updated with patches against newly discovered vulnerabilities. Also, simple MITM attacks are possible when the same key is used on all systems using the same product. Creating product-specific root certificates dynamically and protecting the associated private keys are important for this reason. Another security problem of the MITM technique is related to accessing decrypted data. It is difficult to determine devices to allow access and monitor network traffic in a large network with heterogeneous network devices [133, 134, 159].

There are many studies examining the effect of network solutions by using the MITM technique on TLS security [134-136]. In the study numbered [134], a TLS testing framework is proposed to analyze antivirus and parental control applications by using the MITM technique for encrypted traffic analysis. The security vulnerabilities of TLS proxies analyzed against known attacks are detected. The support of proxies for different TLS versions is tested, and the shortcomings of these proxies in the certificate validation process are investigated. Additionally, the matters of whether applications dynamically generate product-specific root certificates and protect the corresponding private keys are investigated in this study. The study numbered [135] examines the prevalence and impact of HTTPS interception. TLS handshakes generated by browsers, security products and malware are characterized. The heuristics are created that enable web servers to detect HTTPS interception and TLS proxies. Then, these heuristics are implemented in the different networks. The negative effects of solutions that weaken TLS security by using the MITM technique for encrypted traffic analysis such as corporate MBs and antivirus control applications on connection security are also discussed, and the security vulnerabilities of these solutions are emphasized. The study numbered [136] presents a framework to detect potential security vulnerabilities by analyzing TLS Proxy features of different network devices. The study which focuses on the risks and vulnerabilities of using TLS proxies explores security issues related to the protection of private keys, patching against known attacks, certificate validation and the use of appropriate TLS version and CA trusted lists.

AC technique provides more flexibility to protect the confidentiality of data compared with the MITM technique. It does not require special cryptographic primitives as in SE. On the other hand, it changes the TLS protocol as the client, the server and all MBs must agree on schema to be used. Moreover, it is not clear how to set the access policy for MBs in the AC technique alike the MITH technique [131].

TH method does not require changes in TLS protocol like SE, MITH, and ML techniques. However, the session key must be securely transferred by the client or the server to trusted hardware. Without the disadvantages of the MITM technique, this method allows MB to examine encrypted traffic in a protected environment. Therefore, decrypted packets do not leak out of the environment. The secure enclave has limited storage, memory and computational capabilities. For this reason, it is not practical for TH technology to perform any inspection in the secure enclave. The main concern of TH-based solutions is the security vulnerabilities due to the success of attacks such as side-channel [160] against Intel SGX. The hardware deployment and the cost of trusted hardware are also among factors limiting to use of this technique [131,155].

SE-based techniques cause additional overhead in the setup process as they require the generation of tokens and encryption of rule sets. However, the matching is done in only MB, so the setup phase of SE techniques is more inconvenient than the inspection phase due to the performance losses. SE technique except for the study numbered [140] performs a confidential inspection without any changes to the underlying protocols [131]. Inspections using this technique which not require decryption and re-encryption only require the comparison of rulesets to tokenized data. This approach provides a limited control mechanism as inspection is not performed on decrypted packets. However, the studies numbered [133], [139] and [144] using this approach can also perform DPI processing for deeper analysis of traffic when suspicious flows are detected. Alike the schemas in the study numbered [139] require a separate channel to transmit tokenized traffic. In these cases, the client and the server must have the installed schema so that the MB can inspect the inbound and outbound traffic. That is, it requires to change in the structure of the existing encrypted traffic setup. In addition, security and privacy concerns about the use of this technique are resulted from attacks such as leakage-abuse [161], reconstruction [162], inference [163] and passive [164] on SE technique.

ML technique does not perform decryption while analyzing network traffic. This approach represents an ideal solution in terms of the security and application settings as it does not require any changes to the existing setup. The technique is advantageous compared to the AC technique which changes the TLS protocol or MITH, SE and TH techniques which require changes in the client and server settings. The inspection using ML techniques has inherent limitations on data that can be analyzed. The main concern about the ML technique is whether it completely meets security requirements. The inspection on headers and metadata only is insufficient for cases of using that also require analyzing over payloads [127]. Attackers carry out their attacks over encrypted channels by using encrypted traffic to disguise themselves [140, 165]. The ability to have information from both the packet header and the payload provides control over communication between two endpoints. The analyzes performed on the packet header only are insufficient to detect whether the packet contains malware. For this reason, it is necessary to examine the

packet payload to detect attacks that can be performed on encrypted channels. This approach helps to neutralize the danger of hidden threats [132]. Therefore, it creates a motivation to access plain text data. Accordingly, MITH, AC, TH and some SE schemas [133, 139, 144] achieve a similar efficiency with analyzes that are performed on unencrypted traffic data.

4 Ensuring security with DPI

Identifying issues that threaten the security of the network is an important and current issue for DPI. IoT and SDN, which are architectures that generate state-of-the-art network traffic, have many difficulties in ensuring security due to their structure. In this section, difficulties in ensuring the security of IoT and SDN structures are emphasized, and the role of IDSs is evaluated in this regard. In addition, applications of the DPI method on IoT and SDN architectures are examined, and the DPI method is evaluated together with the other techniques commonly used in IDSs. DPI can be applied as a single technique in IDSs, or it can be used as a component of a hybrid system by combining with other techniques. In Figure 6, the classification of IDSs as for the using method is showed by giving references to the studies numbered [166], [167] and [168].

In DPI-based IDS systems, IDS alerts when the attack pattern matches the input stream. A signature is defined for each attack, and as regard to the number of these attacks increases the cost of storage increases. Anomaly-based IDS has an initial stage in which data is collected about the usual behavior of the observed system. A threshold value is set when suspicious behavior is encountered in order to alarm IDS. Unlike the signature-based method, this ML-based technique can detect unknown attacks. However, as mentioned earlier, it has many disadvantages such as the lack of labeled data, the computational cost, the difficulties in retraining or poor quality data [1]. This technique has a very high false-positive rate as there may be deviations from the threshold value. It also has a relatively high false-negative rate since attacks may show small deviations that are considered within the norm. It is recommended to overcome the disadvantages of the two methods by creating a hybrid system. The hybrid IDS system created by the combination of the anomaly and the signature-based techniques aims to balance high storage cost and the limited attack detection of the signature-based technique with high computational cost and false positive rate of the anomaly-based techniques [169]. In the hybrid schema, the signature-based technique is used to detect known attacks, whereas the anomaly-based technique is used to detect unknown attacks [170]. Specification-based IDSs can detect intrusions when a deviation from usual behavior occurs alike anomaly-based IDSs. The specifications are developed manually and usual system behavior is detected. These behaviors indicate usual system behavior, and new behavior is verified according to the specified operations [171].

4.1 SDN security with DPI

In traditional networks, all network functions are performed by network devices such as switches, routers or MB. These devices can be supplied by a single vendor or

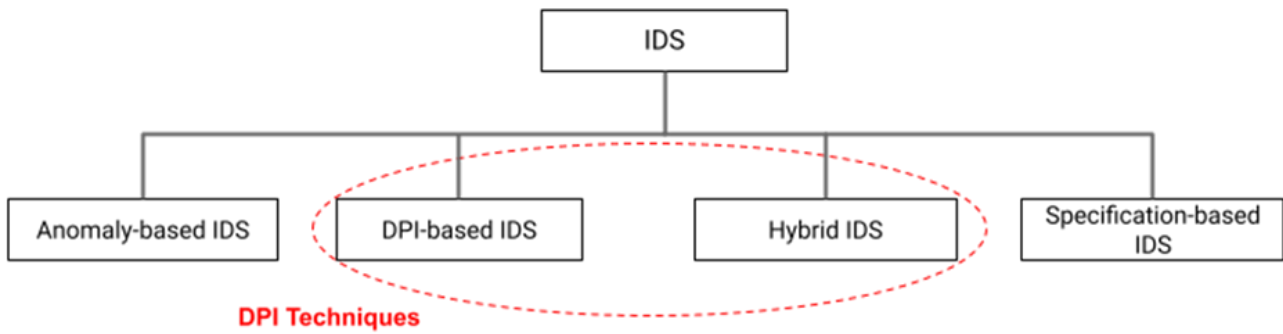


Figure 6. Classification of IDS

multiple vendors. Using network devices from a single vendor reduces innovation and makes it harder to change on the network. The dependency on multiple vendors can increase the complexity of the network [130, 172]. As a solution to these problems, SDN and NFV technologies are developed. SDN is a new networking model in which routing hardware is distinguished from the control plane. It significantly simplifies network management while facilitating innovation and evolution. Network intelligence is centralized in the software-based control plane. The network devices become simple programmable packet routing devices, forming the data plane [173]. NFV implements the network functions via software virtualization techniques and executes them on commodity hardware. These virtual appliances eliminate both the cost of dedicated hardware and energy reasons why running a separate device for each function in various parts of the network. In this way, NFV is an innovative step towards the implementation of the lower-cost agile network infrastructure [174]. However, one of the major barriers in NFV is ensuring that the network performance becomes as good as the purpose-built hardware implementations. Virtualization can cause unusual latency and throughput instability even when network infrastructure is not used at full capacity [175]. The agility provided by a programmable network infrastructure under central control, the fast updating and the easy maintenance facilitate the implementation of virtualized network functions. In this respect, SDN and NFV are complementary technologies [172].

Some security vulnerabilities may arise in network components of SDN architecture and in their relationships due to natural changes [176]. Introducing new interfaces and protocols also leads to the occurrence of new attack interfaces and exploitable targets. The network structure created with SDN may be insecure in case of not taking precautions against the security threats originating from SDN architecture [177]. The determination of preservation architectures for the control channel or another interface in SDN architecture must be made by considering services and protocols that use the channel. The traffic on the communication channels may be intercepted, and this traffic data may be used by the attackers to compromise the assets in the network when the channels and interfaces used for data exchange are not sufficiently secured [178, 179].

Adoption of using cloud infrastructure and virtualization of network functions contributes to the improvement of SDN security by ensuring integration of different security functions. The hardware-based security functions such as IDS, IPS or firewalls begin to be implemented as software-based network functions on commodity hardware by virtualizing in SDN intertwined with NFV technology [180]. Whereas these security services can run anywhere in the network topology, they can also be shared and moved between different security clouds. Accordingly, virtualized security contributes to the scalability of SDN security. The network elements avoid the additional resource cost required to run complicated and resource-consuming security functions with the help of this approach. There is a reduction in the controller processing load when the processing of security functions is transferred to the external data processing systems. This contributes to improve SDN performance [172].

DPI techniques are widely used in IDS applications created to ensure network security in SDN. In addition to the studies that present the systems created by applying DPI engines that perform signature detection on SDN controllers [181-183], there are also some studies supported by an anomaly-based IDS to determine unknown or zero-day attacks such as the studies numbered [13] and [184]. In the study numbered [13], which points to the use of the DPI technique as a security solution for smart grids, a SDN-based security monitoring framework by using a hybrid model of the DL approach and DPI technique is presented. A hybrid system design for the classification of QoS categories is also presented in the study numbered [185] different from the studies which purpose of network security. In this study, a SDN flow classification framework by using DPI and ML-based classifiers is proposed. DPI technique is used to label flows with specific applications to create a partially labeled dataset. Then, the classifier is trained with this dataset and used to identify QoS categories corresponding to different application flows.

In traditional networks, DPI engines implemented in the hardware MBs can be virtualized and dynamically deployed as parts of the software on the commodity hardware by using software-defined networks intertwined with NFV technology. Using such virtual DPI engines is costly from the point of license fee and power consumption [172]. Accordingly, it is important to design low-cost DPI engine

deployment strategies that supply with cybersecurity operational constraints. In order to that, a method based on genetic algorithms and optimizing the cost of DPI engine deployment is proposed in the study numbered [186]. In this direction, an approach reduces the DPI engine number, the global network load, and the number of unanalyzed flows. As a result of analyzes performed with different traffic types, the cost can be reduced up to 58% with this multi-purpose optimization approach. However, this approach is not scalable for the larger networks. Therefore, his problem is handled with the integer linear programming (ILP) method in the study numbered [187]. The validity of designed centrality-based greedy algorithm is evaluated by comparing with the ILP solution, and the complexity in the study numbered [186] is reduced. The experiments using real traffic data show that the proposed approach is 20-25 times faster than ILP, and it is a scalable solution that can be applied for large networks. The proposed cost-optimization-based approaches determine the number and location of DPI engines to be deployed to the network. This method can also be used at runtime to dynamically adapt DPI features.

4.2 IoT security with DPI

IoT composes large number of interconnected devices. These appliances accessed over the internet are interconnected by sensing, communication and computing capabilities. There are many terms that form the basis of IoT i.e machine-to-machine (M2M) communication and sensor networks. These terms are a form of communication that machines interact with each other without any human interaction [188]. The importance of security and privacy for providers and end-users increases the interest in the classification of the network traffic in IoT. The classification of the network traffic also consists of many solutions for the other fields i.e intelligent home systems and health care [10].

The scale of network traffic generated is much larger than in other scenarios because the IoT network has a great number of devices. The variety of services that led to this large scale also caused the traffic flows to grow rapidly. In addition, new obfuscation techniques resulting in more sophisticated and malware traffic allow malware to reach their targets in less time. For these reasons, the traffic in IoT is more complicated than other types of network traffic. This causes great difficulties in the examination of the network traffic [189].

IoT devices in large-scale network traffic are faced with serious security problems. The security violations on interconnected IoT devices can expose confidential information such as audio and video recording, email and passwords. Moreover, poorly designed devices allow various commands to be executed on them and reconfiguration of the firmware [190]. IoT devices have a wide distribution and interact with each other. Therefore, such malicious behavior may endanger the security of the entire network. Mirai is an example of IoT-specific developed malware [191]. This cyber-attack leads to a large-scale DDoS attack by using compromised IoT devices.

The host-based security solutions are inadequate to protect themselves for most smart devices. These

shortcomings arise from a lack of physical resources i.e power and computational resources. One of the essential solutions that preserve IoT devices from cyber attacks is network-based security solutions. However, the implementation of these security solutions involves many difficulties due to the structure of IoT networks [10].

It is very difficult to gather and identify signatures from all device actions and interactions owing to the heterogeneous and large-scale structure of IoT networks. Additionally, the firmware releases can affect signatures and behaviors generated by IoT devices. This makes it difficult to identify and filter malicious activity in network traffic for IDS. However, implementing complex IDSs is difficult due to the resource and energy constraints of IoT devices. The low-cost and the low-quality sensor nodes have inflexible constraints i.e computing capacity, memory and energy. Most of the existing IDSs cause a high computational cost and memory requirements for data analysis and storage. Reducing resource consumption by reducing the memory used for storage and computation to more reasonable levels is an important starting point in the researches conducted for IDSs [10, 166]. Developing an IDS that can protect a high detection rate whereas keeping the false alarm rate not high is another challenge. Accordingly, determining the normal behaviors for large-scale sensor applications is an extremely difficult task [192].

The sensor nodes in IoT networks are sensitive to environmental influences. Therefore, the data collected from the sensor nodes for analysis is often insecure. In large-scale IoT networks, a great number of sensor nodes are distributed in harsh and unattended environments that are not easily accessible. The data which is noisy, erroneous, inaccurate, or unnecessary may occur as a result of these nodes running out of battery power or fault. This leads to the insecurity of analyzes performed with low-quality data. Also, a sensor network deployed for long periods in unattended environments is susceptible to dynamic network topology. IoT devices may attach or leave the network from anywhere. A network topology becomes dynamic with the ability to add and remove devices regardless of time or location. It is difficult to adapt to such sudden network topology changes for IDSs. The sensor nodes with different sensing and processing capabilities may move between different locations. In fact, each sensor node may contain a different number and type of sensors. This dynamism and heterogeneity increase the complexity in designing and applying analysis techniques [193].

Similar to SDN, the DPI method may also be applied to IDSs in IoT networks, either alone [194-196] or as a component of a hybrid system. Enabling anomaly detection technique on every resource-constrained IoT device results in high energy consumption, so it is necessary to balance between accuracy detection and energy consumption. The ability of responding to unknown attacks besides increasing the accuracy in detecting known attacks is one of the important goals of hybrid NIDS. For this reason, many hybrid studies use anomaly detection technique to detect the unknown attack signatures whereas the DPI-based technique is used for known attack types [169, 170, 197, 198].

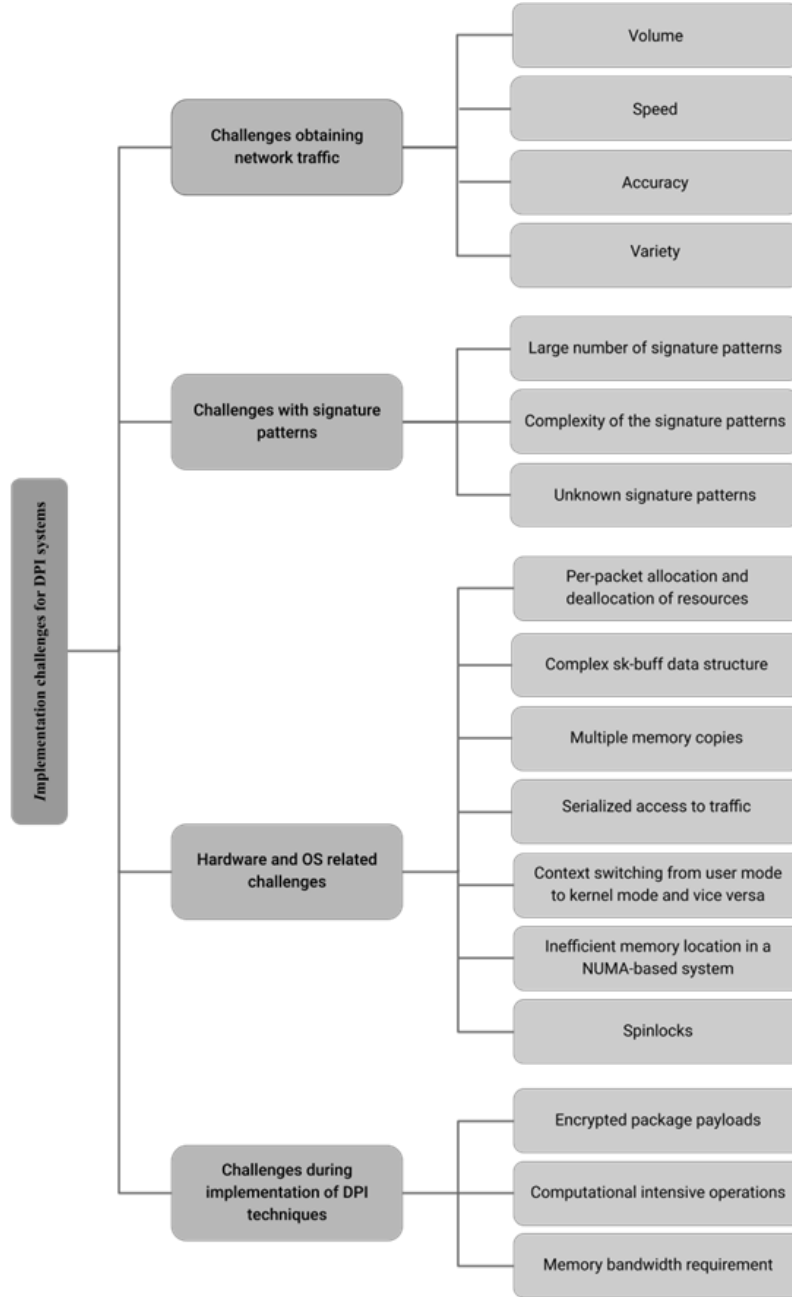


Figure 7. Implementation challenges for DPI systems

In addition, the study numbered [13] which proposes a hybrid model of the ML approach and DPI technique presents a security monitoring framework in which IoT and SDN architectures are combined with each other.

5 Challenges and open issues in implementing DPI systems

Designing efficient DPI mechanisms can be accomplished by individually evaluating and optimizing all processes from acquisition to inspection of network traffic. A review on DPI implementation challenges is presented in this section [1, 10, 11, 16]. Figure 7 summarizes the factors affecting system performance in the entire DPI process. In addition to the application difficulties of the DPI technique, the research issues of the field are discussed in this section.

5.1 Challenges obtaining network traffic

Performing data analysis on modern communication systems and networks includes challenges such as ensuring accuracy and efficient analysis of big data in real-time. Especially in the cellular networks, traffic pattern exhibits complex behavior due to the varied factors i.e device mobility and network heterogeneity. The aforementioned difficulties are related to main difficulties such as the volume, speed, accuracy and diversity of data encountered in the process of obtaining valuable information from the structure called big data [1, 115]. The collection and evaluation of this heterogeneous network traffic resulting from increasing network complexity require efficient mechanisms created by designing scalable and distributed

applications that perform the real-time analysis of large amounts of data. Some platforms developed for processing big data are presented in the studies numbered [199], [200] and [201]. On the other hand, it is unclear whether NTMA applications fully benefit from big data solutions [115].

5.2 Challenges with signature patterns

The increasing number of new systems, services and applications containing malware result in the growth of signature sets that need to be examined by DPI. Although the large signature sets are important for traffic identification, this degrades the overall performance of DPI systems [11]. Also, DPI applications have more complicated signature datasets compared to the others. For instance, the rules of Snort which are the implementation of DPI are more complex than a XML filter using RE for pattern detection [202]. Accordingly, reducing the computational complexity and memory requirement for DPI applications developed by using complex and databases with many signatures rank among the important research topic. On the other hand, signature-based systems cannot be used for the detection of unknown attacks or zero-day attacks. Therefore, it is necessary to create hybrid systems that can respond to unknown attacks while aiming to increase accuracy in detecting known attacks. In addition, these hybrid systems allow the updating of databases used for signature-based detection by detecting new signatures.

5.3 Hardware and OS related challenges

In the process of obtaining network packets, there are many factors that limit performance associated with an operating system such as problems with the use of main memory, spinlocks, context switches, inefficient memory accesses or serialization problem in accessing network traffic [16]. In section 2, the problems encountered in receiving network packets from NIC and processing are detailed, and solutions developed for these problems are presented. In addition, the hardware factors such as processor, memory, hard disk and their communication over the system bus also affect the processing performance. Most of the devices are not physically linked to each other. In this case, main memory becomes the common interface between devices for data communication. The latency in situations that occurs when DMA structure cannot be used, and data must be transmitted from the main memory causes bottlenecks. The time of the NIC is not performing DMA to GPU memory is counted as an example of this situation. If data has to be transmitted from the main memory, a bottleneck may be occurred even though the bus is fast enough [11, 203]. Moreover, the bottlenecks may be occurred in the transfer process of packets due to the limited PCIe bandwidth for the hardware-based solutions. This bottleneck can be reduced by the use of a pre-filtering mechanism that prevents all packets from being forwarded to the hardware for processing.

5.4 Challenges arising from the architecture of the network structure

Contemporary architectures such as IoT or SDN have many difficulties in ensuring security. The resource and energy constraints of the devices in IoT networks make it

difficult to implement complex IDSs on these devices, and the host-based security solutions are insufficient to secure these devices. The poor design of devices causes security vulnerabilities leaving them vulnerable to any cyber attack. Considering the span of IoT devices and their interaction with each other, such malicious behavior may have negative effects on the security of the entire network [10, 166, 191]. The security threats originating from SDN architecture may cause insecurity of network structure created by the architecture. The new interfaces and protocols may lead to the occurrence of new attack interfaces and exploitable targets. Accordingly, the network traffic on the communication channels can be accessed by the attackers, and this traffic data can be used to endanger the assets in the network when channels and interfaces used for information exchange are not secure enough [177-179]. Therefore, it is extremely important to develop security strategies on SDN and IoT architectures which security threats affect a wide area. Designing deployment strategies of the DPI engine which is costly in terms of the license fees and power consumption is another challenge arising from the SDN architecture in the development of security strategies [172]. On the other hand, the implementation of DPI engines as virtualized network functionality on SDN architecture may lead information leakage during the implementation of security functions such as IDS, IPS or firewalls [129].

5.5 Challenges during implementation of DPI techniques

Nowadays, almost all network traffic is encrypted due to security and privacy concerns. Therefore, it is important to evaluate the DPI technique over encrypted traffic. In this direction, the difficulties encountered in the application of DPI techniques are examined in this section. The application of DPI techniques in analyzing encrypted network traffic requires cryptographic computations. This requirement causes additional overhead for DPI systems. In addition, the intensive computation required in process of matching complex patterns on plaintext data increases this overhead [11]. Additively, the requirement of reducing memory space required for algorithms that are applied in the pattern matching process is an important research topic about DPI applications that use hardware such as GPUs that accelerate the processing of network packets, especially with parallel computing capabilities. Accordingly, it is a great challenge to develop well-performed systems for DPI applications with high computational complexity and memory space requirement [98]. As summarized in Figure 5, the methods that apply DPI by decoding encrypted traffic and perform an inspection on fully encrypted traffic are discussed together for an accurate comparison. In this direction, the inspection techniques are evaluated in terms of security, performance and functionality.

5.5.1 Security

The successful side-channel attacks on the Intel SGX used in the TH approach and attacks on the SE technique such as inference attack, leakage-abuse attack, reconstruction attacks and passive attacks require further research on the security of these techniques. AC technique provides more flexibility in protecting the confidentiality of

data compared to the MITM technique. However, setting access policies and monitoring network traffic for both MITH and AC techniques are the significant security challenge in a large network with heterogeneous network devices. Moreover, the main concern of techniques that perform inspection by decrypting network traffic on MBs in insecure cloud environments is the risk of information leakage [130, 131]. The main concern of the ML technique which does not decrypt the network traffic is whether it fully meets security requirements [127]. The fact that almost all of today's network traffic is encrypted causes attackers to use encrypted channels to hide themselves [165]. The inspections of headers and metadata only are insufficient to detect whether a packet contains malware.

5.5.2 Performance

The most important factor limiting performance for the SE technique is the additional cryptographic calculations at the setup phase. The research focus of schemas implementing this technique is to increase efficiency by reducing computations. In the TH technique, one of the most important factor limiting the performance is the secure enclave which is limited in terms of memory, storage space and computational capability [131]. Therefore, future researches in this area must focus on balancing storage and performance. Also, all network traffic that routes to the secure enclave causes inspection on all packets. An efficient pre-filtering mechanism enables a more efficient mechanism without unnecessary investigations on the resource-constrained region.

For ML-based models that need to be retrained frequently due to security breaches or network behavior changes, the high complexity in the training phase consumes lots of resources and time, limiting performance [1]. Accordingly, the optimization of ML models from the point of the time complexity and the resource consumption is required.

5.5.3 Functionality

In MITH, AC, TH, and some SE schemas [133, 139, 144], performing inspections on the decrypted data means full control over communication between two endpoints. This provides full functionality for NTMA applications. For ML-based schemas in which inspections are performed on the encrypted traffic, the main challenge is to create ML models that enable the successful implementation of NTMA applications without examining the packet payload. Also, ML technique does not require any changes on the existing setup compared to AC technique that changes TLS protocol, or MITH, SE, and TH techniques that require changes in the client and the server settings. Accordingly, ML technique offers the most advantageous solution in terms of application settings [131].

6 Conclusion

In this paper, a comprehensive review of DPI implementation challenges is made for the scenarios that generate state-of-the-art network traffic. A detailed analysis is presented as regards the determination and the improvement of the parameters that limit the performance in all processes from the collection of the network traffic to the

analysis with DPI. The structures of the frameworks containing DPI techniques in the current literature are examined. In addition, this paper points the other techniques that complement the DPI technique instead of focusing only on this technique in determining the procedures to be applied in future mechanisms. The discussion of the application based on DPI technique in the network security field and the analysis of this technique over encrypted traffic fulfil an important deficiency in the literature toward the increasing concerns about security and privacy. For this reason, the security issues of the current architectures such as IoT and SDN, whose main focus is security concerns, are discussed, and DPI implementation difficulties on these architectures are evaluated. In addition, a classification of the proposed methods is presented to perform an inspection on encrypted traffic, and the advantages and disadvantages of the techniques that directly use or do not use the DPI approach or limit the usability of this approach are discussed. In conclusion, the aim of this paper is to evaluate integration of DPI technique into mechanisms aiming to analyze network traffic efficiently by determining the requirements of state-of-the-art network traffic.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %14

References

- [1] M. Abbasi, A. Shahraki, A. Taherkordi, Deep learning for network traffic monitoring and analysis (ntma): A survey, *Computer Communications* 170 (10), 19–41, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.021>.
- [2] G. A. Pimenta Rodrigues, R. de Oliveira Albuquerque, F. E. Gomes de Deus, G. A. De Oliveira J'uniór, L. J. Garc'ia Villalba, T.-H. Kim, et al., Cybersecurity and network forensics: Analysis of malicious traffic towards a honeynet with deep packet inspection, *Applied Sciences* 7 (10), 1082, 2017. <https://doi.org/10.3390/app7101082>.
- [3] C. Parsons, *Deep Packet Inspection in Perspective: Tracing its lineage and surveillance potentials*, Citeseer, 2011.
- [4] C. Parsons, *The politics of deep packet inspection: What drives surveillance by internet service providers?*, Ph.D. thesis, 2013.
- [5] C. Xu, S. Chen, J. Su, S.-M. Yiu, L. C. Hui, A survey on regular expression matching for deep packet inspection: Applications, algorithms, and hardware platforms, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18 (4), 2991–3029, 2016. <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2566669>.
- [6] R. Bendrath, M. Mueller, The end of the net as we know it? deep packet inspection and internet governance, *New Media & Society* 13 (7), 1142–1160, 2011. <https://doi.org/10.1177/1461444811398031>.
- [7] P. Renals, G. A. Jacoby, Blocking skype through deep packet inspection, in: 2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, pp. 1–5, 2009.

- [8] R. M. Topolski, F. Press, P. Knowledge, Nebuad and partner isps: Wiretapping, forgery and browser hijacking, Washington DC: FreePress.
- [9] M. R. Shahid, G. Blanc, Z. Zhang, H. Debar, Iot devices recognition through network traffic analysis, in: 2018 IEEE international conference on big data (big data), IEEE, pp. 5187–5192, 2018.
- [10] H. Tahaei, F. Afifi, A. Asemi, F. Zaki, N. B. Anuar, The rise of traffic classification in iot networks: A survey, *Journal of Network and Computer Applications* 154, 102538, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102538>.
- [11] R. Antonello, S. Fernandes, C. Kamienski, D. Sadok, J. Kelner, I. Godor, G. Szabo, T. Westholm, Deep packet inspection tools and techniques in commodity platforms: Challenges and trends, *Journal of Network and Computer Applications* 35 (6), 1863–1878, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.07.010>.
- [12] M. Finsterbusch, C. Richter, E. Rocha, J.-A. Muller, K. Hanssgen, A survey of payload-based traffic classification approaches, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16 (2), 1135–1156, 2013. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.100613.00161>.
- [13] G. D. L. T. Parra, P. Rad, K.-K. R. Choo, Implementation of deep packet inspection in smart grids and industrial internet of things: Challenges and opportunities, *Journal of Network and Computer Applications* 135, 32–46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.022>.
- [14] W. Wu, M. Crawford, M. Bowden, The performance analysis of linux networking—packet receiving, *Computer Communications* 30 (5), 1044–1057, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2006.11.001>.
- [15] R. Rosen, *Linux kernel networking: Implementation and theory*, Apress, 2014.
- [16] J. L. García-Dorado, F. Mata, J. Ramos, P. M. S. del Río, V. Moreno, J. Aracil, High-performance network traffic processing systems using commodity hardware, in: *Data traffic monitoring and analysis*, Springer, pp. 3–27, 2013. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36784-7_1.
- [17] D. Scholz, A look at intels dataplane development kit, *Network* 115. http://dx.doi.org/10.2313/NET-2014-08-1_15.
- [18] G. Liao, X. Znu, L. Bnuyan, A new server i/o architecture for high speed networks, in: 2011 IEEE 17th International Symposium on High Performance Computer Architecture, IEEE, pp. 255–265, 2011.
- [19] S. Han, K. Jang, K. Park, S. Moon, Packetshader: a gpu-accelerated software router, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 40 (4), 195–206, 2010. <https://doi.org/10.1145/1851275.1851207>.
- [20] W. Wu, P. DeMar, M. Crawford, Why can some advanced ethernet nics cause packet reordering?, *IEEE Communications Letters* 15 (2), 253–255, 2010. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2011.122010.10.022>.
- [21] C. Benvenuti, *Understanding linux network internals*, o'relly media, Inc., Sebastopol, CA.
- [22] M. Dobrescu, K. Argyraki, S. Ratnasamy, Toward predictable performance in software packet-processing platforms, in: 9th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 12), pp. 141–154., 2012.
- [23] D. Barach, L. Linguaglossa, D. Marion, P. Pfister, S. Pontarelli, D. Rossi, High-speed software data plane via vectorized packet processing, *IEEE Communications Magazine* 56 (12), 97–103, 2018. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1800069>.
- [24] E. Kohler, R. Morris, B. Chen, J. Jannotti, M. F. Kaashoek, The click modular router, *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)* 18 (3), 263–297, 2000. <https://doi.org/10.1145/354871.354874>.
- [25] L. Rizzo, netmap: a novel framework for fast packet i/o, in: 21st USENIX Security Symposium (USENIX Security 12), pp. 101–112, 2012. <https://doi.org/10.1145/354871.354874>.
- [26] INTEL DPDK, <https://www.dpdk.org/>, Accessed 3 October 2022.
- [27] T. Barbette, C. Soldani, L. Mathy, Fast userspace packet processing, in: 2015 ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS), IEEE, pp. 5–16, 2015.
- [28] PFRING, http://www.ntop.org/products/packet-capture/pf_ring/, Accessed 3 October 2022.
- [29] W. Sun, R. Ricci, Fast and flexible: Parallel packet processing with gpus and click, in: *Architectures for Networking and Communications Systems*, IEEE, pp. 25–35, 2013.
- [30] G. Vasiliadis, L. Koromilas, M. Polychronakis, S. Ioannidis, {GASPP}: A gpu-accelerated stateful packet processing framework, in: 2014 {USENIX} Annual Technical Conference ({USENIX}{ATC} 14), pp. 321–332, 2014.
- [31] Y. Go, M. A. Jamshed, Y. Moon, C. Hwang, K. Park, Apunet: Revitalizing {GPU} as packet processing accelerator, in: 14th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 17), pp. 83–96, 2017.
- [32] B. Li, K. Tan, L. Luo, Y. Peng, R. Luo, N. Xu, Y. Xiong, P. Cheng, E. Chen, Clicknp: Highly flexible and high performance network processing with reconfigurable hardware, in: *Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference*, pp. 1–14, 2016.
- [33] Intel DPDK Performance on the SAU5081I Server, <https://www.accton.com/Technology-Brief/inteldpdk-performance-on-the-sau5081i-server/>, Accessed 3 October 2022.
- [34] L. Rizzo, L. Deri, A. Cardigliano, 10 gbit/s line rate packet processing using commodity hardware: Survey and new proposals, 2012.
- [35] Google Transparency Report, <https://transparencyreport.google.com/https/overview>, Accessed 3 October 2022.
- [36] F. Yu, R. H. Katz, T. V. Lakshman, Gigabit rate packet pattern-matching using tcam, in: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network*

- Protocols, 2004. ICNP 2004., IEEE, pp. 174–183, 2004.
- [37] J.-S. Sung, S.-M. Kang, Y. Lee, T.-G. Kwon, B.-T. Kim, A multi-gigabit rate deep packet inspection algorithm using tcam, in: GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, Vol. 1, IEEE, 2005.
- [38] T. Ho, S.-J. Cho, S.-R. Oh, Parallel multiple pattern matching schemes based on cuckoo filter for deep packet inspection on graphics processing units, *IET Information Security* 12 (4), 381–388, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-ifs.2017.0421>.
- [39] J. Han, S. Kim, D. Cho, B. Choi, J. Ha, D. Han, A secure middlebox framework for enabling visibility over multiple encryption protocols, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 28 (6), 2727–2740, 2020. <https://doi.org/10.1109/TNET.2020.3016785>.
- [40] H. Duan, X. Yuan, C. Wang, Lightbox: Sgx-assisted secure network functions at near-native speed. corr abs/1706.06261, arXiv preprint arXiv:1706.06261, 2017.
- [41] B. Fan, D. G. Andersen, M. Kaminsky, M. D. Mitzenmacher, Cuckoo filter: Practically better than bloom, in: Proceedings of the 10th ACM International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies, pp. 75–88, 2014.
- [42] L. Deri, M. Martinelli, T. Bujlow, A. Cardigliano, ndpi: Open-source high-speed deep packet inspection, in: 2014 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), IEEE, pp. 617–622, 2014.
- [43] F. Risso, M. Baldi, O. Morandi, A. Baldini, P. Monclus, Lightweight, payload-based traffic classification: An experimental evaluation, in: 2008 IEEE International Conference on Communications, IEEE, pp. 5869–5875, 2008.
- [44] Protocol and application classification with metadata extraction (PACE), <https://www.ipoque.com/products/dpi-engine-rsrpace-2>, Accessed 3 October 2022.
- [45] T. Bujlow, V. Carela-Espanol, Comparison of deep packet inspection (dpi) tools for traffic classification.
- [46] S. Alcock, R. Nelson, Measuring the accuracy of open-source payload-based traffic classifiers using popular internet applications, in: 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks-Workshops, IEEE, pp. 956–963, 2013.
- [47] T. Bujlow, V. Carela-Espanol, P. Barlet-Ros, Independent comparison of popular dpi tools for traffic classification, *Computer Networks* 76, 75–89, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.001>.
- [48] G. B. Satrya, F. E. Nugroho, T. Brotoharsono, Improving network security-a comparison between ndpi and l7-filter, *International Journal on Information and Communication Technology (IJOICT)* 2 (2), 11–11, 2016. <https://doi.org/10.21108/IJOICT.2016.22.77>.
- [49] R. Muth, U. Manber, Approximate multiple string search, in: Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching, Springer, pp. 75–86, 1996.
- [50] R. M. Karp, M. O. Rabin, Efficient randomized pattern-matching algorithms, *IBM journal of research and development* 31 (2), 249–260, 1987. <https://doi.org/10.1147/rd.312.0249>.
- [51] V. Gupta, M. Singh, V. K. Bhalla, Pattern matching algorithms for intrusion detection and prevention system: A comparative analysis, in: 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), IEEE, pp. 50–54, 2014.
- [52] N. Shoaib, J. Shamsi, T. Mustafa, A. Zaman, J. ul Hasan, M. Gohar, Gdpi: Signature based deep packet inspection using gpus, *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl* 8 (11), 210–216, 2017. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.081128>.
- [53] M. Ramesh, H. Jeon, Parallelizing deep packet inspection on gpu, in: 2018 IEEE Fourth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService), IEEE, pp. 248–253, 2018.
- [54] J. Sharma, M. Singh, Cuda based rabin-karp pattern matching for deep packet inspection on a multicore gpu, *International Journal of Computer Network and Information Security* 7 (10), 70–77, 2015. <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2015.10.08>.
- [55] B. H. Bloom, Space/time trade-offs in hash coding with allowable errors, *Communications of the ACM* 13 (7), 422–426, 1970. <https://doi.org/10.1145/362686.362692>.
- [56] L. Fan, P. Cao, J. Almeida, A. Z. Broder, Summary cache: a scalable wide-area web cache sharing protocol, *IEEE/ACM transactions on networking* 8 (3), 281–293, 2000. <https://doi.org/10.1109/90.851975>.
- [57] F. Bonomi, M. Mitzenmacher, R. Panigrahy, S. Singh, G. Varghese, An improved construction for counting bloom filters, in: European Symposium on Algorithms, Springer, pp. 684–695, 2006.
- [58] F. Putze, P. Sanders, J. Singler, Cache-, hash-and space-efficient bloom filters, in: International Workshop on Experimental and Efficient Algorithms, Springer, pp. 108–121, 2007.
- [59] D. E. Knuth, The art of computer programming: Sorting and searching, Vol. 3, Addison-Wesley Publishing Company.
- [60] M. Al-Hisnawi, M. Ahmadi, Qcf for deep packet inspection, *IET Networks* 7 (5), 346–352, 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-net.2017.0037>.
- [61] N. S. Artan, H. J. Chao, Multi-packet signature detection using prefix bloom filters, in: GLOBECOM'05. IEEE Global Telecommunications Conference, 2005., Vol. 3, IEEE, 2005.
- [62] T. Kocak, I. Kaya, Low-power bloom filter architecture for deep packet inspection, *IEEE Communications Letters* 10 (3), 210–212, 2006. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2006.1603387>.
- [63] Y. Chen, A. Kumar, J. J. Xu, A new design of bloom filter for packet inspection speedup, in: IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference, IEEE, pp. 1–5, 2007.

- [64] M. Al-Hisnawi, M. Ahmadi, Deep packet inspection using quotient filter, *IEEE Communications Letters* 20 (11), 2217–2220, 2016. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2601898>.
- [65] M. Al-Hisnawi, M. Ahmadi, Deep packet inspection using cuckoo filter, in: *2017 Annual Conference on New Trends in Information & Communications Technology Applications (NTICT)*, IEEE, pp. 197–202, 2017.
- [66] R. S. Boyer, J. S. Moore, A fast string searching algorithm, *Communications of the ACM* 20 (10), 762–772, 1977. <https://doi.org/10.1145/359842.359859>.
- [67] S. Wu, U. Manber, et al., A fast algorithm for multi-pattern searching, University of Arizona. Department of Computer Science, 1994.
- [68] Y. Wang, H. Kobayashi, An improved technology for content matching intrusion detection system, in: *2006 International Conference on Software in Telecommunications and Computer Networks*, IEEE, pp. 238–241, 2006.
- [69] A. A. Hasan, N. A. A. Rashid, Hash-boyer-moore-horspool string matching algorithm for intrusion detection system, in: *International Conference on Computer Networks and Communication Systems, IPCSIT*, 35, pp. 12–16, 2012.
- [70] S. Sharma, M. Dixit, Single digit hash boyer moore horspool pattern matching algorithm for intrusion detection system, *International Journal of Future Generation Communication and Networking* 9 (9), 169–180, 2016. <https://doi.org/10.14257/ijfgcn.2016.9.9.15>.
- [71] R. Padmashani, S. Sathyadevan, D. Dath, Bsnort ips better snort intrusion detection/prevention system, in: *2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, IEEE, pp. 46–51, 2012.
- [72] S. Gupta, Efficient malicious domain detection using word segmentation and bm pattern matching, in: *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, IEEE, pp. 1–6, 2016.
- [73] T. F. A. Rahman, A. G. Buja, K. Abd, F. M. Ali, Sql injection attack scanner using boyer-moore string matching algorithm., *J. Comput.* 12 (2), 183–189, 2017. <https://doi.org/10.17706/jcp.12.2.183-189>.
- [74] Y. Otoum, A. Nayak, As-ids: Anomaly and signature based ids for the internet of things, *Journal of Network and Systems Management* 29 (3), 1–26, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10922-021-09589-6>.
- [75] Q. Zheng, An improved multiple patterns matching algorithm for intrusion detection, in: *2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, Vol. 2, IEEE, pp. 124–127, 2010.
- [76] C. Ke-Qin, D. Lin, W. Hui, An improved multi-pattern matching algorithms in intrusion detection, in: *2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, IEEE, pp. 203–205, 2013.
- [77] M. Aldwairi, K. Al-Khamaiseh, F. Alharbi, B. Shah, Bloom filters optimized wu-manber for intrusion detection, *Journal of Digital Forensics, Security and Law* 11 (4), 5, 2016. <https://doi.org/10.15394/jdfsl.2016.1427>.
- [78] B. Zhang, X. Chen, X. Pan, Z. Wu, High concurrence wu-manber multiple patterns matching algorithm, in: *Proceedings. The 2009 International Symposium on Information Processing (ISIP 2009)*, Citeseer, p. 404, 2009.
- [79] D. Luchaup, L. De Carli, S. Jha, E. Bach, Deep packet inspection with dfa-trees and parametrized language overapproximation, in: *IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications*, IEEE, pp. 531–539, 2014.
- [80] M. Češka, V. Havlena, L. Holík, O. Lengál, T. Vojnar, Approximate reduction of finite automata for high-speed network intrusion detection, *International Journal on Software Tools for Technology Transfer* 22 (5), 523–539, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89963-3_9.
- [81] M. Češka, V. Havlena, L. Holík, J. Korenek, O. Lengál, D. Matoušek, J. Matoušek, J. Semric, T. Vojnar, Deep packet inspection in fpgas via approximate nondeterministic automata, in: *2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*, IEEE, pp. 109–117, 2019.
- [82] M. Roesch, et al., Snort: Lightweight intrusion detection for networks., in: *Lisa*, Vol. 99, 1999, pp. 229–238.
- [83] R. Sommer, Bro: An open source network intrusion detection system, *Security, E-learning, E-Services*, 17. DFNArbeitsstägung über Kommunikationsnetze. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89963-3_9.
- [84] Cisco IOS Intrusion Prevention System (IPS) , <https://www.cisco.com/c/en/us/products/security/iosintrusion-prevention-system-ips/index.html>, Accessed 3 October 2022.
- [85] X. Yu, W.-c. Feng, D. Yao, M. Becchi, O3 fa: A scalable finite automata-based pattern-matching engine for out-of-order deep packet inspection, in: *2016 ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems (ANCS)*, IEEE, pp. 1–11, 2016.
- [86] C. Yin, H. Wang, X. Yin, R. Sun, J. Wang, Improved deep packet inspection in data stream detection, *The Journal of Supercomputing* 75 (8), 4295–4308, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2685-y>.
- [87] R. Sun, L. Shi, C. Yin, J. Wang, An improved method in deep packet inspection based on regular expression, *The Journal of Supercomputing* 75 (6), 3317–3333, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2517-0>.
- [88] S. Nagaraju, B. Shanmugham, K. Baskaran, High throughput token driven fsm based regex pattern matching for network intrusion detection system, *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.028>.

- [89] A. V. Aho, M. J. Corasick, Efficient string matching: an aid to bibliographic search, *Communications of the ACM* 18 (6), 333–340, 1975. <https://doi.org/10.1145/360825.360855>.
- [90] M. Norton, Optimizing pattern matching for intrusion detection, Sourcefire, Inc., Columbia, MD.
- [91] N. Tuck, T. Sherwood, B. Calder, G. Varghese, Deterministic memory-efficient string matching algorithms for intrusion detection, in: *IEEE INFOCOM 2004*, 4, IEEE, pp. 2628–2639, 2004.
- [92] L. Tan, T. Sherwood, A high throughput string matching architecture for intrusion detection and prevention, in: *32nd International Symposium on Computer Architecture (ISCA'05)*, IEEE, pp. 112–122, 2005.
- [93] T.-H. Lee, N.-L. Huang, A pattern-matching scheme with high throughput performance and low memory requirement, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 21 (4), 1104–1116, 2012. <https://doi.org/10.1109/TNET.2012.2224881>.
- [94] H. Kim, A scalable architecture for reducing power consumption in pipelined deep packet inspection system, *Microelectronics Journal* 46 (10), 950–955, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2015.08.002>.
- [95] X. Zha, S. Sahni, Multipattern string matching on a gpu, in: *2011 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, IEEE, pp. 277–282, 2011.
- [96] C.-H. Lin, C.-H. Liu, L.-S. Chien, S.-C. Chang, Accelerating pattern matching using a novel parallel algorithm on gpus, *IEEE Transactions on Computers* 62 (10), 1906–1916, 2012. <https://doi.org/10.1109/TC.2012.254>.
- [97] C.-L. Lee, Y.-S. Lin, Y.-C. Chen, A hybrid cpu/gpu pattern-matching algorithm for deep packet inspection, *PloS one* 10 (10), e0139301, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139301>.
- [98] C.-L. Hsieh, L. Vespa, N. Weng, A high-throughput dpi engine on gpu via algorithm/implementation co-optimization, *Journal of Parallel and Distributed Computing* 88, 46–56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2015.11.001>.
- [99] B. Choi, J. Chae, M. Jamshed, K. Park, D. Han, {DFC}: Accelerating string pattern matching for network applications, in: *13th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 16)*, pp. 551–565, 2016.
- [100] D. C. Sicker, P. Ohm, D. Grunwald, Legal issues surrounding monitoring during network research, in: *Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement*, pp. 141–148, 2007.
- [101] T. T. Nguyen, G. Armitage, A survey of techniques for internet traffic classification using machine learning, *IEEE communications surveys & tutorials* 10 (4), 56–76, 2008. <https://doi.org/10.1109/SURV.2008.080406>.
- [102] A. Finamore, M. Mellia, M. Meo, D. Rossi, Kiss: Stochastic packet inspection classifier for udp traffic, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 18 (5), 1505–1515, 2010. <https://doi.org/10.1109/TNET.2010.2044046>.
- [103] B. Anderson, D. McGrew, Machine learning for encrypted malware traffic classification: accounting for noisy labels and non-stationarity, in: *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 1723–1732, 2017.
- [104] B. Anderson, S. Paul, D. McGrew, Deciphering malware’s use of tls (without decryption), *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques* 14 (3), 195–211, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11416-017-0306-6>.
- [105] A. Yamada, Y. Miyake, K. Takemori, A. Studer, A. Perrig, Intrusion detection for encrypted web accesses, in: *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW'07)*, 1, IEEE, pp. 569–576, 2007.
- [106] J. Y. Chung, B. Park, Y. J. Won, J. Strassner, J. W. Hong, Traffic classification based on flow similarity, in: *International Workshop on IP Operations and Management*, Springer, pp. 65–77, 2009.
- [107] E. Rocha, P. Salvador, A. Nogueira, Detection of illicit network activities based on multivariate gaussian fitting of multi-scale traffic characteristics, in: *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, pp. 1–6, 2011.
- [108] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, *Deep learning*, MIT press, 2016.
- [109] Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton, *Deep learning*, *nature* 521 (7553), 436–444, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- [110] M. A. Alsheikh, D. Niyato, S. Lin, H.-P. Tan, Z. Han, Mobile big data analytics using deep learning and apache spark, *IEEE network* 30 (3), 22–29, 2016. <https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7474340>.
- [111] B. J. Radford, L. M. Apolonio, A. J. Trias, J. A. Simpson, Network traffic anomaly detection using recurrent neural networks, *arXiv preprint arXiv:1803.10769*.
- [112] D. Andreoletti, S. Troia, F. Musumeci, S. Giordano, G. Maier, M. Tornatore, Network traffic prediction based on diffusion convolutional recurrent neural networks, in: *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, IEEE, pp. 246–251, 2019.
- [113] K. Ding, S. Ding, A. Morozov, T. Fabarisov, K. Janschek, On-line error detection and mitigation for time-series data of cyber-physical systems using deep learning based methods, in: *2019 15th European Dependable Computing Conference (EDCC)*, IEEE, pp. 7–14, 2019.
- [114] W. Zhong, F. Gu, A multi-level deep learning system for malware detection, *Expert Systems with Applications* 133, 151–162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.064>.
- [115] A. D’Alconzo, I. Drago, A. Morichetta, M. Mellia, P. Casas, A survey on big data for network traffic monitoring and analysis, *IEEE Transactions on*

- Network and Service Management 16 (3), 800–813, 2019. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2019.2933358>.
- [116] M. Alicherry, M. Muthuprasanna, V. Kumar, High speed pattern matching for network ids/ips, in: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Network Protocols, IEEE, pp. 187–196, 2006.
- [117] H. Kim, K.-I. Choi, A pipelined non-deterministic finite automaton-based string matching scheme using merged state transitions in an fpga, PloS one 11 (10), e0163535, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163535>.
- [118] I. Sourdis, D. N. Pnevmatikatos, S. Vassiliadis, Scalable multigigabit pattern matching for packet inspection, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems 16 (2), 156–166, 2008. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2007.912036>.
- [119] R.-T. Liu, N.-F. Huang, C.-H. Chen, C.-N. Kao, A fast string-matching algorithm for network processor-based intrusion detection system, ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS) 3 (3), 614–633, 2004. <https://doi.org/10.1145/1015047.1015055>.
- [120] D. F. Bacon, R. Rabbah, S. Shukla, Fpga programming for the masses, Communications of the ACM 56 (4), 56–63, 2013. <https://doi.org/10.1145/2436256.2436271>.
- [121] Y. Sun, H. Liu, V. C. Valgenti, M. S. Kim, Hybrid regular expression matching for deep packet inspection on multi-core architecture, in: 2010 Proceedings of 19th International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE, pp. 1–7, 2010.
- [122] Y.-H. E. Yang, V. K. Prasanna, Robust and scalable string pattern matching for deep packet inspection on multicore processors, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 24 (11), 2283–2292, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.217>.
- [123] C.-L. Lee, T.-H. Yang, A flexible pattern-matching algorithm for network intrusion detection systems using multi-core processors, Algorithms 10 (2), 58, 2017. <https://doi.org/10.3390/a10020058>.
- [124] CUDA C PROGRAMMING GUIDE , https://docs.nvidia.com/cuda/archive/9.1/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf, Accessed 3 October 2022.
- [125] R. Smith, N. Goyal, J. Ormont, K. Sankaralingam, C. Estan, Evaluating gpus for network packet signature matching, in: 2009 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software, IEEE, pp. 175–184, 2009.
- [126] M. Ramesh, Network traffic anomaly-detection framework using gpus, Ph.D. thesis, San Jose State University, 2017.
- [127] X. d. C. de Carnavalet, P. C. van Oorschot, A survey and analysis of tls interception mechanisms and motivations, arXivpreprint arXiv:2010.16388.
- [128] K. Moriarty, A. Morton, Effects of pervasive encryption on operators, draft-mm-wg-effect-encrypt-25 (work in progress).
- [129] K. Bhargavan, I. Boureau, A. Delignat-Lavaud, P.-A. Fouque, C. Onete, A formal treatment of accountable proxying over tls, in: 2018 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), IEEE, pp. 799–816, 2018.
- [130] C. Lan, J. Sherry, R. A. Popa, S. Ratnasamy, Z. Liu, Embark: Securely outsourcing middleboxes to the cloud, in: 13th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 16), 2016, pp. 255–273.
- [131] G. S. Poh, D. M. Divakaran, H. W. Lim, J. Ning, A. Desai, A survey of privacy-preserving techniques for encrypted traffic inspection over network middleboxes, arXiv preprint arXiv:2101.04338.
- [132] L. S. Huang, A. Rice, E. Ellingsen, C. Jackson, Analyzing forged ssl certificates in the wild, in: 2014 IEEE Symposium on Security and Privacy, IEEE, pp. 83–97, 2014.
- [133] J. Ning, G. S. Poh, J.-C. Loh, J. Chia, E.-C. Chang, Privdpi: Privacy-preserving encrypted traffic inspection with reusable obfuscated rules, in: Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 1657–1670, 2019.
- [134] X. de Carné de Carnavalet, M. Mannan, Killed by proxy: analyzing client-end tls interception software <https://doi.org/10.3390/a10020058>.
- [135] Z. Durumeric, Z. Ma, D. Springall, R. Barnes, N. Sullivan, E. Bursztein, M. Bailey, J. A. Halderman, V. Paxson, The security impact of https interception., in: NDSS, 2017.
- [136] L. Waked, M. Mannan, A. Youssef, To intercept or not to intercept: Analyzing tls interception in network appliances, in: Proceedings of the 2018 on Asia Conference on Computer and Communications Security, pp. 399–412, 2018.
- [137] MitMProxy, <https://mitmproxy.org/>, Accessed 3 October 2022.
- [138] SSLSpit, <https://www.roe.ch/>, Accessed 3 October 2022.
- [139] J. Sherry, C. Lan, R. A. Popa, S. Ratnasamy, Blindbox: Deep packet inspection over encrypted traffic, in: Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, pp. 213–226, 2015.
- [140] S. Canard, A. Diop, N. Kheir, M. Paindavoine, M. Sabt, Blindids: Market-compliant and privacy-friendly intrusion detection system over encrypted traffic, in: Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security, pp. 561–574, 2017.
- [141] T. Fuhr, P. Paillier, Decryptable searchable encryption, in: International Conference on Provable Security, Springer, pp. 228–236, 2007.
- [142] J. Fan, C. Guan, K. Ren, Y. Cui, C. Qiao, Spabox: Safeguarding privacy during deep packet inspection at a middlebox, IEEE/ACM Transactions on Networking 25 (6), 3753–3766, 2017. <https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2753044>.
- [143] J. Ning, X. Huang, G. S. Poh, S. Xu, J.-C. Loh, J. Weng, R. H. Deng, Pine: Enabling privacy-preserving deep packet inspection on tls with rule-hiding and fast

- connection establishment, in: European Symposium on Research in Computer Security, Springer, pp. 3–22, 2020.
- [144] H. Ren, H. Li, D. Liu, G. Xu, N. Cheng, X. S. Shen, Privacy-preserving efficient verifiable deep packet inspection for cloud-assisted middlebox, *IEEE Transactions on Cloud Computing*. <https://doi.org/10.1109/TCC.2020.2991167>.
- [145] H. J. Asghar, L. Melis, C. Soldani, E. De Cristofaro, M. A. Kaafar, L. Mathy, Splitbox: Toward efficient private network function virtualization, in: Proceedings of the 2016 workshop on Hot topics in Middleboxes and Network Function Virtualization, pp. 7–13, 2016.
- [146] S. Lai, S. Patranabis, A. Sakzad, J. K. Liu, D. Mukhopadhyay, R. Steinfeld, S.-F. Sun, D. Liu, C. Zuo, Result pattern hiding searchable encryption for conjunctive queries, in: Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 745–762, 2018.
- [147] D. Naylor, K. Schomp, M. Varvello, I. Leontiadis, J. Blackburn, D. R. López, K. Papagiannaki, P. Rodriguez Rodriguez, P. Steenkiste, Multi-context tls (mctls) enabling secure in-network functionality in tls, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 45 (4), 199–212, 2015. <https://doi.org/10.1145/2829988.2787482>.
- [148] D. Naylor, R. Li, C. Gkantsidis, T. Karagiannis, P. Steenkiste, And then there were more: Secure communication for more than two parties, in: Proceedings of the 13th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, pp. 88–100, 2017.
- [149] H. Lee, Z. Smith, J. Lim, G. Choi, S. Chun, T. Chung, T. T. Kwon, matls: How to make tls middlebox-aware?, in: NDSS, 2019.
- [150] D. Goltzsche, S. Rusch, M. Nieke, S. Vaucher, N. Weichbrodt, V. Schiavoni, P.-L. Aublin, P. Cosa, C. Fetzer, P. Felber, et al., Endbox: Scalable middlebox functions using client-side trusted execution, in: 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), IEEE, pp. 386–397, 2018.
- [151] Perl Compatible Regular Expressions Library (PCRE2), <https://ftp.pcre.org/pub/pcre/>, Accessed 3 October 2022.
- [152] N. D. Matsakis, F. S. Klock, The rust language, *ACM SIGAda Ada Letters* 34 (3), 103–104, 2014. <https://doi.org/10.1145/2692956.2663188>.
- [153] D. Kuvaiskii, O. Oleksenko, S. Arnavotov, B. Trach, P. Bhatotia, P. Felber, C. Fetzer, Sgxbounds: Memory safety for shielded execution, in: Proceedings of the Twelfth European Conference on Computer Systems, pp. 205–221, 2017.
- [154] L. Szekeres, M. Payer, T. Wei, D. Song, Sok: Eternal war in memory, in: 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy, IEEE, pp. 48–62, 2013.
- [155] R. Poddar, C. Lan, R. A. Popa, S. Ratnasamy, Safebricks: Shielding network functions in the cloud, in: 15th {USENIX} Symposium on Networked Systems Design and Implementation ({NSDI} 18), pp. 201–216, 2018.
- [156] B. Trach, A. Krohmer, F. Gregor, S. Arnavotov, P. Bhatotia, C. Fetzer, Shieldbox: Secure middleboxes using shielded execution, in: Proceedings of the Symposium on SDN Research, pp. 1–14, 2018.
- [157] S. Arnavotov, B. Trach, F. Gregor, T. Knauth, A. Martin, C. Priebe, J. Lind, D. Muthukumar, D. O’keeffe, M. L. Stillwell, et al., {SCONE}: Secure linux containers with intel {SGX}, in: 12th {USENIX} Symposium on Operating Systems Design and Implementation ({OSDI} 16), pp. 689–703, 2016.
- [158] hyperscan, <https://www.hyperscan.io/>, Accessed 3 October 2022.
- [159] J. M. Sherry, Middleboxes as a cloud service, Ph.D. thesis, UC Berkeley, 2016.
- [160] Y. Lindell, The security of intel sgx for key protection and data privacy applications.
- [161] D. Cash, P. Grubbs, J. Perry, T. Ristenpart, Leakage-abuse attacks against searchable encryption, in: Proceedings of the 22nd ACM SIGSAC conference on computer and communications security, pp. 668–679, 2015.
- [162] G. Kellaris, G. Kollios, K. Nissim, A. O’neill, Generic attacks on secure outsourced databases, in: Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, pp. 1329–1340, 2016.
- [163] M. S. Islam, M. Kuzu, M. Kantarcioglu, Access pattern disclosure on searchable encryption: ramification, attack and mitigation., in: Ndss, Vol. 20, Citeseer, p. 12, 2012.
- [164] J. Ning, J. Xu, K. Liang, F. Zhang, E.-C. Chang, Passive attacks against searchable encryption, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* 14 (3), 789–802, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2018.2866321>.
- [165] Cisco Encrypted Traffic Analytics White Paper, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/enterprise-network-security/nb-09-encrypted-traffic-analytics-wp-cte-en.html>, Accessed 3 October 2022.
- [166] S. Hajiheidari, K. Wakil, M. Badri, N. J. Navimipour, Intrusion detection systems in the internet of things: A comprehensive investigation, *Computer Networks* 160, 165–191, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.05.014>.
- [167] C. Birkinshaw, E. Rouka, V. G. Vassilakis, Implementing an intrusion detection and prevention system using softwaredefined networking: Defending against port-scanning and denial-of-service attacks, *Journal of Network and Computer Applications* 136, 71–85, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.03.005>.
- [168] H.-J. Liao, C.-H. R. Lin, Y.-C. Lin, K.-Y. Tung, Intrusion detection system: A comprehensive review, *Journal of Network and Computer Applications* 36 (1), 16–24, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.09.004>.

- [169] S. Raza, L. Wallgren, T. Voigt, Svelte: Real-time intrusion detection in the internet of things, *Ad hoc networks* 11 (8), 2661–2674, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.04.014>.
- [170] H. Sedjelmaci, S. M. Senouci, M. Al-Bahri, A lightweight anomaly detection technique for low-resource iot devices: A game-theoretic methodology, in: 2016 IEEE international conference on communications (ICC), IEEE, pp. 1–6, 2016.
- [171] R. Sekar, A. Gupta, J. Frullo, T. Shanbhag, A. Tiwari, H. Yang, S. Zhou, Specification-based anomaly detection: a new approach for detecting network intrusions, in: Proceedings of the 9th ACM conference on Computer and communications security, pp. 265–274, 2002.
- [172] S. Demirci, M. Demirci, S. Sagioglu, Virtual security functions and their placement in software defined networks: A survey, *Gazi University Journal of Science* 32 (3), 833–851, 2019. <https://doi.org/10.35378/gujs.422000>.
- [173] B. A. A. Nunes, M. Mendonca, X.-N. Nguyen, K. Obraczka, T. Turletti, A survey of software-defined networking: Past, present, and future of programmable networks, *IEEE Communications surveys & tutorials* 16 (3), 1617–1634, 2014. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012214.00180>.
- [174] B. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, S. Lee, Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations, *IEEE Communications Magazine* 53 (2), 90–97, 2015. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7045396>.
- [175] G. Wang, T. E. Ng, The impact of virtualization on network performance of amazon ec2 data center, in: 2010 Proceedings IEEE INFOCOM, IEEE, pp. 1–9, 2010.
- [176] S. Scott-Hayward, S. Natarajan, S. Sezer, A survey of security in software defined networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 18 (1), 623–654, 2015. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2453114>.
- [177] J. C. C. Chica, J. C. Imbachi, J. F. B. Vega, Security in sdn: A comprehensive survey, *Journal of Network and Computer Applications* 159, 102595, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102595>.
- [178] L. Schehlmann, S. Abt, H. Baier, Blessing or curse? revisiting security aspects of software-defined networking, in: 10th International Conference on Network and Service Management (CNSM) and Workshop, IEEE, pp. 382–387, 2014.
- [179] M. Liyanage, M. Ylianttila, A. Gurtov, Securing the control channel of software-defined mobile networks, in: Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014, IEEE, pp. 1–6, 2014.
- [180] Y. Jarraya, A. Shameli-Sendi, M. Pourzandi, M. Cheriet, Multistage ocd: Scalable security provisioning optimization in sdn-based cloud, in: 2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing, IEEE, pp. 572–579, 2015.
- [181] M. Sainz, I. Garitano, M. Iturbe, U. Zurutuza, Deep packet inspection for intelligent intrusion detection in softwaredefined industrial networks: A proof of concept, *Logic Journal of the IGPL* 28 (4), 461–472, 2020.
- [182] A. Bremler-Barr, Y. Harchol, D. Hay, Y. Koral, Deep packet inspection as a service, in: Proceedings of the 10th ACM International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies, pp. 271–282, 2014.
- [183] Y. Li, R. Fu, An parallelized deep packet inspection design in software defined network, in: Proceedings of 2nd International Conference on Information Technology and Electronic Commerce, IEEE, pp. 6–10, 2014.
- [184] A. Abubakar, B. Pranggono, Machine learning based intrusion detection system for software defined networks, in: 2017 seventh international conference on emerging security technologies (EST), IEEE, pp. 138–143, 2017.
- [185] C. Yu, J. Lan, J. Xie, Y. Hu, Qos-aware traffic classification architecture using machine learning and deep packet inspection in sdns, *Procedia computer science* 131, 1209–1216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.331>.
- [186] M. Bouet, J. Leguay, V. Conan, Cost-based placement of virtualized deep packet inspection functions in sdn, in: MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference, IEEE, pp. 992–997, 2013.
- [187] M. Bouet, J. Leguay, T. Combe, V. Conan, Cost-based placement of vdpi functions in nfv infrastructures, *International Journal of Network Management* 25 (6), 490–506, 2015. <https://doi.org/10.1002/nem.1920>.
- [188] J. Kim, J. Lee, J. Kim, J. Yun, M2m service platforms: Survey, issues, and enabling technologies, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16 (1), 61–76, 2013. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.100713.00203>
- [189] H. Yao, P. Gao, J. Wang, P. Zhang, C. Jiang, Z. Han, Capsule network assisted iot traffic classification mechanism for smart cities, *IEEE Internet of Things Journal* 6 (5), 7515–7525, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2901348>.
- [190] E. Bertino, N. Islam, Botnets and internet of things security, *Computer* 50 (2), 76–79, 2017. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.62>.
- [191] M. Antonakakis, T. April, M. Bailey, M. Bernhard, E. Bursztein, J. Cochran, Z. Durumeric, J. A. Halderman, L. Invernizzi, M. Kallitsis, et al., Understanding the mirai botnet, in: 26th {USENIX} security symposium ({USENIX} Security 17), pp. 1093–1110, 2017.
- [192] Y. Zhang, N. Meratnia, P. Havinga, Outlier detection techniques for wireless sensor networks: A survey, *IEEE communications surveys & tutorials* 12 (2), 159–170, 2010. <https://doi.org/10.1109/SURV.2010.021510.00088>.

- [193] J. Wang, Q. Kuang, S. Duan, A new online anomaly learning and detection for large-scale service of internet of thing, *Personal and Ubiquitous Computing* 19 (7), 1021–1031, 2015.
- [194] H. Sun, X. Wang, R. Buyya, J. Su, Cloudeyes: Cloud-based malware detection with reversible sketch for resourceconstrained internet of things (iot) devices, *Software: Practice and Experience* 47 (3), 421–441, 2017. <https://doi.org/10.1002/spe.2420>.
- [195] D. Oh, D. Kim, W. W. Ro, A malicious pattern detection engine for embedded security systems in the internet of things, *Sensors* 14 (12), 24188–24211, 2014. <https://doi.org/10.3390/s141224188>.
- [196] S. O. Amin, M. S. Siddiqui, C. S. Hong, J. Choe, A novel coding scheme to implement signature based ids in ip based sensor networks, in: 2009 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management-Workshops, IEEE, pp. 269–274, 2009.
- [197] H. Sedjelmaci, S. M. Senouci, T. Taleb, An accurate security game for low-resource iot devices, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (10), 9381–9393, 2017. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2701551>.
- [198] D. Midi, A. Rullo, A. Mudgerikar, E. Bertino, Kalis—a system for knowledge-driven adaptable intrusion detection for the internet of things, in: 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), IEEE, pp. 656–666, 2017.
- [199] Y. Lee, Y. Lee, Toward scalable internet traffic measurement and analysis with hadoop, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 43 (1), 5–13, 2012. <https://doi.org/10.1145/2427036.2427038>.
- [200] M. Wullink, G. C. Moura, M. Müller, C. Hesselman, Entrada: A high-performance network traffic data streaming warehouse, in: NOMS 2016-2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, IEEE, pp. 913-918, 2016.
- [201] C. Orsini, A. King, D. Giordano, V. Giotsas, A. Dainotti, Bgpstream: a software framework for live and historical bgp data analysis, in: Proceedings of the 2016 Internet Measurement Conference, pp. 429–444, 2016.
- [202] M. Becchi, M. Franklin, P. Crowley, A workload for evaluating deep packet inspection architectures, in: 2008 IEEE International Symposium on Workload Characterization, IEEE, pp. 79–89, 2008.
- [203] F. Schneider, J. Wallerich, A. Feldmann, Packet capture in 10-gigabit ethernet environments using contemporary commodity hardware, in: International Conference on Passive and Active Network Measurement, Springer, pp. 207–217, 2007.





Classification of cancer images with CNN-based deep learning approach

CNN tabanlı derin öğrenme yaklaşımı ile kanser görüntülerinin sınıflandırılması

Halit Çetiner^{1,*} 

¹ Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, 32000, Isparta Turkey

Abstract

Skin cancers known as melanoma (mel), dermatofibroma (df), and vascular (vasc), benign keratosis (bkl), melanocytic nevi (nv), basal cell carcinoma (bcc), actinic keratosis (akiec) have a high similarity. Accurate classification of specified skin cancers at an early stage is important in terms of saving human life. In this article, a high-accuracy deep learning model is proposed for the classification processes of common skin cancers. The proposed model is a model that helps skin specialists with a high workload and has rapid diagnosis and classification competence. A 30-layer CNN model is proposed that takes advantage of the swish and ReLU activation functions in the classification of highly similar skin cancers. Using this model, 0.99%, 0.99%, 0.96%, 0.99%, 0.92%, 0.99%, 0.95% F1 score values were obtained in the classification of skin cancers named akiec, bcc, bkl, df, nv, vasc, mel, respectively. In terms of precision and recall measurement metrics in the classification of skin cancers named Akiec, bcc, bkl, df, nv, vasc, mel, respectively, 0.99%, 0.99, 0.93, 0.99, 0.97, 0.99, 0.94 precision and 0.99, 0.98, 0.99, 1, 0.87, 1, 0.97 recall values were obtained. Based on the performance results obtained, it can be said that the proposed model correctly classifies seven very similar skin cancers.

Keywords: CNN, Random over sampler algorithm, Skin cancer, Deep learning

1 Introduction

In 2018, 9.6 million people died as a result of cancer cases [1]. It is reported that there is an increase in cancer cases due to various factors caused by lifestyle, genetic problems, air, water and soil pollution [2]. The number of people living on Earth is increasing day by day. The total number of people living on Earth is expected to reach ten billion in the coming years [3]. Parallel to this, various institutions and organizations, especially the World Health Organization (WHO), state that the diseases that impair human health have increased in the past ten years [4]. Pollution from water, air, and soil is among the factors that affect human health. As Pimentel et al. state, environmental degradation is considered the leading cause of death in the world today [4]. Major deaths occur as a result of air, water

Öz

Halk arasında melanoma (mel), dermatofibroma (df), ve vascular (vasc), bening keratosis (bkl), melanocytic nevi (nv), basal cell carcinoma (bcc), actinic keratosis (akiec) olarak bilinen cilt kanserleri yüksek benzerliğe sahiptir. Belirtilen cilt kanserlerinin erken aşamada doğru bir şekilde sınıflandırılması insan yaşamını kurtarması açısından önemlidir. Bu makalede yaygın görülen cilt kanserlerinin sınıflandırma süreçleri için yüksek doğruluklu bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Önerilen model, genel olarak iş yoğunluğu yüksek olan cilt uzmanlarına yardımcı, hızlı tanı ve sınıflandırma yetkinliğine sahip bir modeldir. Birbirine oldukça benzer olan cilt kanserlerinin sınıflandırılmasında, swish ve ReLU aktivasyon fonksiyonlarının avantajlarından faydalanan 30 katmanlı bir CNN modeli önerilmiştir. Bu model kullanılarak akiec, bcc, bkl, df, nv, vasc, mel adlı cilt kanserlerinin sınıflandırılmasında sırasıyla 0.99%, 0.99%, 0.96%, 0.99%, 0.92%, 0.99%, 0.95% F1 score değerleri elde edilmiştir. Akiec, bcc, bkl, df, nv, vasc, mel adlı cilt kanserlerinin sınıflandırılmasında precision ve recall ölçüm metrikleri açısından sırasıyla 0.99%, 0.99, 0.93, 0.99, 0.97, 0.99, 0.94 precision ve 0.99, 0.98, 0.99, 1, 0.87, 1, 0.97 recall değerleri elde edilmiştir. Elde edilen performans sonuçlarına göre önerilen modelin birbirine oldukça benzer yedi farklı cilt kanserini doğru bir şekilde sınıflandırdığı söylenebilir.

Anahtar kelimeler: CNN, Rastgele yeniden örnekleme algoritması, Cilt kanseri, Derin öğrenme

and soil pollution, malnutrition and the damage caused by humans to the environment. Beyond this, another factor that harms human health is considered tobacco-related smoke and indoor cooking [5]. There is an increase in the number of cancer cases related to the stated effect and environmental factors [4].

Although cancer cases are seen in various organs and tissues, there has recently been an increase in skin cancers [6]. The reason for the increase in skin cases is reported to be the effect of air, water and soil pollution [2], [7]. The depletion of the ozone layer, which occurs together with these pollutants, causes the harmful sun rays to directly harm people. As a result, an increase in the incidence of skin cancer is observed [8-10]. The skin is defined as the largest human superficial organ [11]. The skin serves to protect the

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: halitcetiner@isparta.edu.tr (H. Çetiner)

Geliş / Recieved: 14.07.2022 Kabul / Accepted: 09.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1143693

internal environment from the external environment in the event of possible attacks on human organs. In addition to these, skin helps to maintain the human body temperature under normal conditions. It provides the first precaution against diseases that will protect the body from a possible harmful sunlight. Allows the formation of vitamin D by providing the absorption of beneficial sun rays [11]. However, in case of exposure to excessive sunlight, damage to the skin surfaces may occur and abnormal proliferation may occur. In this case, the disease that starts on the skin surface can progress.

Analyzes should be carried out by detecting abnormalities on the skin surface in variable ways and structures. Medical analyzes can be performed on images of skin surfaces using different techniques. Within the scope of this article, skin cancer types such as akiec, bcc, bkl, df, mel, nv, and vasc are analyzed. It is important to treat other types, including the mel type, in the early stages before they become widespread. However, if the progression of skin lesions is detected late, the patient's survival chance decreases to 10% [12].

To solve the specified problem with artificial intelligence algorithms, research has been carried out. As a result of the research, it has been determined that traditional artificial neural network algorithms based on classical machine learning have difficulties in solving these problems [13]. For this reason, the analysis of different types of skin cancer images has been carried out with deep learning methods, which are very popular today. Deep learning allows to do original studies in many different disciplines such as natural language processing, emotion analysis, computer vision analysis, text analysis, voice recognition, biomedical image analysis [14–16]. Deep learning applications, which have not been widespread until today, have become widespread due to reasons such as the hardware being not very powerful. The reason for this expansion is not only the increase in hardware capabilities, but also the increase in data sets from different disciplines. A model based on Convolution Neural Networks (CNN) algorithms, which is a sub-field of deep learning, has been created to classify skin cancer types. In order to increase the success of the created model, the Random Over Sampler algorithm was run on the data set with data imbalance. As a result of its execution, data set imbalances were eliminated. Data number imbalances between classes are eliminated. The Random Over Sampler algorithm [17–19] is a successful algorithm that is actively used to resolve data set imbalances. Lu et al. [19] state that he used different data balancing algorithms to eliminate data imbalances in his research. However, they declare that the Random Over Sampler algorithm is more successful than the others. By increasing the class accuracy of this method, it has increased the recall, F1 score, precision values at the same rate.

In the literature, as well as architectural models based on pre-trained neural networks, skin cancer types can be classified with CNN models created by the succession of multiple layers of deep learning with a certain logic.

Brinker et al. report that it makes sense to use CNN-based models for the classification of skin lesions, as they perform well in small or large datasets of skin cancer [20]. However,

the fact that there are studies that are not open to use in the datasets used limit the comparison of the developed methods. For the stated reason, a CNN-based model has been developed that can be tested on a common data set. Approaches that provide a classification of CNN-based skin lesions in the literature were examined according to the specified theme. During the review, the data set used in this article and CNN studies on different data sets were evaluated.

Hosny et al. classified skin cancer types mel, nv, bcc, akiec, bkl, df, and vasc with an AlexNet-based CNN model [21]. The proposed model is trained on the ISIC 2018 dataset. In experimental studies, they achieved success rates of 98.70%, 95.60%, 99.27%, and 95.06%, respectively, in terms of parameters called accuracy, sensitivity, specificity, and precision. Melanoma-type skin cancer was classified with a deep CNN model proposed by Yu et al. [22]. They appear to use the residual learning approach that deals with extreme learning problems. It created a fully convolutional residual network-based model for classification. With the CNN-based model they created, they reached an average of 85.5% accuracy. For classification of skin lesions, Brinker et al. are based on CNN-based architectures VGG 16 and GoogleNet [20]. They developed two different CNN-based models with these underlying architectures. They achieved a classification rate of 79.7% with the VGG 16-based CNN model. The GoogleNet-based CNN model reached 81.5% classification rate.

Ramachandro et al. used the same data balancing algorithm and data set that we used in the article in their study [23]. However, in the study, it is seen that only images containing akiec, bcc, df and mel types are classified, not seven different types of skin cancer. With the CNN model they developed, it is seen that the accuracy, precision, recall, and F1 score performance metrics reached 93%, 91%, 89%, and 92% on average, respectively. Sae-Lim et al. used the same data set used in the article [24]. Performed data augmentation to balance the data in the data set. In the tests performed on the balanced data set with data augmentation, they achieved success results of 83.23%, 87%, 85% and 82%, respectively, in terms of accuracy, specificity, sensitivity, and F1 score with the MobileNet-based CNN model. In tests carried out without data augmentation, they achieved success rates of 83.93%, 81%, 84%, and 80%, respectively, in terms of accuracy, specificity, sensitivity, and F1 score performance criteria with the MobileNet-based model. Transferring from architectural models with high computational costs such as MobileNet, AlexNet, GoogleNet has an effect on the high results. One of the different aspects of the model proposed from these studies is that it was developed without using any transfer learning architecture. As the main effect of this, it can be said that the proposed model is lighter. At the same time, with the proposed model, very satisfactory results were obtained not only in accuracy but also in F1 score, recall and precision values. Another important difference of our study is that there is no big difference between accuracy, F1 score, recall, and precision values.

According to the principles stated in this study, the analysis was developed with a deep learning-based CNN model without using any pre-trained architectural structure. In pattern recognition and classification studies, CNN-based models facilitate the extraction of distinctive features. An effective feature extraction structure was created using seven different convolutional layers.

The main contributions of the article, which was carried out for this purpose, to the literature are given below.

- In the proposed CNN model, the ReLU activation-based hard swish (h-swish) activation function is used. In addition, it is aimed to improve the performance results. There is evidence that the h-swish activation function improves classification accuracy [25].
- The strengths of the swish and ReLU activation functions are used in the proposed CNN model consisting of 30 layers.
- With the proposed CNN model, a success score of 97.65% was achieved.

The following parts of the article consist of three different parts. In the first part, materials and methods used in experimental studies are presented in the article. In the second part, the performance metrics of the proposed CNN model are given. In the last section, concluding information about the article is presented.

2 Material and methods

2.1 Material

In article studies, the reliability and validity of the deep learning model depend on the data set. For this reason, a data set whose data were prepared by experts was preferred.

The data set preferred and used in the article was prepared in the Dermatology department of the country of Austria. There are 10015 images in the data set prepared by skin specialists from 2 different dermatology departments [26]. In this dataset, there are 7 classes with different targets named akiec, bcc, bkl, df, mel, nv, and vasc. Akiec, bcc, bkl, df, mel, nv, vasc target tags in this data set consist of 327, 514, 1089, 115, 1111, 6660, 142, respectively. Class distributions according to the specified target labels are shown in Figure 1. Nv, mel, bkl, bcc, akiec, vasc, df represent the number of images in labeled classes with numbers 4, 6, 2, 1, 0, 5, 3, respectively.

In Figure 1, the class distributions of the data set used in the experimental studies of the article are shown. The data set shown has uneven data distribution. When training is done in this way, there are imbalances and deficiencies. In order to increase the success of the created model, the Random Over Sampler algorithm was run on the data set with data imbalance. As a result of its operation, the imbalances in the data set were eliminated. Different results of experimental study performance are presented to examine whether it can be eliminated. The data set balanced with the Random Over Sampler algorithm is shown in Figure 2.

The Random Over Sampler algorithm applied to eliminate data number imbalances between classes is a successful algorithm that is used actively to eliminate data set imbalances [17–19]. Lu et al. [19], state that they used different data balancing algorithms, including the Random

Over Sampler algorithm, to eliminate data imbalances in their research. In addition, they declare that the Random Over Sampler algorithm is more successful than other data balancing algorithms. When increasing the class accuracy of this method, it is expected that it will increase the recall, the F1 score, and the precision values at the same rate. As a result of the experimental studies, significant results were obtained in parallel with expectations.

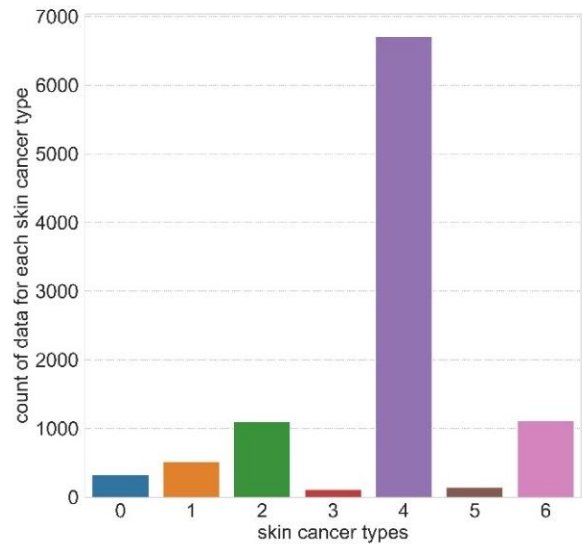


Figure 1. Data set in-class distributions

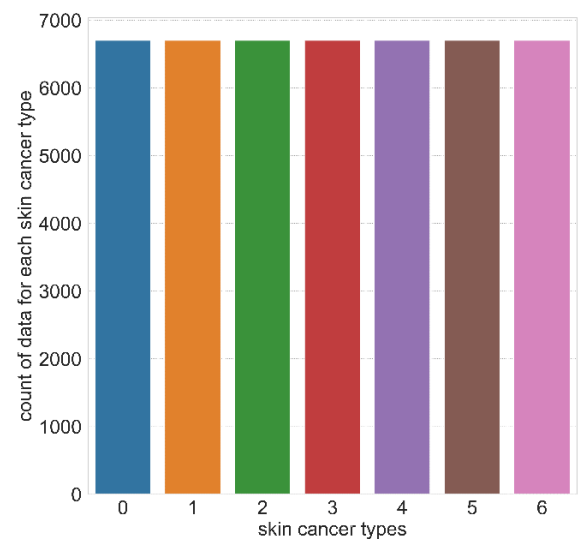


Figure 2. Balanced dataset distributions

2.2 The proposed CNN model

A CNN model is proposed for the automatic classification of skin cancer types. A CNN model consisting of 30 layers is proposed. The proposed model consists of four block structures. This block structure is simply shown in Figure 3. The detailed representation of the specified block structures is presented in Figure 4 and 5. As a result of combining the block 1 and block 2 structures presented in

Figure 4 and the block 3 and block 4 structures presented in Figure 5, 30 layers are formed.

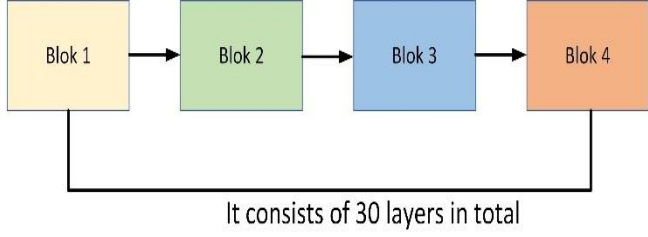


Figure 3. Block diagram of the proposed model

Since it would be complex to show all layers in a single Figure, the flow diagram of the proposed model is shown in blocks as indicated. In the first layer of the proposed model, 28x28x3 skin cancer images are given as input. Here 28x28 shows the width and height dimensions of the skin cancer images given as input. The images given as input have 3 color channels. Color channels are also presented to the model by multiplying with the input sizes. In 7 of the first 14 layers of the proposed model, the h-swish activation function is used instead of the ReLU activation function, which is used predominantly in different transfer learning-based architectures [27]. The ReLU activation function, one of its distinguishing features is that the input is a piecewise linear function in a multilayer deep learning network [28]. The Swish function is an activation function such as ReLU. The swish activation function with a sigmoid multiplier is shown in Equation (1).

$$swish(x) = x\sigma(x) \quad (1)$$

The ReLU activation function is widely used in the literature because it alleviates the gradient disappearance problem. ReLU activation function neurons fall into the hard saturation area during model training. As a result of this decrease, the weight values cannot be updated [29]. However, it is seen that it is used as a broadcast in quite different applications to be used in positive inputs [28–30]. At the same time, instead of activation functions such as tanh, arctan or sigmoid, it is used because the probability of gradient loss is reduced with the ReLU activation function [21]. The ReLU activation function is presented in Equation (2).

$$ReLU(x) = \max(0, x) \quad (2)$$

The sigmoid activation function is used in the function defined in Equation (1). Sigmoid activation has been transformed into a function called h-swish function due to its high computational cost. This function is given in Equation (3). According to Big O notation, the complexity of the work can be calculated in terms of time and algorithm [31]. Many input parameters such as the number of multiplications and additions in the convolution layers are considered to be constant so that the specified calculations can be made.

$$h-swish[x] = x \frac{ReLU6(x + 3)}{6} \quad (3)$$

In this case, a calculation was carried out to measure the effect of the ReLU and h-swish activation functions in the proposed model. In the specified function in Equation (3), the ReLU6 function is used instead of the sigmoid activation function with high processing load. Since the middle of 2019, it has been increasing its effectiveness with the h-swish non-linear activation function instead of ReLU. In the other layers, other than the first 7 layers, the ReLU activation function is used to benefit from the features of both activation functions that will increase the efficiency. In addition, in the proposed model, when the ReLU activation function is used instead of the h-swish activation function, an average performance degradation of 4% has been experienced. When its effectiveness was measured with the h-swish activation function, performance results close to Table 2 were obtained. However, the h-swish activation function is trained in more time than the ReLU activation function. The model with all ReLU activation function trained ten seconds faster than the model with all h-swish activation function. At this point, while the h-swish activation function is used in convolution layers, the ReLU activation function is used in other layers. In the distinction made, this method was used because it was desired to determine the experimental studies and the working separation of both activations. In addition, when activation functions are used with the mentioned approach, an increase of 1% in performance measures was observed compared to experimental studies with all h-swish activation. Using the block diagrams shown in Figure 4, the first part of the proposed model using swish activation was obtained by using the input layer, block 1, and 3 blocks 2. The convolution layers in block 1 were created using 32 filters with 2x2 window sizes. Two-dimensional maximum pooling is used in the maximum pooling layers with 2x2 window sizes. The stride value is defined as none in all Max pooling layers. In Block 2, convolution layers with 64, 128 and 256 2x2 window sizes were applied, respectively. At the same time, the stride values of the max pooling layer layers in block 2 are set to none. After the first parts of the proposed model were created from the specified blocks, it was transformed into a one-dimensional matrix with the Flatten layer.

In the second stage of the proposed model, upper layers with ReLU activation function were added. On top of the 14 layers of the structure specified in Figure 4, the blocks whose block diagrams are shown in Figure 5 were added. In blocks 3 and 4, the dropout layer was used, which performs 0.1 neuronal dropout. In the Dense layer, which was applied as the hidden neuron layer, 256 hidden neurons were used. Batch normalization was applied to normalize the input between the layers. In the last step, classification layer with softmax activation function is defined.

The structures defined in Figures 4 and 5 and the flow diagram of the proposed model are shown.

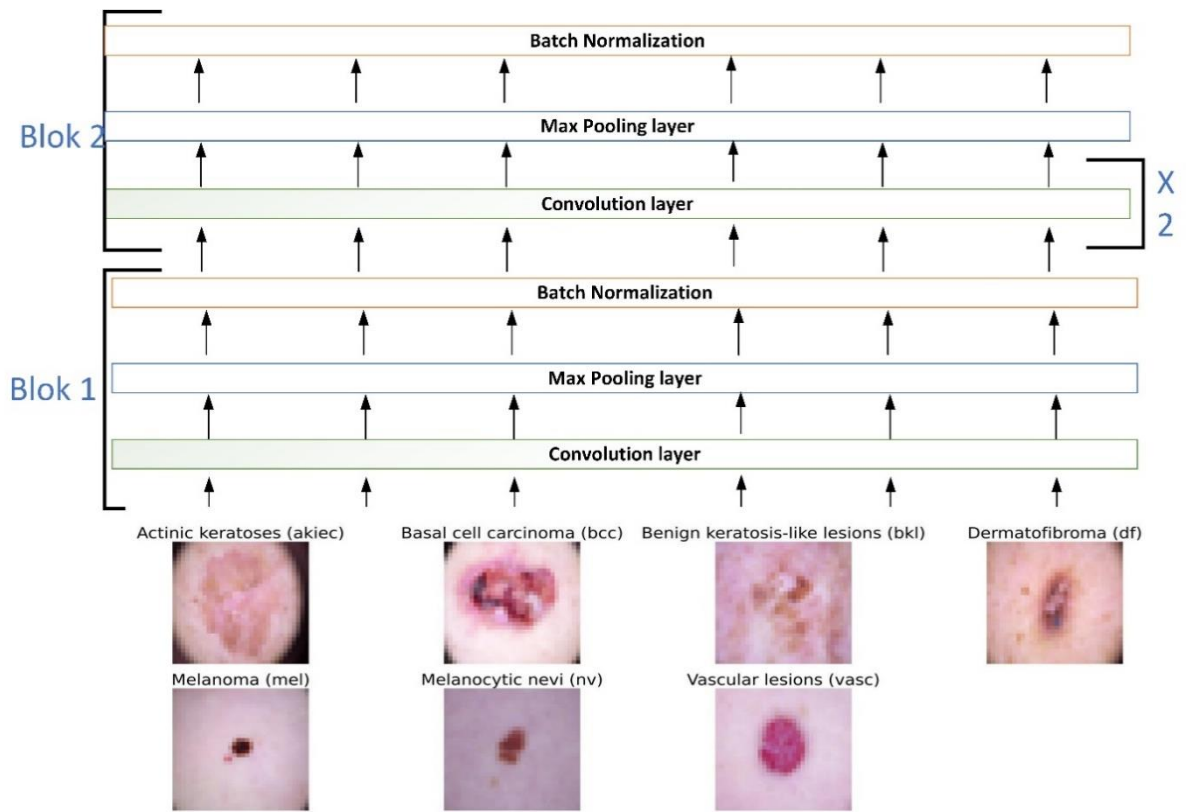


Figure 4. The proposed CNN model block 1 and block 2 diagrams

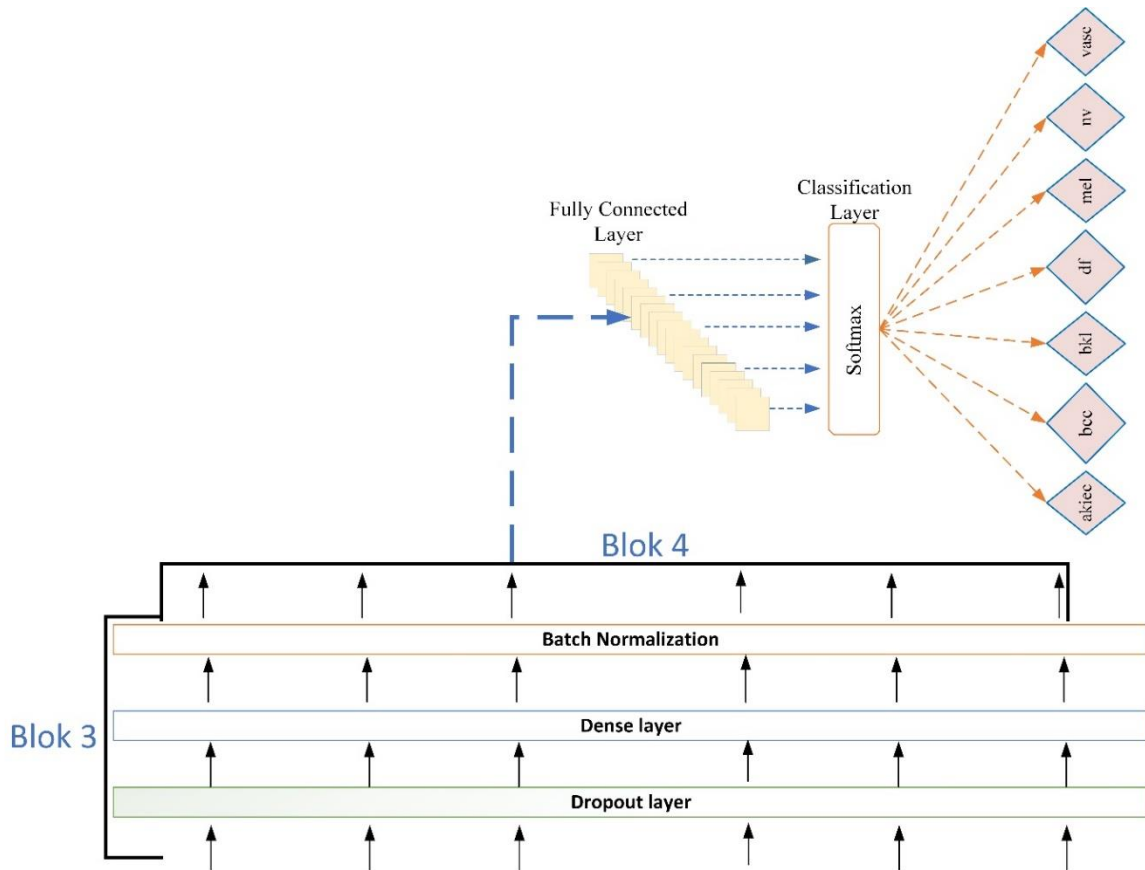


Figure 5. The proposed CNN block 3 and block 4 diagrams

Studies were carried out to determine the effectiveness of the proposed model according to the structures shown. The experimental studies carried out and the performance results obtained are evaluated in terms of F1 score, recall, precision, accuracy values, and presented in Section 3.

3 Results and discussion

The performance results of the proposed CNN model, which were obtained as a result of the experimental studies carried out on the data set with 7 different classes, are presented in this study. To obtain the best performance metrics, the first 14 layers of the proposed CNN model algorithm are shown with block 1 and block 2 block diagrams. The next layers are presented in detail with block 3 and block 4 block diagrams. That is, the first 14 layers are represented in blocks 1 and 2, while the remaining 16 layers are represented in blocks 3 and 4. The accuracy and loss graphs obtained from the experimental studies using the Adam optimization method with 15 iterations are presented in Figure 6 and Figure 7. Batch size value, which is one of the hyperparameters other than epoch, is also set to 128. The model is trained with Adam optimization method without any learning rate. The training and test accuracy graphs of the proposed CNN model are given in Figure 6. With the proposed CNN model, success rates of 98.67% and 97.65% were achieved, respectively, in terms of training and test accuracy.

There is a data imbalance between the types of skin cancer used in this article. Random Over Sampling method was used to eliminate this imbalance. Experimental studies have been carried out to measure whether dataset balancing is successful using this method. In Table 1, the results obtained without data balancing are given. As can be seen from the results, the imbalance between the types of data set greatly affects the performance results. For this reason, the data set is in a balanced state in the next steps of the study. The results obtained in all graphs and tables after Table 1 are the results obtained after data balancing.

Table 1. The performance results of the proposed CNN model without random over sampler

Skin types	Precision	Recall	F1 score
Akiec	0.60	0.27	0.37
Bcc	0.53	0.60	0.56
Bkl	0.59	0.33	0.42
Df	0.40	0.22	0.28
Nv	0.84	0.91	0.87
Vasc	0.91	0.37	0.53
Mel	0.46	0.41	0.44
Weighted average values	0.74	0.73	0.72

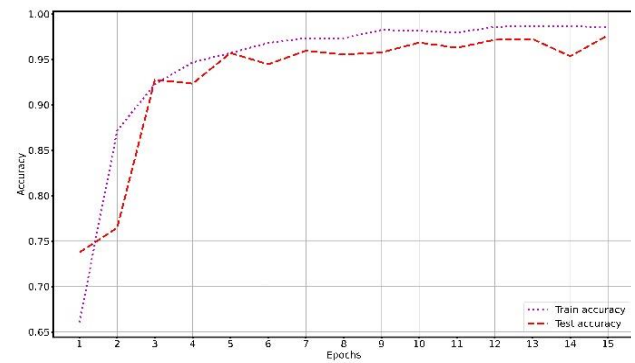


Figure 6. Graphs of training and testing accuracy of the proposed CNN model to classify skin cancer type

Table 2. The proposed CNN model performance results

Skin types	Precision	Recall	F1 score
Akiec	0.99	0.99	0.99
Bcc	0.99	0.98	0.99
Bkl	0.93	0.99	0.96
Df	0.99	1	0.99
Nv	0.97	0.87	0.92
Vasc	0.99	1	0.99
Mel	0.94	0.97	0.95
Weighted average values	0.97	0.97	0.97

The training and test losses obtained by using the proposed CNN model were 0.03%, 0.09%, respectively.

The results of the proposed CNN model with 15 iterations are given in Table 2. According to the given table, the F1 score points in akiec, bcc, df, and vasc classes are quite high. The recall values of the df and vasc classes were higher than the other classes. The precision values of the Akiec, bcc, df, and vasc classes were higher than those of the other classes. When examined in general, the results obtained are close to each other, but at a satisfactory level.

Average precision, recall, and F1 score values reached 97%. With these results, confusion matrix results are presented in order to show in detail that the performance of the proposed CNN model is good. The results of the confusion matrix presented are given in Figure 8. How many misdiagnoses in which classes are all presented in Figure 8.

The skin cancer images shown in Figure 9 are given as input to the proposed CNN model. Estimated and actual target class label numbers obtained as a result of giving are shown. The target tag numbers here are class tags with numbers 4, 6, 2, 1, 0, 5, 3 respectively, nv, mel, bkl, bcc, akiec, vasc, df.

According to the performance results of the proposed CNN model, feature-based skin cancer classification study [32], color and tissue lesion-based descriptive method [33], CNN model with logistic regression classifier [34] got high

results. According to the results obtained, the test accuracy rate of the proposed CNN model has an accuracy difference of 16.65%, 16.65%, 18.85% from the studies [32], [33] and [34], respectively. With these results, the proposed CNN model has proven success with training, test accuracy, and loss graphs. At the same time, together with the confusion matrix, it allowed the results obtained on a class basis to be examined in detail. In Table 3, a comparison of the proposed model with similar data sets is presented. The proposed model performed as strong as the studies in the literature.

Table 3. Comparison of the proposed model with studies using similar data sets

Author	Precision	Recall	F1 score	Accuracy
Ramachandro et al. [23]	91%	89%	92%	93%
Sae-Lim et al. [24] with data augmentation	-	85%	82%	83.23%
Sae-Lim et al. [24] without data augmentation	-	84%	80%	83.93%
Proposed model	97%	97%	97%	97.65%

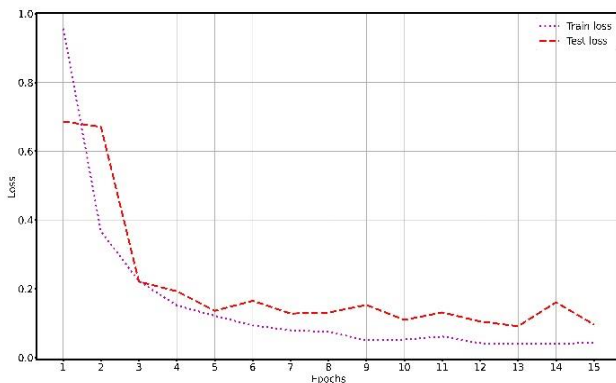


Figure 7. Training and test loss plots of the proposed CNN model

4 Conclusions

Ozone layer depletion, which occurs due to the increase in environmental pollution, is a subject of research by scientists. Because as a result of ozone layer damage, the amount of exposure to harmful sun rays that radiate at different wavelengths increases. For such reasons, in this article a system is proposed that automatically classifies skin cancers that can be seen in different age ranges. In general, there are 30 deep learning layers in the proposed structure. The proposed CNN model is developed using a lightweight, computationally inexpensive swish activation function. The Random Over Sampler algorithm, which contributed to the elimination of the imbalance of the data set, also had an effect on the performance results obtained. When the obtained F1 score, recall, precision, and accuracy values are examined, it is seen that the results are close to each other.

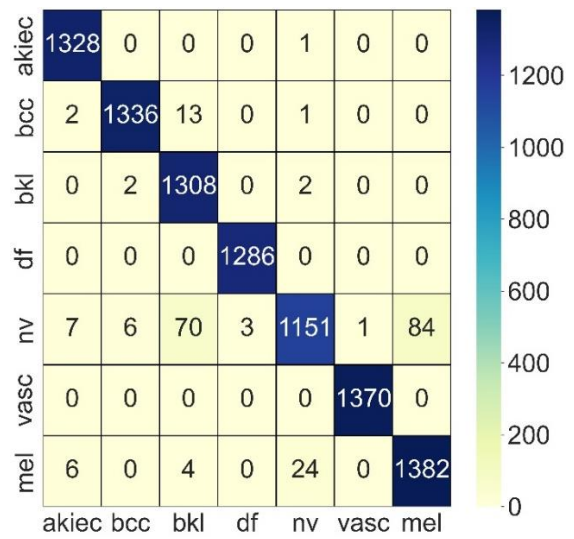


Figure 8. The proposed CNN model confusion matrix

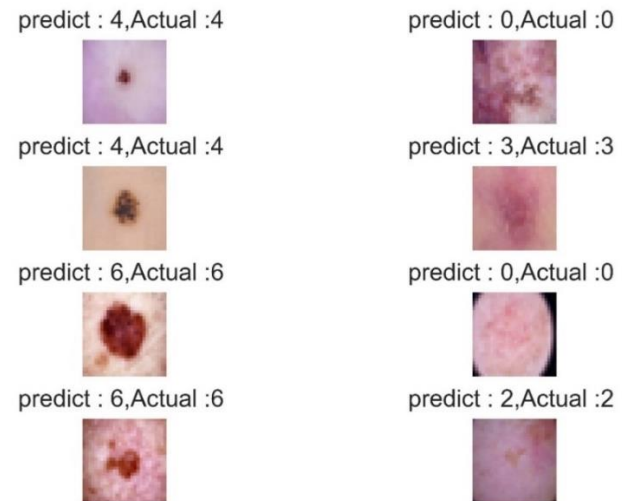


Figure 9. Test results obtained with the proposed CNN model

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate: 6%

References

- [1] H. Younis, M. H. Bhatti, and M. Azeem, Classification of Skin Cancer Dermoscopy Images using Transfer Learning, in 2019 15th International Conference on Emerging Technologies, 1–4. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICET48972.2019.8994508>.
- [2] C. De Martel, J. Ferlay, S. Franceschi, J. Vignat, F. Bray, D. Forman, and M. Plummer, Global burden of cancers attributable to infections in 2008: a review and synthetic analysis, *Lancet Oncol.*, 13(6), 607–615, 2012.
- [3] R. Perroy, World population prospects, United Nations, 1(6042), 587–592, 2015.

- [4] D. Pimentel, S. Cooperstein, H. Randell, D. Filiberto, S. Sorrentino, B. Kaye, C. Nicklin, J. Yagi, J. Brian, J. O'Hern, A. Habas, and Weinstein, Ecology of Increasing Diseases: Population Growth and Environmental Degradation, *Hum. Ecol. Interdiscip. J.*, 35(6), 653–668, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10745-007-9128-3>.
- [5] N. Bruce, R. Perez-Padilla, and R. Albalak, The health effects of indoor air pollution exposure in developing countries, *Geneva World Heal. Organ.*, 11, 2002.
- [6] U.-O. Dorj, K.-K. Lee, J.-Y. Choi, and M. Lee, The skin cancer classification using deep convolutional neural network, *Multimed. Tools Appl.*, 77(8), 9909–9924, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-5714-1>.
- [7] K. E. Kim, D. Cho, and H. J. Park, Air pollution and skin diseases: Adverse effects of airborne particulate matter on various skin diseases, *Life Sci.*, 152, 126–134, 2016.
- [8] A. J. McMichael and T. McMichael, Planetary overload: global environmental change and the health of the human species. Cambridge University Press, 1993.
- [9] P. Martens and A. J. McMichael, Environmental change, climate and health: issues and research methods. Cambridge University Press, 2009.
- [10] R. L. McKenzie, L. O. Björn, A. Bais, and M. Ilyas, Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2(1), 5–15, 2003.
- [11] F. W. Alsaade, T. H. H. Aldhyani, and M. H. Al-Adhaileh, Developing a Recognition System for Diagnosing Melanoma Skin Lesions Using Artificial Intelligence Algorithms., *Comput. Math. Methods Med.*, 9998379, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9998379>.
- [12] D. B. Mendes and N. C. da Silva, Skin lesions classification using convolutional neural networks in clinical images, *arXiv Prepr. arXiv1812.02316*, 2018.
- [13] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, Deep learning, *Nature*, 521(7553), 436–444, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
- [14] M. Choudhary, S. S. Chouhan, E. S. Pilli, and S. K. Vipparthi, BerConvoNet: A deep learning framework for fake news classification, *Appl. Soft Comput.*, 110, 107614, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107614>.
- [15] T. Chen, R. Xu, Y. He, and X. Wang, Improving sentiment analysis via sentence type classification using BiLSTM-CRF and CNN, *Expert Syst. Appl.*, 72, 221–230, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.10.065>.
- [16] X. Xu, L. Zhang, J. Li, Y. Guan, and L. Zhang, A Hybrid Global-Local Representation CNN Model for Automatic Cataract Grading, *IEEE J. Biomed. Heal. Informatics*, 24(2), 556–567, 2020, <https://doi.org/10.1109/JBHI.2019.2914690>.
- [17] A. Nabil, M. Seyam, and A. Abou-Elfetouh, Deep Neural Networks for Predicting Students' Performance, in Proceedings of the 52nd ACM Technical Symposium on Computer Science Education, 2021. <https://doi.org/10.1145/3408877.3439685>.
- [18] J. Liu, K. Li, B. Song, and L. Zhao, A Multi-stream Convolutional Neural Network for Micro-expression Recognition Using Optical Flow and {EVM}, *CoRR*, 2020.
- [19] W. Lu, H. Hou, and J. Chu, Feature fusion for imbalanced ECG data analysis, *Biomed. Signal Process. Control*, 41, 152–160, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2017.11.010>.
- [20] B. Titus Josef, H. Achim, U. Jochen Sven, G. Niels, S. Dirk, K. Joachim, B. Carola, S. Theresa, E. Alexander, and V. Christof, Skin cancer classification using convolutional neural networks: systematic review, *J. Med. Internet Res.*, 20(10), 2018.
- [21] K. M. Hosny, M. A. Kassem, and M. M. Fouad, "Classification of Skin Lesions into Seven Classes Using Transfer Learning with AlexNet, *J. Digit. Imaging*, 33(5), 1325–1334, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10278-020-00371-9>.
- [22] L. Yu, H. Chen, Q. Dou, J. Qin, and P.-A. Heng, Automated Melanoma Recognition in Dermoscopy Images via Very Deep Residual Networks, *IEEE Trans. Med. Imaging*, 36(4), 994–1004, 2017. <https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2642839>.
- [23] M. Ramachandro, T. Daniya, and B. Saritha, Skin Cancer Detection Using Machine Learning Algorithms, in 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, , 1–7, 2021. <https://doi.org/10.1109/i-PACT52855.2021.9696874>.
- [24] W. Sae-Lim, W. Wettayaprasit, and P. Aiyarak, Convolutional Neural Networks Using MobileNet for Skin Lesion Classification, in 2019 16th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering., 242–247, 2019. <https://doi.org/10.1109/JCSSE.2019.8864155>.
- [25] A. M. Alhassan and W. M. N. W. Zainon, Brain tumor classification in magnetic resonance image using hard swish-based RELU activation function-convolutional neural network, *Neural Comput. Appl.*, 33(15), 9075–9087, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05671-3>.
- [26] P. Tschandl, C. Rosendahl, and H. Kittler, The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions, *Sci. data*, 5(1), 1–9, 2018.
- [27] S. Qian, C. Ning, and Y. Hu, MobileNetV3 for Image Classification, in 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering, 490–497, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICBAIE52039.2021.9389905>.
- [28] K. Eckle and J. Schmidt-Hieber, A comparison of deep networks with ReLU activation function and linear spline-type methods, *Neural Networks*, 110, 232–242, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.11.005>.
- [29] G. Lin and W. Shen, Research on convolutional neural network based on improved Relu piecewise activation function, *Procedia Comput. Sci.*, 131, 977–984, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.239>.

- [30] Y. Yu, K. Adu, N. Tashi, P. Anokye, X. Wang, and M. A. Ayidzoe, RMAF: Relu-Memristor-Like Activation Function for Deep Learning, *IEEE Access*, 8, 72727–72741, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2987829>.
- [31] S. Rubinstein-Salzedo, Big o notation and algorithm efficiency, in *Cryptography*, Springer, 75–83, 2018.
- [32] S.-R.-S. Jianu, L. Ichim, D. Popescu, and O. Chenaru, Advanced Processing Techniques for Detection and Classification of Skin Lesions, in 2018 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing, 498–503, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2018.8540732>.
- [33] I. Giotis, N. Molders, S. Land, M. Biehl, M. F. Jonkman, and N. Petkov, MED-NODE: A computer-assisted melanoma diagnosis system using non-dermoscopic images, *Expert Syst. Appl.*, 42(19), 6578–6585, 2015.
- [34] J. Kawahara, A. BenTaieb, and G. Hamarneh, Deep features to classify skin lesions, in 2016 IEEE 13th international symposium on biomedical imaging, 1397–1400, 2016. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2016.7493528>.





Transfer öğrenmeli ve transfer öğrenmesiz derin ağlar ile inşaat alanında kask tespiti

Helmet detection on the construction site with transfer learning and without transfer learning deep networks

Mehmet Uğur Türkdamar^{1,*}, Murat Taşyürek², Celal Öztürk³

^{1,*}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

²Kayseri Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

³Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Öz

İnsan yaşamını önceleyen sistemlerin yaygınlaşması toplumlara bütüncül fayda sağlamaktadır. Solunum yoluyla bulaşıcı hastalıklardan sakınmak için ağız-burun maskesi takmanın Covid-19 pandemisi ile zorunlu hâle geldiği gibi yapı inşaatında çalışan işçilerin inşaat alanında kafa kaskı takması zorunludur. İnşaat alanlarında çalışan işçilerin kaskını takıp takmadığının kontrolünü göz ile yapmak yorucu ve hataya açıktır. Yapay zekâ tabanlı bilgisayar teknolojilerinin geliştiği bu çağda hayatımızı her anlamda kolaylaştıran sistemlerin varlığı ümit vaat etmektedir. Bu çalışmada görüntü verisinin anlamlandırıldığı evrişimli sinir ağı (ESA) tabanlı derin öğrenme ile kask takma kontrolünün otomatik yapılması önerilmiştir ve YOLO V4, V5 ve Faster R-CNN modellerine uygulanan transfer öğrenme tekniği ile kısıtlı veri seti probleminin üstesinden gelinmiştir. Deneylerde transfer öğrenme uygulanmayan eğitimlere de yer verilerek yöntemin etkinliği incelenmiştir. Sonuçta transfer öğrenmeli YOLO V5 modelinin %98 f1 skor ile 6 farklı model eğitimi arasında en başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kask tespiti, Derin öğrenme, Transfer öğrenme, ESA, Yapay zekâ

1 Giriş

İnşaat alanlarında çalışanlar, ihtiyaca yönelik yapı işlerini gerçekleştirirken kendi sağlıkları için dikkatli olmak durumundadır. İnşası devam eden yapıdan baş bölgesine düşebilecek herhangi bir cisim, ciddi yaralanmalara hatta hayat kaybına sebebiyet verebilir. Bu nedenle inşaat sahası içinde çalışanların kafa koruyucu ekipmanı olarak kask takması ciddi önem teşkil etmektedir. Yakın zamanlı bir istatistiğe göre Çin'deki kazaların yaklaşık %67'si kask takmamaktan meydana gelmiştir [1]. Mevcut prosedürde çalışanların kask takma kontrolünün, ekip başı tarafından yerine getirilmesi vardır, fakat gözetleme yoluyla yapılan bu kontrolde yorulma dolayısıyla gözden kaçırılmalar meydana gelebilmektedir. Bu sebeple insan yaşamını önceleyen

Abstract

The widespread use of systems that prioritize human life provides holistic benefits to societies. In order to avoid respiratory contagious diseases, wearing a mouth-nose mask has become mandatory with the Covid-19 pandemic, and workers working in building construction are required to wear a head helmet at the construction site. It is tiring and error-prone to visually check whether the workers working on the construction sites are wearing their helmets. In this age, where artificial intelligence-based computer technologies are developed, the existence of systems that make our lives easier in every sense is promising. In this study, it is proposed to make helmet wearing control automatic with convolutional neural network (CNN) based deep learning in which the image data is meaningful. The limited data set problem was overcome with the transfer learning technique applied to the YOLO V4, V5 and Faster R-CNN models. The effectiveness of the method was examined by including the trainings in which transfer learning was not applied in the experiments. As a result, it was observed that the YOLO V5 model with transfer learning was the most successful among 6 different model trainings with an f1 score of 98%.

Keywords: Helmet detection, Deep learning, Transfer learning, CNN, Artificial intelligence

sistemlerin tasarımında aktif rol oynayan derin öğrenme ağları, insanı belli bir noktaya kadar devre dışı bırakarak probleme çözüm olarak sunulabilir.

İnternetin gelişmesiyle veri setlerinin, bilimsel çalışmaların artışıyla algoritmaların, donanımın güçlenmesiyle de verinin paralel işlenebilirliğinin yaygınlaşması sonucu derin öğrenme çalışmaları hız kazanmıştır. Derin öğrenme son yıllarda görüntü tanıma, doğal dil işleme, ses tanıma, mobilde virtüs tespiti gibi çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2-5]. Görüntü kaynaklarındaki bilginin anlamlandırılması işlemi, derin öğrenme altyapısını kullanan bilgisayarlı görü teknolojisi sayesinde olmaktadır. Nesne tespiti ise görüntüde, tespiti yapılması istenen nesnelere hangilerinin olduğunu ve bu nesnelere görüntüde nerede olduklarını

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: ugurturkdamar@gmail.com (M. Turkdamar)

Geliş / Received: 12.09.2022 Kabul / Accepted: 14.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1173944

keşfeden bir bilgisayar görme uygulamasıdır. Tespit işlemi, nesnenin görüntüdeki konumunu da bulmaya çalıştığından sınıflandırma problemlerine göre daha komplekstir. Işığın azlığı, arka planla tespiti yapılacak nesnenin iç içe geçmesi, nesnelerin birbirini üzerine gelerek çakışması, görüntüdeki uzak veya yakın nesnelere gibi faktörlerden dolayı; tespit işlemi oldukça zor bir süreçtir. Buna karşın ESA tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılarak gerçekleştirilen nesne tespiti, sayılan çoğu faktörü otomatize ettiği için geleneksel metotlara göre daha başarılıdır.

Bir yapay zekâ tekniği olan derin öğrenme, veriden çeşitli özellikleri çıkarma işini iyi organize olmuş çeşitli doğrusal olmayan katmanlar aracılığı ile beyin veri işleme taklit ederek gerçekleştirilmektedir. Veriden öğrenmesi yönüyle insan öğreniminden esinlenen makine öğrenmesinin; veriyi kabul ettiği girdi, özellik çıkardığı gizli ve isteneni verdiği çıktı olmak üzere 3 katmanı varken, başarılı olmak için daha fazla bilgiye ihtiyaç duyan derin öğrenmenin makine öğrenmesinden ana farkı; görüntü, ses, video gibi karmaşık veriden daha fazla anlam çıkarabilmek için birden çok gizli katmana sahip olmasıdır. Veri, sıralı yapıda olan katmanlardan geçtikçe bilginin yayılımı gerçekleşmekte ve problemin çözümüne bir adım daha yaklaşılmaktadır.

Derin öğrenme tekniklerini içeren makine öğrenmesi, önceden toplanmış etiketli (gözetimli) veya etiketsiz (gözetimsiz) veri setinde eğitilerek önceden görmediği veriyi keşfetmede kullanılır. Makine öğrenmesindeki el ile özellik çıkarma (verinin verilen özelliklerinden hangilerinin sınıflandırma problemine uygun olduğunun belirlenmesi) zaman alıcı ve zorlayıcıdır. Ayrıca el ile özellik çıkarmından yüksek seviyeli özelliklerin eldesi güçtür [6]. Buna karşın derin öğrenme ağları özellik çıkarmayı, katmanlarının içeriğindeki algoritmalar sayesinde otomatikleştirmektedir. Derin öğrenme, çok girdi ile eğitildiğinden görüntü alanında el ile özellik çıkarmaya göre avantajı; ışığa, bozulmaya, çevirmeye ve döndürmeye karşı daha dirençli olmasıdır. Derin öğrenme ağlarından birisi olan evrişimli sinir ağı (ESA); son yıllarda bilgisayar ağları [7], tarım arazileri görüntüleme [8], tıpta hastalık teşhisi [9] gibi farklı alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. ESA'nın başarılı olması için gerek şart çok sayıda veridir. ESA tabanlı derin öğrenme, doğal resimler (her yerde karşımıza çıkan) içeren ImageNet [10], COCO [11] ve PASCAL VOC [12] gibi büyük veri setleri üzerinde dikkate değer başarılar yakalasa da spesifik alanlarda (inşaat kaskı gibi) verinin azlığı sebebiyle yüksek başarı elde edememektedir. Bu handikapı aşmak için insan öğrenim aktarmasından ilham alan transfer öğrenme tekniği işe koşularak çok sayıda veri alanında öğrenilen bilgi, az sayıda veri alanına aktarılabilir. Büyük veri setlerindeki nesnelerin kenar, leke, doku gibi genel özellikleri; küçük veri setindeki nesnelerin çoğu özelliğiyle benzeşmektedir. Bu sayede probleme özgü kurulan ağı; ilk katmanlarında ek bir öğrenmeye ihtiyaç duyulmadan transfer edilen bilgi kullanılabilirken, ileriki katmanlarda alana ait daha detay nesne özellikleri öğrenilir. Örneğin bir işi yapmayı öğrenmiş birisi, daha önce yapmadığı benzer başka bir işi yapmayı öğrenmeye çalıştığında fazla zorlanmayacaktır çünkü önceki işte öğrendiği bilgisini, yeni işe rahatlıkla

uygulayabilecektir. Aynı, insanın yeni bir işi; en baştan öğrenmesine göre bilgi transferiyle öğrenmesi sayesinde öğrenim süresinin kısalması ve daha doğru sonuçları alması gibi, derin ağları eğitmede kullanılan bu teknik ile de eğitim süresi ciddi oranda düşmekte ve çoğu zaman, en baştan eğitime göre daha yüksek skorlar elde edilebilmektedir.

Kaskın takılıp takılmadığını kontrol etmek için RFID; reader ve etiketi kullanan yöntem Kelm vd. [13] ve Torres vd. [14] tarafından önerilmiştir. HOG transform yöntemi ile iki aşamalı tespit işlemi Rubaiyat vd. [15] gerçekleştirmiştir. Malisiewicz vd. [16] SVM kullanarak aday kutularının, tespiti istenen nesnelere denk gelmediğinin kontrolünü sağlamıştır. Liu vd. [17] ise bir görüntü sahnesindeki tüm yüz kaskını bulmak için Canny'sınır tespitine tam uyan çemberler kullanmıştır. Bu metotlar geleneksel makine öğrenmesi kapsamına girmektedir ve genelde özelliklerin; güçlü yetilerle, kompleks tasarım işlemiyle ve düşük genelleme kabiliyetiyle çıkarılması ile sonuçlanmaktadır.

Yakın yıllarda ortaya çıkan nesne tespiti algoritmaları ESA tabanlı olup hız ve doğruluk açısından büyük bir potansiyele sahiptir [18]. Kask tespitinde ESA tabanlı derin öğrenme modellerini kullanan çalışmalardan; Fangbo vd. [19] YOLO V5'in tüm modellerini (x, l, m, s) transfer öğrenmeli ve öğrenmesiz eğittikten sonra karşılaştırarak en yüksek mAP değerini transfer öğrenmeli YOLO V5x'ten %94,7 ile almıştır. Fan vd. [20] kask tespiti için kullandığı YOLO V3'ün omurga ağını DenseNet ile değiştirerek orijinal YOLO V3'e göre %2,44 doğruluk artışı elde etmiştir. Yange vd. [21] 3.261 kask görüntülü veri setinde SSD-MobileNet algoritması işe koşarak %95 hassaslık yakalamıştır. Choudhury vd. [22] trafikte iki tekerlekli araç kullananların kask takma önemine vurgu yapmak için trafik video görüntülerinden kask tespitini SSD ve MobileNet kullanarak gerçekleştirmiştir. Madhuchanda vd. [23] YOLO V3 modeli ile trafikteki motorluların kask tespitini yaptığı çalışmada %96,23 doğruluk yakalamıştır. Wei vd. [24] trafik video kayıtlarından YOLO V5 ile kask tespitinde F1 skoru %92,7 bulmuştur. Shilei vd. [25] görüntüdeki inşaat kaskı tespiti için YOLO V5 modelinde NMS yerine DloU-NMS kullanarak daha küçük nesnelerin tespitini, orijinal YOLO V5'e göre daha iyi yapmıştır. Rui vd. [26] inşaat alanındaki kask tespitinde, görüntülere bulanık Gaussian ön işlemi uygulayarak YOLO V3 modelinden daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Lin vd. [27] ResNet50 omurga ağı RetinaNet kullanarak trafikteki motorlarda kask takmayan fazla yolcuları tespit etmiştir.

ESA tabanlı derin öğrenme modellerini farklı veri setleri üzerinde uygulayan çalışmalara baktığımızda ise Zicong vd. [28] YOLO V4'te CSPBlock yerine ResNet ağı modülleri kullanarak ağı hesaplama maliyetini düşürmüştür. Ayrıca yazarlar YOLO V4'ün gerçek zamanlı bir versiyonunu geliştirerek orijinal YOLO V4'e yakın bir skora ulaşmıştır. Chethan vd. [29] trafikteki araba, kamyon, insan ve iki tekerli tespiti için görüntüler üzerine YOLO V3, videolar üzerine ise YOLO V4 uyguladığı çalışmada sırasıyla %98 ve %99 doğruluğa ulaşmıştır. Yanfen vd. [30] YOLO V4 kullanarak trafik ortamında bulunan 10 farklı tipteki nesnenin tespitini gerçekleştirmiştir. Liu vd. [31] deniz

yüzeyindeki nesnelerin tespiti için insansız yüzey araçlarının topladıkları görüntü veri setini kullanan çalışmada YOLO V4 işe koşulmuştur. Roy vd. [32] verimli tarım yapmak için bitki hastalıklarını zamanında teşhis etmenin öneminden yola çıkarak YOLO V4'ün omurga ağında DenseNet, aktivasyon fonksiyonunda Hard-Swish kullanarak domates bitkilerindeki 4 farklı hastalığı %93.64 F1 skoru ile tespit etmişlerdir. Yu ve Zhang [33] koronadan korunmaya yönelik maske takmanın önemini vurgulamak için insanların maske takma kontrolünü, YOLO V4 kullanarak %98.3 mAP skoru ile sağlamışlardır. Li vd. [34] KITTI yaya veri setini kullanarak kızılötesi görüntülerden nesne tespiti için YOLO V5'in CSP modülünü genişleten çalışmada YOLO V4'e göre %21 mAP artışı gözlenmiştir. Wu vd. [35] YOLO V4 ile doğadaki elma çiçeklerini tespit etmiştir. Yu ve Choi [36] otonom araç sürüşündeki risk ataması için nesne başına tek derinlik tespiti için KITTI yaya veri seti üzerinde YOLO V4 çalışmıştır.

Taranan çalışmalarda kullanılan CNN tabanlı derin öğrenme modelleri farklı veri setlerinde de benzer başarıyı yakalaması açısından genelleme yetenekleri yüksektir yorumu yapılabilir. Kasketin; takılı veya değil sınıflandırmasının farklı ve güncel CNN tabanlı derin öğrenme modelleri aracılığıyla karşılaştırmalı çalıştırılması ihtiyacının yanında transfer öğrenme tekniği araştırma alanının hâlâ gelişmekte olduğu görülmüştür. İncelenen çalışmalarda kullanılan; donanımın uzak mesafeden çalışmaması, makine öğrenmesinin el ile özellik çıkarımının başarısının düşük olması gibi sebeplerden ötürü çalışmada derin öğrenme yöntemleri tercih edilmiştir.

Bu çalışmada inşaat sahasındaki işçilerin kask tespitini otomatik gerçekleştiren CNN tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılmıştır. Ağların eğitiminde kullanılan görüntüler, niş alana ait olduğundan 5.000 adetle sınırlıdır. Dolayısıyla çalışmada, küçük veri seti probleminin üstesinden gelen transfer öğrenme tekniği uygulanmıştır. Ayrıca transfer öğrenme tekniğinin; farklı ESA'lardaki ve en baştan eğitim ile arasındaki etkililiği (eğitim süresi ve doğruluk bakımından) karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın; 2. Kısımında ESA'nın genel özellikleri, kullanılan veri seti ve kullanılan ön işlem, derin öğrenme modelleri ve ayarları, transfer öğrenme uygulaması, nesne tespiti bağlamında karşılaştırma metrikleri sunulmuştur. 3. kısımda deneysel çalışmalar ve 4. kısımda genel bir değerlendirme yapılarak gelecekte planlanan çalışmalara değinilmiştir.

2 Materyal ve metot

Derin öğrenme konseptini önerenler [37]; büyük miktardaki yazı, ses, görüntü veya video verisinde yer alan nesnelerin (eşsiz; kelime, kayıt veya şekil) güçlü özelliklerini çıkarmak ve dolayısıyla daha başarılı sınıflandırma işlemi gerçekleştirmek için derin sinir ağları kullanmışlardır.

Probleme göre özelleşen derin öğrenme ağlarından ESA, özellikle görüntü ve ses sınıflandırmadaki başarısıyla bilinmektedir. Derin öğrenme ağları, sıralı katmanlardan oluşmaktadır. Verinin her katman geçişinde daha derin özellikleri çıkarılmaktadır. İlk çok katmanlı ESA olan LeNet-5 ağı, 7 katmandan oluşmaktadır [38]. Rakamların

sınıflandırılmasında kullanılan bu ağı, birkaç banka el yazısı rakamlarının otomatik tanınmasında uygulamıştır. ESA'ların; GPU gelişimine bağlı olarak derinleşmesi ile görüntü sınıflandırma problemlerindeki başarıları da artmaktadır.

ESA; temelde evrişim, havuzlama ve tam bağlı katmanlardan oluşmaktadır. Evrişim ve havuzlama katmanları nesne özelliklerini çıkarabildiği için ağın en önemli kısımlarıdır ve sıkça art arda kullanılmaktadır. Evrişim katmanı sahip olduğu klasik görüntü işleme algoritma filtreleri sayesinde görüntüden çeşitli nesne özelliklerini çıkarabilmektedir. Ağın ilk evrişim katmanlarında, görüntüden tespiti yapılması istenen nesnelerin kenarı, kıvrımı, rengi gibi genel özellikleri çıkarılırken daha ileriki katmanlarda bu nesnelerin daha ince, detaylı ve karmaşık özellikleri çıkarılmaktadır. Evrişim katmanının filtre sayısı ve filtre boyutu olmak üzere iki ana parametresi vardır. Bunlardan filtre sayısı, yukarıda değinilen klasik görüntü işleme algoritma filtre çeşitlerinden, evrişim katmanının kaçını kullanacağını belirtir. Filtre sayısı çok tutulursa ağın hesaplama yükü de bir o kadar artar fakat görüntüden detay nesne özellikleri çıkarılacaksa sayıyı artırmak, başarıyı da artıracaktır. Diğer parametre olan filtre boyutu ise kullanılan iki boyutlu filtrenin en ve boy oranıdır. Filtre; görüntü üzerinde kaydırıldığından görüntünün her noktasına bakarak matris değerlerinin görüntüdeki nesnelerin matris değerleriyle eşleşip eşleşmediğine bakılır. Bu yüzden küçük boyutlu filtreler, görüntüde; az piksel harcayan küçük nesneleri daha yüksek başarıyla tespit ederken büyük boyutlu filtre seçimi, görüntüde tespiti yapılacak fazla piksel harcayan büyük nesnelere varsa yapılır. Evrişim katmanından havuzlama katmanına geçen özelliklerin (matris) sadece güçlü (yüksek) değerleri ağda tutularak özelliğin içeriği, önceden belirlenen adım sayısına göre azaltılır, dolayısıyla da ağın; hesaplama maliyeti düşürülür ve aşırı öğrenmesi kontrol altında tutulur. Ardından, iki boyutta olan bu özelliklerin tam bağlı katmanlardan geçebilmesi için tek boyuta çevrimi yani matris tipinden vektör tipine dönüşümü gerçekleştirilerek tespiti yapılacak nesnelerin sınıflandırma çıktı skorları elde edilir.

Tipik bir ESA ileri ve geri yönlü geçiş aşamalarına sahiptir. Yukarıda bahsedilen ileri yönlü geçiş, çıktı ve hesaplama kaybı (gerçek ve tahmin edilen çıktı arasındaki fark) tahminini içerirken sadece eğitim esnasında uygulanan geri yönlü geçiş, hesaplanan hata bazında öğrenilebilir filtreleri ve ağırlıkları (girdi özellikleriyle birleşen) geri yayılım algoritması ile düzeltmeyi içerir. Ayrıca ESA'lar paylaşılan ağırlık, alıcı alanı ve yerel bağlantı konseptlerine bağlıdır. Ağda eğitilmesi gereken ağırlıkların sayısını düşüren ağırlık paylaşma tekniği, LeCunn tarafından 1998'de önerilmiştir [39]. Bu teknik, ağdaki düğümlerin (nöron, birim) ürettiği ağırlıkların yakın başka düğümlerde de kullanılmasıdır. Yani görüntünün herhangi bir bölgesinde tespiti yapılan motifin (nesnenin), başka bir bölgede de yer alabileceği göz önünde bulundurularak öğrenilen bilgi (ağırlık), ağ arasında paylaşılmaktadır. Böylece ağın hem eğitim süresi hem de hesaplama maliyeti düşmektedir. Üst paragrafta verilen ESA mimarisinin temel katmanlarının

farklı sırada ve sayıda kullanılmasıyla veya atlama gibi yeni katmanların da ağa dâhil edilmesiyle işin özü birçok ESA modeli çıkmıştır. Beyindeki görüş açısına benzetilen alıcı alanı tekniğini; küçük (dar) tutan ESA modelleri, görüntüdeki; küçük nesnelere tespit daha başarıyla büyük (geniş) tutan modeller büyük nesnelere tespit daha başarılıdır. Alıcı alanındaki bu mantık, evrişim katmanında kullanılan filtrenin boyut seçimiyle benzerdir. ESA'nın kullandığı son teknik ise, herhangi bir katmanındaki tüm nöronların (birimlerin-düğümünlerin) bu katmandan bir önceki katmandaki tüm nöronlara tam bağlanmayarak hesaplama maliyetini düşürmesidir. ESA'nın, klasik sinir ağlarından en büyük farkı da tam olarak budur. Bir klasik sinir ağından geçen 3 kanallı (RGB) ve 256 piksel en, boy uzunluğuna sahip bir görüntü için bu ağdaki tüm katmanlarda bias (hata değeri) olmadan 196.608 (256x256x3) adet ağırlık miktarı (hesaplama yükü) hesaplanacaktır.

ESA'nın gelişimini; takip etmek ve artırmak için Stanford Vision Lab tarafından her yıl ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) organize edilmektedir [40]. Bu çalışmada 1.000 kategorili, 1.2 milyon görüntülü ImageNet veri setinde eğitilmiş ağırlıklı 3 farklı ESA tabanlı derin öğrenme modeline transfer edilerek modellerin, rasgele ağırlıklar ile eğitime başlaması yerine gündelik hayatta karşılaştığımız birçok nesnenin şekil, kenar, leke, doku gibi özelliklerini öğrenmiş ağırlıklı ile eğitime başlaması sağlanmıştır. Probleme özgü tespiti istenen nesne sayısı iki olduğundan (kafa-kask), son tam bağlı katmanın 1.000 (sınıf sayısı) çıktı vermesi yerine iki çıktı vermesi sağlanarak, ağ eğitilmiştir. Ayrıca, aynı 3 ESA tabanlı derin öğrenme modelinin rasgele ağırlıklar ile eğitime başlaması da çalışmada uygulanarak transfer öğrenmenin etkinliği incelenmiştir.

2.1 Veri seti ve ön işleme

Eldeki veriyi eğitim, validasyon ve test için önceki makine öğrenmesi çalışmalarında ve deeplearning.ai'den Andrew Ng'nin derslerinde [41] 6: 2: 2 oranında bölündüğü ve tavsiye edildiği görülmektedir. Buna karşın çalışmada kullanılan toplam görüntü verisi, 70: 15: 15 oranında bölünerek ağırlık eğitime biraz daha fazla ağırlık verilmiştir. Kaggle'dan edinilen 5.000 görüntünün 3.500'ü eğitime, 750'si validasyona geri kalan 750'si ise teste ayrılmıştır [42]. Eğitim veri seti; modeli eğitmede dolayısıyla ağırlıkların oluşmasında, validasyon veri seti; modelin parametrelerini ayarlama ve modelin kapasitesini değerlendirmede, test veri seti ise modelin genelleme yeteneğini ve tespit başarısını hesaplamada kullanılmıştır [43].

Çalışma, gözetimli makine öğrenmesi (olması gereken değerlerin makineye tanıtılması) başlığına girdiği için eğitilecek görüntüler etiketlenmiştir. Bu işlem için açık kaynak kodlu makesense.ai tercih edilmiştir [44]. Kullanımı herkese açık olan bu program GPLv3 lisanslıdır. Etiketleme ile görüntülerdeki nesnelere konumları ve sınıfları (kategorileri) bilgisayarın anlayabileceği formatta sunulmuştur. Çalışmada kullanılan YOLO modelleri için oluşturulan etiketlerin (COCO veri seti formatı) içeriği sırasıyla; nesne sınıfının eşsiz rakam karşılığı, nesnenin etrafına, görüntüdeki yerini belirtmek için çizilen sınırlayıcı

kutunun; merkez x, y noktası ile genişlik, yüksekliği iken Faster R-CNN (PASCAL VOC veri seti formatı) modeli için sırasıyla nesne sınıfı, sınırlayıcı kutunun; sol alt köşesinin yataydaki konumu olan x min, sağ üst köşesinin yataydaki konumu olan x max, sol alt köşesinin dikeydeki konumu olan y min, sağ üst köşesinin dikeydeki konumu olan y max'tır. Oluşturulan etiketlerin dosya formatları, bilgisayarda fazla yer kaplamayan txt ve xml'dir.

2.2 YOLO

Nesne tespiti mimarilerinin ortak noktası, girdi görüntüsünü sırayla omurga, boyun ve kafa bölümlerinden geçirmesidir. Boyun; omurganın çıkarmış olduğu görüntü özelliklerini, karıştırıp birleştirdikten sonra tespit için kafaya hazırlayan özellik toplayıcı olarak çalışmaktadır. Kafa bölümü ise her sınırlayıcı kutunun tespitinden ve sınıflandırılmasından sorumludur. Nesne tespitindeki tek, çift aşamalı mimari farkı, bu noktada ortaya çıkmaktadır; iki aşamalı mimari, sınırlayıcı kutu; tespiti ve sınıflandırması görevlerini ayrı ayrı çalıştırıp (Seyrek Tespit) sonuçlarını daha sonra birleştirirken, tek aşamalı mimari, bu işlemleri tek seferde (Yoğun Tespit) yapmaktadır. Bir nesne tespiti mimarisi olan YOLO, görüntü; sınıflandırma ve konumu belirlemek için ESA ağında yalnızca bir ileri geçiş gerektirdiği için tek aşamalıdır ve bu yüzden yalnızca bir kere bakarsın mânâsına gelmektedir.

YOLO eğitiminde kullanılan girdi görüntüleri öncelikle Şekil 1'deki gibi karesel ızgaralara bölünmektedir.



Şekil 1. YOLO ızgara

Görüntü örneğin daha iyi anlaşılması için 9 ızgaraya bölünmüştür, gerçekte ağırlık girişte kabul ettiği çözünürlük değerince, daha fazla sayıda ızgaraya bölünmektedir. Daha sonra etiketleme yolu ile YOLO'ya tanıttığımız tespiti yapılması istenen nesnelere merkez noktaları içinde kaldığı ızgara tarafından tespit edilmeye çalışılmaktadır. ızgara tespit işlemini, 4 parametrelili sınırlayıcı kutuyu ve bu kutunun güven skorunu tahmin ederek gerçekleştirmektedir. Sınırlayıcı kutunun parametrelerinden x, y; kutunun merkezi w, h; kutunun genişlik ve yüksekliğidir. Kutunun güven skoru Denklem (1)'de verilen ızgaranın içinde nesne olma olasılığı $p(Nesne)$ ve olması gereken ile tahmin edilen kutu

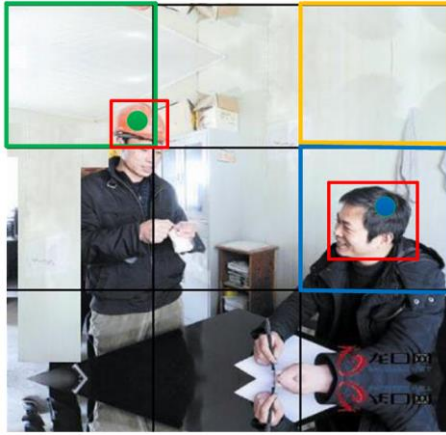
arasındaki fark IOU_{pred}^{truth} 'un çarpımıyla hesaplanmaktadır. $p(Nesne)$ 0 ile 1 arasında değer almaktadır; ızgara içinde nesne var ise $p(Nesne)$ 1 değerini alarak güven skoru hesabını IOU_{pred}^{truth} 'e bırakmaktadır. ızgara içinde nesne yok ise güven skoru 0 olmaktadır.

$$güvenskoru = p(Nesne) * IOU_{pred}^{truth} \quad (1)$$

Güven skoru ile sınırlayıcı kutunun parametre sayısı esasen 5 olmaktadır. Her ızgaranın oluşturduğu tahmin edilen görüntü konumunu belirten kutu vektörü \hat{y} ile gösterilirken gerçekteki (olması gereken) görüntü konumunu belirten kutu vektörü, **Denklem (2)**'de verilen y 'dir.

$$y = [p_c b_x b_y b_h b_w c_0 c_1] = p(Nesne) * IOU_{pred}^{truth} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki p_c güven skorunu, $b_x b_y b_h b_w$ sınırlayıcı kutunun yataydaki, dikeydeki merkez konumunu ve genişlik, yüksekliğini, $c_0 c_1$ sınıf tahminlerini ifade etmektedir. **Şekil 2**'de girdi görüntüsü üzerinde tahminlerin gerçekleştiği bir örnek sunulmuştur. Şekildeki sarı ızgara, tespiti yapılması istenen herhangi bir nesneyi içermediğinden oluşturmak istediği sınırlayıcı kutunun güven skoru 0 çıkmaktadır, dolayısıyla bu ızgara sınırlayıcı kutu üretmemektedir. Yeşil ızgarada tespiti yapılması istenen kask nesnesi ve mavi ızgarada tespiti yapılması istenen kafa nesnesi olduğundan bu ızgaralar için üretilen çıktı vektörleri sırasıyla $\hat{y} = [1 b_x b_y b_h b_w 1 0]$, $\hat{y} = [1 b_y b_h b_w 0 1]$ olmaktadır.



Şekil 2. YOLO çalışma mantığı

YOLO algoritması son olarak NMS (Non-Maximum Suppression) tekniği ile nesne içermeyen veya diğer sınırlayıcı kutularla aynı nesneyi içeren sınırlayıcı kutuları, IoU (Intersection over Union) eşik değeri yardımıyla elemektedir. Bu sayede hesaplama maliyeti düşerken gözünü yormayan bir sonuç elde edilmektedir.

2.2.1 YOLO V4 ve V5

YOLO algoritmaları önceki bölümde de değinildiği üzere, tek aşamalı CNN tabanlı derin öğrenme modellerindedir. Hızlı tespit yetenekleri, tek aşamalı olmalarından kaynaklanmaktadır. YOLO V4 algoritmasının

omurga ağı CSPDarknet53, boynu SPP ve PAN, kafa bölümü YOLO V3'ten oluşmaktadır. Algoritmanın yapısındaki elemanlar için kullandığı metotlar çok çeşitlidir. Omurgası için kullandığı Ücretsizler Torbasının (Bag of Freebies) temel amacı çıkarım maliyetini artırmadan, nesne mimarisinin daha doğru sonuçları alması adına daha iyi eğitim metotları geliştirmektir. Diğer bir ifadeyle sadece eğitim stratejisini değiştiren veya sadece eğitim maliyetini artıran metotlara denmektedir. Nesne tespiti tarafından kabul edilen bu tanımla birleştiği kısım veri artırmadır. Veri artırmanın amacı girdi görüntülerini çeşitlendirerek tasarlanan nesne mimari modelinin, farklı çevrelerden gelen görüntülere karşı daha güçlü olmasını sağlamaktır. İki sık kullanılan veri artırma metodu görüntüsel ve geometrik bozmalar, nesne tespiti görevine bu yönden fayda sağlamaktadır. Görüntüsel bozmalarla uğraşırken görüntünün parlaklığı, kontrastı, rengi, doygunluğu ve gürlüğü değiştirilirken geometrik bozmalarda rasgele ölçekleme, kırpma, çevirme ve döndürme yapılmaktadır.

Mimarisi için çıkarım maliyetini küçük miktarda artırırken tespit görevinin doğruluğunu önemli ölçüde artıran, eklemeli modüllere ve rötuş metotlarına ise Özeller Torbası (Bag of Specials) denmektedir. Eklemeli modüller; alıcı alanını genişletmeye, motivasyon mekanizmasını tanıtmaya veya özellik entegrasyonu kabiliyetini güçlendirmeye yararken rötuş metotları, model tespit sonuçlarını görüntüleme içindir. Alıcı alanı artırma işlemi önceden bahsedildiği gibi, görüntüdeki büyük nesnelerin tespitini kolaylarken motivasyon mekanizması, girdi ile katmanlardan geçen özellikler arasında bağlantılar oluşturmaktadır.

YOLO V5'te omurga ağı olarak, derin ağlarla işlem süresinde önemli bir gelişme sağlayan CSPNet (Cross Stage Partial Network) ve 3 adet YOLO V4 katmanı yerine geçen Odak modülü kullanılmaktadır (Jocher, 2020). Odak modülü, eğitim için gerekli CUDA (C ile yazılmış algoritmaların GPU üzerinde çalışmasını sağlayan geliştirme araçları kümesidir) hafızasını azaltırken ileri ve geri yönlü yayılmayı artırmaktadır [45]. Mimarideki boyun ise genelde modellerin nesne ölçeklemesindeki genelleştirme yardım eden, özellik piramitlerinin üretimini sağlamaktadır. PANet kullanılarak geliştirilen özellik piramitleri bu bölümde mevcuttur. Boyunda ayrıca ağı sabit boyut kısıtlamasını ortadan kaldıran havuzlama katmanı, SPP (Spatial Pyramid Pooling) bulunmaktadır. SPP katmanı, görüntü özelliklerini havuzlayarak tam bağlı katmanlara veya diğer sınıflandırıcılara girdi olarak verilecek çıktıları üretmektedir. Modelin kafa bölümü, YOLO V3 ve V4 ile aynıdır. Tespit aşamasında kullanılan kafa, özelliklere ançor kutuları uygulayarak nihai çıktı vektörlerini (sınıf olasılıkları, nesnesizlik skorları, sınırlayıcı kutuları; içeren) üretmektedir.

YOLO V5'in YOLO V4'ten bir farkı, IoU-yitim yerine genelleştirilebilir yitim (GIoU-yitim) algoritmasını işe koşması, diğer bir farkı ise oto öğrenme sınırlayıcı kutuları kullanarak genel doğruluğu artırmasıdır [46]. Her iki algoritmanın; omurgasında da CSPDarknet53 ağı kullanıldığından görüntüden derin özellikleri çıkarma yetenekleri benzerdir, kullandıkları yöntemler (BoF, BoS,

mozaik veri çoklama) de aynı olduğundan doğrulukları benzer oranda artış göstermektedir.

YOLO'nun önceki versiyonları C programlama diliyle yazılmışken YOLO V5, Python programlama diliyle yazılmıştır. Böylelikle YOLO V5'i IoT cihazlara yüklemek ve farklı cihazlarla entegre etmek kolaylaşmıştır. YOLO V5'in boyutu sadece 27 MB iken DarkNet kullanan YOLO V4'ün boyutu 244 MB'tır [47]. Öğrenme verimini artırmak için derinleşen ağların parametre sayıları da artmaktadır. YOLO V5'in farklı versiyonlarında, n'den x'e doğru parametre sayısı ve doğruluğu artarken tespit hızı düşmektedir. Mevcut çalışma gerçek-zamanlı olmadığı için en yüksek hızlı versiyonlar (n ve s gibi) yerine en yüksek doğruluk veren 444 katmanlı, 86.186.872 parametrelili versiyon (x versiyonu) kullanılmıştır.

2.3 Faster R-CNN

Bu algoritmanın oluşmasına katkı sağlayan önceki versiyonları R-CNN ve Fast R-CNN'dir. R-CNN görüntü üzerinde bir demet kutu (bölge) önerip kutuların nesneye denk gelip gelmediğine bakmaktadır. Bu kutuların üretiminde ise Seçici Arama algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma nesnelere tanımlamak için görüntüdeki komşu pikselleri; doku, renk veya yoğunluğa göre gruplandırmaktadır. Daha sonra bölgeleri, standart kare boyutuna ayarlayarak AlexNet'in değiştirilmiş bir versiyonuna girdi olarak vermektedir [48]. Ağın bitişine SVM ekleyerek nesne mi değil mi, nesne ise hangi sınıfa ait sınıflandırması yapmaktadır. Son olarak bölge önerilerine lineer regresyon işlemi uygulayarak daha dar sınırlayıcı kutu koordinatları elde etmektedir.

R-CNN aşağıdaki dezavantajlara sahiptir:

- Görüntünün tüm bölge önerileri için ESA'da birer ileri yönlü geçiş gerektirmesi (Her görüntü için yaklaşık 2.000 ileri geçiş).

- 3 farklı modeli birbirinden bağımsız eğitmesi (CNN ile görüntü özellikleri üretme, sınıflandırıcı ile sınıf tahmini, regresyon modeli ile sınırlayıcı kutuyu daraltma).

Gelişimin ikinci basamağındaki Fast R-CNN, RoIPool ile her bir görüntü için sadece bir CNN çalıştırıp bunu, 2.000 öneri ile paylaşmayı öngörerek hesaplama maliyetini düşürmüştür. Ağın uyguladığı ikinci iyileştirme ise ESA, sınıflandırıcı ve sınırlayıcı kutu düzenleyicisini tek modelde birleştirmesidir. Ek olarak SVM sınıflandırıcısını, çoklu sınıf problemlerinde sıkça uygulanan Softmax katmanı ile değiştirmiştir.

Fast R-CNN'deki tüm bu gelişmelere rağmen bölge önerici problemi çözülememiştir. R-CNN ve Fast R-CNN'de bir demet sınırlayıcı kutu ile olası nesne konumlarını tespit etmeye çalışma işini, GPU'dan faydalanamayan yavaş ve maliyetli Seçici Arama algoritması yapmaktadır. Bölge önerilerinin bağlı olduğu görüntü özellikleri, sınıflandırmanın ilk adımındaki ileri yönlü CNN geçişi ile üretilmektedir. Faster R-CNN'in ana fikri ise ayrı bir seçici arama algoritması çalıştırmak yerine sonuçları tekrar kullanarak bölge önermek olmuştur. Bu yüzden özelliklerin tepesine RPN, Türkçe adıyla bölge öneren ağ adlı tam evrişim ağı eklemiştir. Bu ağ, özellik haritası üzerinde kayan pencere gezdirerek potansiyel sınırlayıcı kutuyu ve

bu kutuların ne kadar iyi olması gerektiği skorunu vermektedir. İki katmandan oluşan RPN'nin *cls* katmanında nesne var/yok sınıflandırılması yapılmakta ve $2 \times k$ sayıda skor üretilmekte, *reg* katmanında ise sınırlayıcı kutu koordinatları tahmini için $4 \times k$ (sınırlayıcı kutu; merkez x , y , genişlik, yükseklik) sayıda vektör üretilmektedir. Bu aşamadan sonra Faster R-CNN'in kullandığı kritik eleman ROI Havuzlaması'dır. CNN'deki havuzlama mantığına sahip olan bu teknik ile RPN'den gelen bölge önerilerinin sadece en güçlü özellikleri seçilerek sınıflandırma için tam bağlı katmanlara gönderilir. Bu sayede gereksiz özellikler ağdan atılarak hesaplama maliyeti ciddi oranda düşürülür.

2.4 Model ayarları

Çalışmada orta boyutlu görüntüler kullanıldığından YOLO V4 ağının kabul ettiği görüntüler için çözünürlük değeri 416x416 seçilmiştir. YOLO V5 algoritması, omurga ağının genişlik ve derinliğinin ayarlanmasına yarayan *depth_multiple* ve *width_multiple* parametrelerine sahiptir. Derin sinir ağları daha fazla katmana (alıcı alanı artırmak için) ve kanala (daha çok ince-taneli desenleri yakalamak için), büyük boyutlu görüntüler için ihtiyaç duymaktadır. Görüntülerden tespiti istenen kask ve kafa nesnelere ne çok küçük ne de çok büyüktür, bu yüzden YOLO V5 modelinin bu iki parametresinin varsayılan değerleri değiştirilmemiştir. Aynı şekilde, Faster R-CNN'in ağ girişinde kabul ettiği görüntü çözünürlük değeri sabit tutulmuştur.

Ağın iç değişkenlerini ayarlama işlemi, eğitim sürecinin özüdür. Çalışmada optimum ağ mimarisi hiper parametrelerini belirlemek için kapsamlı izgara araması (tüm kombinasyonları deneyen kaba kuvvet yöntemi) kullanılmıştır. En kritik hiper parametre olan learning rate [49,50], yitim fonksiyonunu minimum yapmaya çalışan optimizasyon'un adım büyüklüğünü tanımlamaktadır [51,52]. Küçük verilirse eğitim uzun sürecek, büyük verilirse modelin yakınsaması atlanabileceğinden YOLO V4 için belirlenen learning rate değeri 0.0013, YOLO V5 ve Faster R-CNN için 0.001'dir. Kullanılan GPU/CPU'nun hafızasına bağlı olarak ayarlanan batch değeri YOLO V4 için 128, YOLO V5 için 16, CPU'da çalışan Faster R-CNN için 2 verilmiştir. Ayrıca sadece YOLO V4'te olan *subdivisions* değeri 128 verilerek batch/subdivision eşitliği ile her bir iterasyonda sadece 1 adet görüntünün YOLO V4 modeline kabul edileceği ifade edilmiştir. Ağırlıkların gelecekteki değişimine, geçmişin ne kadar etki edeceğini belirleyen momentum YOLO V4 için 0.949, YOLO V5 ve Faster R-CNN için 0.9 seçilmiştir. Tipik özellikler için zayıf ağırlık güncellemeleri yaparak veri setindeki dengesizliği elimine eden *weight decay*, 3 modelde de [53] çalışmasındaki gibi 0.0005'e ayarlanmıştır. Momentum ve ağırlık kaybının model performansına olumlu katkı yaptığı birçok çalışmada görülmüştür.

Sinir ağlarını eğitmede ikinci önemli nokta, kayıp fonksiyonu tanımlamak ve kullandığı geri yayılım algoritmasının optimizasyonu için doğru algoritmayı seçmektir. Global minimum arayışında optimizasyon algoritmaları genelde gradyan azalma stratejisini kullanır. YOLO V4 ve V5'te varsayılan SGD yerine Adam optimizator'ü [54] seçilerek gerçek çıktıyla tahmin edilen çıktı

arasındaki mesafeyi temsil eden, çoklu sınıflandırma problemlerinde sıkça kullanılan Cross Entropy Loss fonksiyonu minimum yapılmaya çalışılmıştır. Yitim fonksiyonu gradyanının hesaplanması için her örneğin hatası toplanmaktadır. SGD (Stochastic Gradient Descent) tüm eğitim hatalarını (yitimi) toplamak yerine her iterasyonda tek bir örneğin hata gradyanını kullanmaktadır [55]. Fakat standart SGD yavaştır ve çalıştığı ağı, lokal optimaya yakalandırabilmektedir. Bundan dolayı Faster R-CNN için optimizasyon algoritması olarak önceki ağırlıkları dikkate alan, SGDM (momentumlu SGD) tercih edilmiştir.

2.5 Transfer öğrenme

Derin öğrenme, geleneksel makine öğrenmesi metodlarına göre yüksek sayıda eğitim verisine ihtiyaç duymaktadır. Bu sebepten ötürü işin özü görüntü sınıflandırma derin ağları, genelde milyon sayıda görüntü içeren veri setleri üzerinde aralıksız birkaç hafta süren çoklu bilgisayar sunucularında eğitilmektedir [56]. Örneğin Google tarafından yakın zamanda geliştirilen dil sunum modeli BERT, aralıksız 4 gün boyunca 16 Bulut TPU (tensör işleme birimi)'sunda (yaklaşık 60 masaüstü bilgisayarda) eğitilmiştir. Ayrıca MIT çalışmasına göre 200 milyon veya daha üstü parametrelili bir derin sinir ağının Bulut TPU'daki eğitimi, 6 arabanın kullanım ömrü boyunca ürettiği CO₂'ye eşdeğerdir [57].

Her derin öğrenme ağını eğitirken ihtiyaç duyulan bolca veriyi bulamadığımız için bir makine öğrenmesi tekniği olarak transfer öğrenme geliştirilmiştir [58]. Bu teknik, uzun eğitim sürelerine, gereksiz kaynak harcamasına ve doğaya zararlı karbondioksit salınımına karşı kısıtlı veri durumlarında kullanılmaktadır. Geçmişte karşılaşılan probleme karşı üretilen çözümün bilgisi, daha sonra karşılaşılan farklı ama benzer problemlere de uygulanabilir. Örneğin daktilo yazmayı öğrenmiş birisi, ileride bilgisayar kullanmaya çalıştığında fazla zorlanmayacaktır.

Transfer öğrenme araştırmalarının ana motivasyonu; insanların önceden öğrendiği bilgiyi, yeni problemleri zekice daha hızlı ve iyi çözmesinde kullanmasıdır. Teknikte sıkça kullanılan iki kavram; kaynak ve hedeftir. Yüksek miktarlı veride çalışmış derin öğrenme modelini temsil eden kaynak, düşük miktarlı veride çalışacak modeli temsil eden ise hedeftir. Transfer öğrenme işlemi basitçe, kaynak çıktısı ağırlıklarının hedef girdisine transferidir [59-62]. Transfer işlemi; hedef verisi küçük, kaynak verisi çok büyükse anlam kazanmaktadır. Ek olarak uygun transferi yapabilmek için kaynak ve hedefteki girdinin tipi (yazı, ses, görüntü, video) ve boyutu (1, 2, 3) aynı olmalıdır [63]. Veri, hiper spektral görüntüler [64,65] veya SAR [66,67] gibi internet görüntülerinden tamamen farklı bir karaktere sahipse modele transfer öğrenme uygulamadan, en baştan eğitim düşünülebilir.

Günlük hayatta karşılaşılabileceğimiz envai çeşitte nesnenin görüntüsünden oluşan COCO [68], Pascal VOC [69] ve ImageNet [70] gibi büyük veri setlerinde eğitilmiş sinir ağları, transfer öğrenme yaklaşımı için ESA tabanlı derin öğrenme modellerinde kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan ön eğitilmiş ImageNet ağırlıkları ile ilklendirme, eğitim süresini kısaltırken modelin genelleme

performansında, rasgele ağırlıklar ile ilklendirmeye göre iyileşmeler gösterebilir. Bu veri setlerinde eğitilen ESA'lar; ilk katmanlardan nesnelere kenar, leke, renk gibi genel (ortak) özelliklerini öğrenirken ileriki katmanlardan probleme özgü, nesnelere detaylı özelliklerini öğrenmektedir. Metot kısmında bahsedildiği üzere ESA'ların son katmanı olan sınıflandırıcı (Softmax'li tam bağlı katman) ise öncesindeki katmanlardan gelen görüntü özelliklerinin hangi nesneye ait olduğunu belirleyerek ağı sonlandırmaktadır. Sınıflandırıcıdan önceki katmanlarda öğrenilen bilgi, transfer öğrenme tekniği ile yeni ağı eğitmede kullanılmaktadır. Dolayısıyla yeni ağdaki öğrenme hızı artacak, eğitim süresi düşecektir. Son olarak yeni ağdan çıkarılan sınıflandırıcı katmanı yerine probleme özgü sınıflandırıcı (çalışmada iki çıktılı) eklenerek tespit işlemi tamamlanacaktır.

Matematiksel formülizasyon ile tekniği açıklayacak olursak; [71] D çalışma alanı, özellik uzayı X ve marjinal uzayı $P(X)$ 'ten oluşmaktadır.

$$P(X), X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in X \quad (3)$$

Denklem (3)'teki x_i özellik vektörünü göstermektedir. İş T ; etiket uzayı Y ve özellik vektörü, etiket çiftlerinden öğrenen tahmin fonksiyonu veya $P(Y|x)$ 'ten oluşmaktadır. Yani n , çalışma alanındaki her özellik vektörü için karşılığındaki etiketi tahminlemektedir. Bu durum Denklem (5) ile gösterilmiştir.

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, y_i \in Y \quad (4)$$

$$n(x_i) = y_i \quad (5)$$

Hedef etiketli verisi, kaynak etiketli verisinden çok daha küçükken kaynak çalışma alanı D_S ve karşılığındaki kaynak işi T_S , hedef çalışma alanı D_T ve hedef işi T_T olsun. Transfer öğrenmenin amacı $D_S \neq D_T$ veya $T_S \neq T_T$ durumlarında D_S ve T_S 'den bilgi eldelerken D_T 'deki $P(Y_T|X_T)$ hedef durumsal olasılık dağılımını öğrenmedir.

Transfer öğrenme çalışmasında üç ana araştırma sorusu vardır, bunlar:

- 1 Ne transfer edilmeli?
- 2 Nasıl transfer edilmeli?
- 3 Ne zaman transfer edilmeli?'dir.

Üçüncü sorunun cevabı hedefin, kaynaktan küçük olduğu durumlardır. İlk iki soru olan ne ve nasıl transfer etmeliye cevap ise esasen şu 4 kategoriye ayrılmaktadır: (1) örnek tabanlı transfer öğrenme: kaynak görevdeki etiketli verinin hedef görevde kullanılması için yeniden ağırlık verilmesi, (2) özellik tabanlı transfer öğrenme: kaynak alanı, hedef alanı ve model hataları arasındaki farkları azaltma, (3) parametre tabanlı transfer öğrenme: derin öğrenmede popüler olan paylaşılan parametrelerin ve birincil bilginin görevler arası keşfedilmesi, (4) ilişkisel bilgi tabanlı transfer öğrenme: daha az keşfedilmiş olan kaynak görevden hedef göreve, ilişkiyi veri boyunca transfer etme. Çalışmada bilginin yayılımı, 3. kategori olan parametre paylaşımı ile sağlanacaktır.

Transfer öğrenmenin üç çeşidi vardır:

- 1 Kaynak ve hedef görevlerinin farklı olduğu endüktif
- 2 Kaynak ve hedef alanının farklı, görevlerin aynı olduğu transdüktif
- 3 Hedef öğrenmenin farklı ve verinin etiketli olmadığı gözetimsiz

Çalışmada kaynak ve hedef görevleri farklıdır, ayrıca her iki alanda da etiketli veri bulunmaktadır bu yüzden endüktif transfer öğrenme tekniği uygulanacaktır. Bu çalışmada transfer öğrenmenin tercih edilmesindeki iki ana sebep; (i) transfer öğrenmenin çok büyük veri setlerine ihtiyaç duymaması, (ii) sadece son katman ağırlıkları eğitildiği için düşük hesaplama gücü ve eğitim süresinin oluşmasıdır.

Çalışmadaki transfer öğrenme, aşağıdaki adımlar ile uygulanmaktadır:

- 1 Kaggle'dan kask veri setini edin.
- 2 Ön eğitilmiş ağı seç.
- 3 Son katmanı probleme uygun olarak değiştir.
- 4 Eğitim görüntülerindeki yeni sınıf sayısını belirt (çalışmada 2).
- 5 Ağa uygun olarak görüntüleri yeniden boyutlandır, eğitim ayarlarını tamamla (learning rate, batch size, epoch, weight decay, momentum, optimizer vs.) ve eğitimi gerçekleştir.
- 6 Eğitilen ağı test veri setinde değerlendir.

Transfer öğrenme işleminde ön eğitilmiş modelin seçilmesi ve problem boyutu, benzerliği adımlarına dikkat edilmelidir. Seçim işlemi ön eğitilmiş modelin hedef problemle ne kadar ilgili olduğuna bağlıdır. Hedef veri seti küçük (1.000 görüntüden daha az) ve kaynak veri setine benzer (inşaat alanı, şapkalar vs.) ise aşırı öğrenme şansı yüksektir. Bu yüzden çalışmada, hedef veri seti (inşaat alanında kasket) kaynak veri setinden (doğal resimler) farklıdır ve 1.000 sayısından fazla tutulmuştur.

2.6 Karşılaştırma metrikleri

Modellerin başarımlarını değerlendirmek ve literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmak için nesne tespiti bağlamında uygulanan makine öğrenmesi metriklerinden; TP (True Positive) görüntüden tespiti yapılması istenen nesneyi tespit etme, FP (False Positive) görüntüden tespiti yapılması istenmeyen nesneyi veya arka plan görüntüsünü tespit etme, FN (False Negative) görüntüden tespiti yapılması istenen nesneyi tespit edememektir. Bu 3 değer, test veri setindeki tüm görüntüler için hesaplanarak toplandıktan sonra sistemin başarı değerlerini veren aşağıdaki eşitlikler uygulanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (6)$$

Doğruluk değeri, modelin doğru tahmin ettiği nesnelere toplam nesne sayısına oranı ile hesaplanmaktadır. Bu değer dengesiz veri setlerinde tek başına yeterli değildir.

$$\text{Hassaslık} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

Denklem (7)'de verilen Hassaslık, doğru tespitlerin gerçekte kaçının doğru olduğunu göstermektedir. Ayrıca yanlış tespit oranını veren FP 'nin ağırlıklı olduğu değerdir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

Denklem (8)'deki Duyarlılık ise doğru tespit edilmesi gereken nesnelere ne kadarının doğru tespit edildiğini göstermektedir. Gözden kaçırılan tespitler olan FN bu eşitlikte ağırlıklıdır.

$$\text{F1 Skor} = 2 * \frac{\text{Hassaslık} * \text{Duyarlılık}}{\text{Hassaslık} + \text{Duyarlılık}} \quad (9)$$

Son olarak Denklem (9) ile hesaplanan F1 Skor, Hassaslık ve Duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve sadece FP veya FN 'nin oluşturduğu hatayı değil tüm modelin hata değerini görme açısından değerlidir. Literatürde doğruluk yerine F1 Skorun temel alınması da bu sebepten kaynaklanmaktadır.

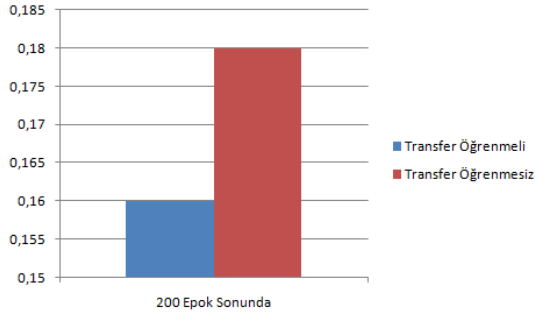
3 Bulgular ve tartışma

Veri sayısının fazla olduğu eğitim ve derin öğrenme modeli epok değerinin yüksek olması aşırı öğrenmeye neden olabilir [72]. Bu yüzden görüntü sayısı 5.000, epok sayısı her 3 model için de 200 olarak belirlenmiştir. Model eğitime başladığında, algoritma kayıp (yitim) değeri grafiğinin kademeli olarak azalması beklenir. Eğer azalma durursa model, öğrenmeyi kesmiş veya öğrenebileceği her şeyi zaten öğrenmiş demektir [73]. Bu durum gerçekleştiğinde eğitim, kullanıcı tarafından durdurulabilir.

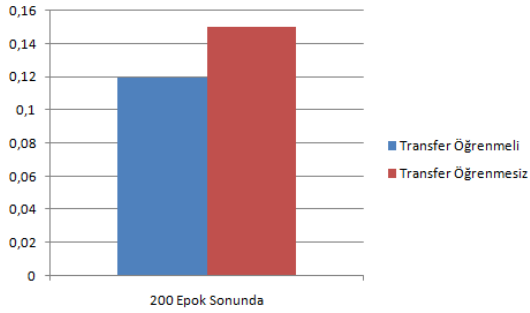
Epok sayısının 200 tutulmasının yeterli olduğu erken durdurma kriteri kullanılarak kanıtlanmıştır. Erken durdurma kriterinin kullanım amacı, model eğitimini kullanıcı yerine keserek eğitim boyunca oluşan en iyi ağırlığı bulmaya yöneliktir. YOLO V5 için denenen bu yöntemde 89. epoktan sonraki 111 epokun gereksiz olduğu ortaya çıkmıştır. Oluşan ağırlığın en iyi olduğunu söylemiştir yani bu epoktan sonraki eğitim, iyileşme yapmamıştır.

Deneylerin eşit şartlar altında gerçekleşmesi için YOLO V4, V5 ve Faster R-CNN transfer öğrenmeli/öğrenmesiz; 6 model eğitimi, Intel i7-8750H işlemci, 16 GB RAM özelliklerine sahip kişisel bilgisayarda PyTorch [74] çerçeve yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PyTorch sayesinde kişisel bilgisayarın işlemci thread'leri paralel çalıştırılabilmiştir.

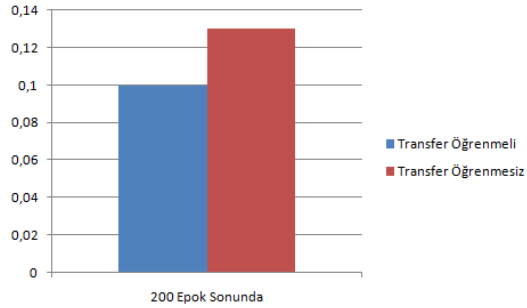
Şekil 3,4 ve 5'teki grafiklerde sırayla transfer öğrenme tekniğinin uygulanmadığı ve uygulandığı Faster R-CNN, YOLO V4 ve YOLO V5 modellerinin eğitim boyunca hesapladıkları yitim değerinin değişimini görmekteyiz. Her 3 grafikten anlaşılacağı üzere transfer öğrenmenin uygulanmadığı modellerin yitim değerleri her epok aralığında (10'luk), transfer öğrenmenin uygulandığı modellerin yitim değerlerine göre daha fazladır. Bu duruma bakarak transfer öğrenme tekniğinin, olması gereken (gerçek) ile tahmin edilen arasındaki farkın değeri olan yitimi düşürmede daha başarılı olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Faster R-CNN transfer öğrenmenin uygulanmadığı/transfer öğrenmeli 200 epokluk eğitim sonucundaki yitim değeri



Şekil 4. YOLO V4 transfer öğrenmenin uygulanmadığı/transfer öğrenmeli 200 epokluk eğitim sonucundaki yitim değeri



Şekil 5. YOLO V5 transfer öğrenmenin uygulanmadığı/transfer öğrenmeli 200 epokluk eğitim sonucundaki yitim değeri

Kayıp değeri, bizim problemimiz için kask tespit hatasını göstermektedir. Yani ne kadar büyük bir yitim değeri çıkarsa o kadar yanlış tespit yapılmış demektir. 200 epok sonucunda, 6 model arasında 0.1 ile en düşük (başarılı) yitim değerine ulaşan model, transfer öğrenmeli YOLO V5'tir. Transfer öğrenmeli YOLO V5 modeli %98 fl skor ile en yüksek başarıma ulaşmıştır.



Şekil 6. Transfer öğrenmeli YOLO V5 modelinden birkaç başarılı örnek

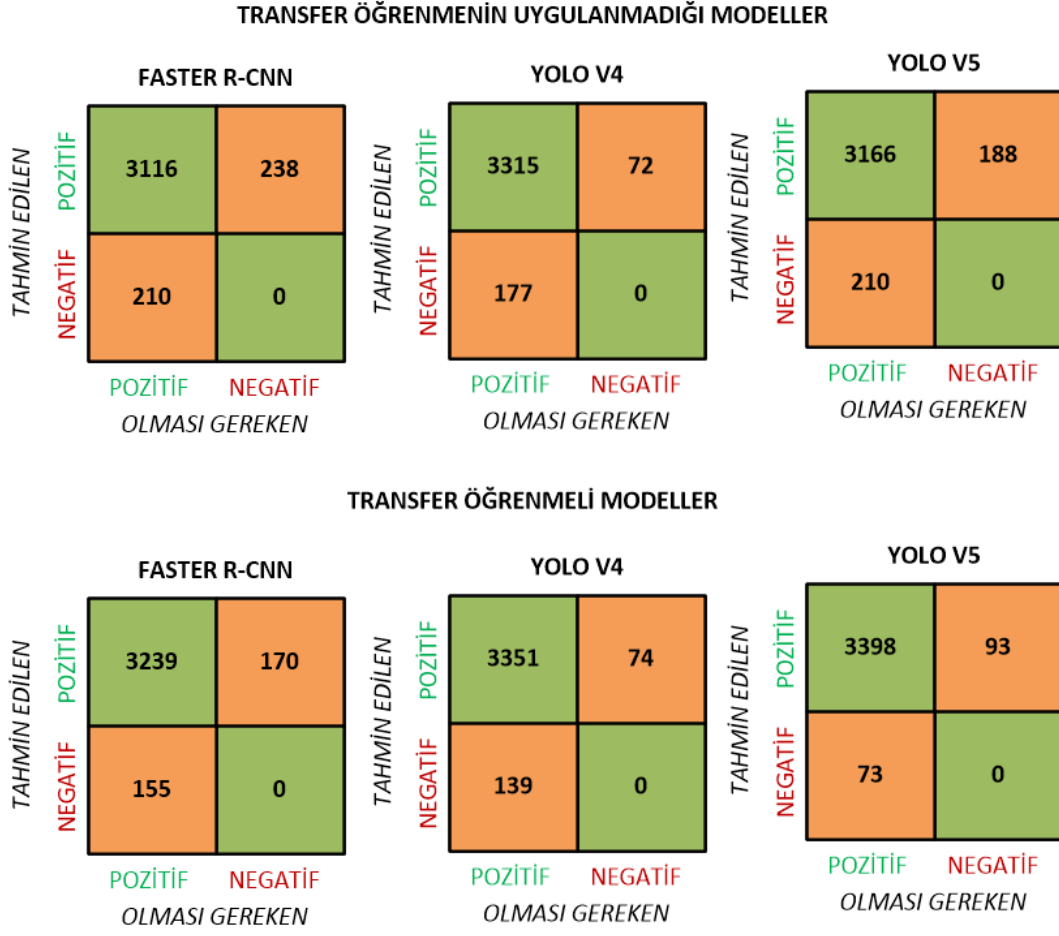
Tablo 1'den görüleceği üzere transfer öğrenmenin uygulandığı modeller, 3.500 adet eğitim ve validasyon görüntüsü üzerindeki 200 epokluk eğitimlerinde, süre açısından bir avantaj sağlamamış aynı zamanda kayda değer bir zaman kaybına sebep de açmamıştır. Tüm modellerin en baştan eğitimleri, transfer öğrenmenin uygulandığı modellere göre az da olsa daha kısa sürede tamamlanmıştır.

Transfer öğrenmenin uygulanmadığı modellerin doğru tespit oranları transfer öğrenme uygulananlara göre daha az çıkmıştır. Transfer öğrenme modellerin yüksek başarımlı çıkmasındaki sebep yanlış tespit oranlarının daha az olmasıdır.

6 modelin 750 test görüntüsündeki 3.564 adet nesneyi tespit başarımlı karşılaştırmasını sunan karışıklık matrisleri Şekil 7'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1. Modellerin eğitim süresi karşılaştırması

Eğitim modelleri (200 Epok)	Eğitim süreleri (saat)
Transfer öğrenmesiz faster R-CNN	64.53
Transfer öğrenmeli faster R-CNN	65.58
Transfer öğrenmesiz YOLO V4	15.13
Transfer öğrenmeli YOLO V4	15.30
Transfer öğrenmesiz YOLO V5	4.65
Transfer öğrenmeli YOLO V5	4.84



Şekil 7. Modellerin karışıklık matrisleri

Tablo 2. Modellerin doğruluk karşılaştırması

Model/Metrik	Doğruluk	Hassaslık	Duyarlılık	F1 Skor
Transfer öğrenmeli YOLO V4	0.94	0.98	0.96	0.97
Transfer öğrenmeli YOLO V5	0.95	0.97	0.98	0.98
Transfer öğrenmeli faster R-CNN	0.91	0.96	0.95	0.95
Transfer öğrenmesiz YOLO V4	0.93	0.98	0.95	0.96
Transfer öğrenmesiz YOLO V5	0.89	0.94	0.94	0.94
Transfer öğrenmesiz faster R-CNN	0.87	0.93	0.94	0.93

Transfer öğrenmenin uygulanmadığı modellerin doğru tespit oranları transfer öğrenme uygulananlara göre daha az çıkmıştır. Transfer öğrenme modellerin yüksek başarımlarını çıkarmadaki sebep yanlış tespit oranlarının daha az olmasıdır.

4 Sonuçlar

Görüntülerdeki kaskların tespiti güvenliği artırmakta bu sayede toplumsal fayda sağlanabilmektedir. Gün geçtikçe değişen dünyada inşaat alanları hep aynı kalmaktadır. Yapı işlerini hallenen işçilerin kafa yaralanmasına karşı önlem şeklinde alınan kask materyali bu açılardan değerlidir. Göz ile kaskın tespitinin yapılması zor olacağından otomatik tespit bu çalışmaya ile önerilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı: %5

Kaynaklar

- [1] X. Chang and X. M. Liu, Fault tree analysis of unreasonably wearing helmets for builders. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 35, 67–71, 2018.
- [2] L. Perezand and J. Wang, The effectiveness of data augmentation in image classification using deep learning. *arXiv*, 2017. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.1712.04621>.
- [3] V. Sorin, Y. Barash, E. Konen, E. Klang, Deep-learning natural language processing for oncological applications. *The Lancet Oncology*, 21(12), 1553-1556, 2020.
- [4] H. S. Bae, H. J. Lee and S. G. Lee, Voice recognition based on adaptive MFCC and deep learning. *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 1542-1546, Chengdu, China, 2006.
- [5] Z. Yuan, Y. Lu, Z. Wang and Y. Xue, Droid-sec: deep learning in android malware detection. *Proceedings of the 2014 ACM conference on SIGCOMM*, pp. 371-372, New York, United States, 2014.
- [6] Y. Sun, X. Wang, X. Tang, Hybrid deep learning for face verification. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 38, 1489–1496, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.188>.
- [7] R. Vinayakumar, K. P. Soman and P. Poornachandran, Applying convolutional neural network for network intrusion detection. *Proceedings of the 2017 International Conference on Advances in Computing*, pp. 1222-1228, Udipi, India, 2017.
- [8] K. Teja, L. Jens, S. Felix, H. Stefan, Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 173, 24-49, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.010>.
- [9] S. Moccia, L. Romeo, L. Migliorelli, E. Frontoni, P. Zingaretti, Supervised CNN strategies for optical image segmentation and classification in interventional medicine. *Deep Learners and Deep Learner Descriptors for Medical Applications*, 213-236, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42750-4_8
- [10] O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A. C. Berg, and L. Fei-Fei, ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 115(3), 211-252, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
- [11] T. Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár and C. L. Zitnick, Microsoft COCO: Common Objects in Context. *European Conference on Computer Vision*, pp. 740-755, Zurich, Switzerland, 2014.
- [12] M. Everingham, L. V. Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, A. Zisserman, The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 88(2), 303-338, 2010.
- [13] A. Kelm, L. Laußat, A. Meins-Becker, D. Platz, M. J. Khzaee, A. M. Costin, M. Helmus, J. Teizer, Mobile passive Radio Frequency Identification (RFID) portal for automated and rapid control of Personal Protective Equipment (PPE) on construction sites. *Automation in Construction*, 36, 38–52, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.009>.
- [14] S. Barro-Torres, T. M. Fernandez-Carames, H. J. Perez-Iglesias, C. J. Escudero, Real-time personal protective equipment monitoring system. *Computer Communications*, 36, pp. 42–50, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.009>.
- [15] A. H. M. Rubaiyat, T. T. Toma, M. Kalantari-Khandani, S. A. Rahman, L. Chen, Y. Ye and C. S. Pan, Automatic detection of helmet uses for construction safety. *Proceedings of the 2016 IEEE ACM International Conference on Web Intelligence Workshops*, Omaha, USA, 2016.
- [16] T. Malisiewicz, A. Gupta, and A. A. Efros, Ensemble of exemplar-svms for object detection and beyond. *2011 IEEE International Conference*, 89-96, 2011.
- [17] C. C. Liu, J. S. Liao, W. Y. Chen and J. H. Chen, The full motorcycle helmet detection scheme using canny detection, *18th IPPR Conf. On CVGIP*, 2005.
- [18] M. H. Wuand and J. Zhao, Automated visual helmet identification based on deep convolutional neural networks. *Proceedings of the 13th International Symposium on Process Systems Engineering*, San Diego, USA, 2018.
- [19] Z. Fangbo, Z. Huailin and N. Zhen, Safety helmet detection based on YOLOv5. *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications*, pp. 6-11, 2021.
- [20] W. Fan, J. Guoqing, G. Mingyu, H. E. Zhiwei and Y. Yuxiang, Helmet detection based on improved YOLO V3 deep model. *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 363-368, 2019.
- [21] L. Yange, W. Han, H. Zheng, H. Jianling, W. Weidong, Deep learning-based safety helmet detection in engineering management based on convolutional

- neural networks. Hindawi Advances in Civil Engineering, 2020.
- [22] T. Choudhury, A. Aggarwal and R. Tomar, A deep learning approach to helmet detection for road safety. NISCAIR-CSIR, India, 2020.
- [23] D. Madhuchhanda, B. Oishila and C. Sanjay, Automated helmet detection for multiple motorcycle riders using CNN. 2019 IEEE Conference on Information and Communication Technology, pp. 1-4, IEEE, 2019.
- [24] J. Wei, X. Shiquan, L. Zhen, Z. Yang, M. Hai, L. Shujie, Y. Ye, Real-time automatic helmet detection of motorcyclists in urban traffic using improved YOLOv5 detector. IET Image Processing, 15(14), 3623-3637, 2021. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12295>.
- [25] T. Shilei, L. Gonglin, J. Ziqiang and H. Li, Improved YOLOv5 network model and application in safety helmet detection. 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics, pp. 330-333, IEEE, 2021.
- [26] G. Rui, M. Yixuan and H. Wanhong, An improved helmet detection method for YOLOv3 on an unbalanced dataset. 2021 3rd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communication, pp. 328- 332, IEEE, 2021.
- [27] T. Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár and C. L. Zitnick, Microsoft COCO: Common Objects in Context. European Conference on Computer Vision, pp. 740-755, Zurich, Switzerland, 2014.
- [28] Z. Jiang, L. Zhao, S. Li and Y. Jia, Real-time object detection method for embedded devices. computer vision and pattern recognition, 2020.
- [29] C. Kumar and R. Punitha, YOLOv3 and yolov4: Multiple object detection for surveillance applications. 2020 Third international conference on smart systems and inventive technology, pp. 1316-1321, IEEE, 2020.
- [30] L. Yanfen, W. Hanxiang, L. M. Dang, T. N. Nguyen, D. Han, A. Lee, I. Jang, H. Moon, A deep learning-based hybrid framework for object detection and recognition in autonomous driving. IEEE Access 8, 194228-194239, 2020.
- [31] T. Liu, B. Pang, L. Zhang, W. Yang, X. Sun, Sea surface object detection algorithm based on YOLO v4 fused with reverse depth wise separable convolution (RDSC) for USV. Journal of Marine Science and Engineering, 9(7), 753. <https://doi.org/10.3390/jmse9070753>.
- [32] A. M. Roy, R. Boseand, J. Bhaduri, A fast accurate fine-grain object detection model based on YOLOv4 deep neural network. Neural Computing and Applications, 34(5), 3895-3921, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00298>.
- [33] J. Yu and W. Zhang, Face mask wearing detection algorithm based on improved YOLO-v4, sensors. Sensors, 21(9), 3263, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21093263>.
- [34] S. Li, Y. Li, Y. Li, M. Liand and X. Xu, YOLO-FIRI: Improved YOLOv5 for Infrared Image Object Detection. IEEE Access, 9, 141861-141875, 2021.
- [35] D. Wu, S. Lv, M. Jiang, H. Song, Using channel pruning-based YOLOv4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments. Computers and Electronics in Agriculture, 178, 105742. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105742>.
- [36] J. Yuand and H. Choi, YOLO MDE: Object detection with monocular depth estimation. Electronics, 11(1), 76, 2021. <https://doi.org/10.3390/electronics11010076>.
- [37] G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov, Reducing the dimensionality of data with neural networks. science, 313(5786), 504-507. doi: 10.1126/science.1127647.
- [38] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11)i 2278-2374, 1998.
- [39] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11)i 2278-2374, 1998.
- [40] O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A. C. Berg, and L. Fei-Fei, ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. International Journal of Computer Vision, 115(3), 211-252, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y>
- [41] CS230 Deep Learning, Class for learners. <https://cs230.stanford.edu/>, Accessed 03 November 2022.
- [42] Make ML, Hard Hat Dataset. <https://makeml.app/datasets/hard-hat-workers>, Accessed 15 April 2022.
- [43] J. Grum, Book review: pattern recognition and neural networks by B.D. Ripley. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 4(1), 146-147, 2009. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2009.028441>.
- [44] make-sense, a labelling tool. <https://github.com/SkalskiP/make-sense>, Accessed 13 March 2022.
- [45] glenn-jocher, YOLOv5 Focus Layer, Explanation of Focus Layer. <https://github.com/ultralytics/yolov5/discussions/3181m1>, Accessed 22 February 2022.
- [46] Mseddi, W. Souidine, M. A. Sedrine and R. Attia, YOLOv5 based visual localization for autonomous vehicles, Proceedings of the 2021 29th European Signal Processing Conference, Dublin, Ireland, 2021.
- [47] G. Yang, W. Feng, J. Jin, Q. Lei, X. Li, G. Guiand and W. Wang, Face mask recognition system with YOLO V5 based on image recognition. 2020 IEEE 6th International Conference on Computerand Communications, pp. 1398-1404, IEEE, 2020.
- [48] K. Greff, R. K. Srivastava, J. Koutnik, B. R. Steunebrink and J. Schmidhuber, LSTM: A search space odyssey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(10), 2222-2232, 2017.
- [49] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, Deep Learning. MIT Press, Cambridge, 2016.

- [50] C. M. Bishop and N. M. Nasrabadi, Pattern recognition and machine learning. Springer-Verlag, Vol 4. No 4., New York, 2007.
- [51] K. Murphy, Machine Learning: A Probabilistic Perspective. MIT Press, Cambridge, 2012.
- [52] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. E. Hinton, Imagenet classification with deep convolutional neural networks. Adv. Neural Inf. Process. Syst, 60(6), 84-90, 2017. <https://doi.org/10.1145/3065386>.
- [53] D. P. Kingma and J. Ba, Adam: A method for stochastic optimization. arXiv, 2014. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>.
- [54] P. D. Lima and K. Marfurt, Convolutional neural network for remote-sensing scene classification: transfer learning analysis. Remote Sensing, 12(1), 86, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs12010086>.
- [55] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia et al, Going deeper with convolutions. arXiv, 2014.
- [56] K. Haoarchive, Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes. <https://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031/training-a-single-ai-model-can-emit-as-much-carbon-as-five-cars-in-their-lifetimes/>, Accessed 8 March 2022.
- [57] L. Torrey and J. Shavlik, Transfer Learning Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques. IGI Publishing, Hershey, 2009.
- [58] Y. Gao, Y. Ruan, C. Fang and S. Yin, Deep learning and transfer learning models of energy consumption forecasting for a building with poor information data. Energy and Buildings, 223, 110156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110156>.
- [59] C. Tan, F. Sun, T. Kong, W. Zhang, C. Yang and C. Liu, A survey on deep transfer learning. International conference on artificial neural networks, pp. 270-279 Springer, Cham, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1808.01974>.
- [60] B. Koçer, Transfer öğrenmede yeni yaklaşımlar. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Türkiye, 2012.
- [61] Transfer learning & fine-tuning, explanation of layer-base fine-tune and transfer learn methods <https://keras.io/guides/transfer-learning/>, Accessed 27 December 2021.
- [62] F. İ. Eyiokur, Deep convolutional neural network based unconstrained ear recognition. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [63] M. J. Afridi, A. Ross, E. M. Shapiro, On automated source selection for transfer learning in convolutional neural networks. Pattern recognition, 73, 65-75, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.07.019>.
- [64] M. Tharani, N. Khurshid, M. Taj, Unsupervised Deep Features for Remote Sensing Image Matching via Discriminator Network. Remote Sensing Image Retrieval, 2018.
- [65] S. J. Pan and Q. Yang, A survey on transfer learning. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 22(10), 1345-1359, 2009.
- [66] M. Gong, H. Yang, P. Zhang, Feature learning and change feature classification based on deep learning for ternary change detection in SAR images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 129, 212-225, 2017.
- [67] L. Hughes, M. Schmitt, L. Mou, Y. Wang, X. Zhu, Identifying Corresponding Patches in SAR and Optical Images With a Pseudo-Siamese CNN. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 15(5), 784-788, 2018.
- [68] T. Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár and C. L. Zitnick, Microsoft COCO: Common Objects in Context. European Conference on Computer Vision, pp. 740-755, Zurich, Switzerland, 2014.
- [69] M. Everingham, L. V. Gool, C. K. I. Williams, J. Winn, A. Zisserman, The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. International Journal of Computer Vision, 88(2), 303-338, 2010
- [70] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L. Li, K. Li and L. Fei-Fei. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2009)
- [71] S. J. Pan and Q. Yang, A survey on transfer learning. IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 22(10), 1345-1359, 2009.
- [72] S. Wang, L. Niu and N. Li, Research on image recognition of insulators based on YOLO algorithm, 2018 international conference on power system technology (POWERCON), IEEE, 2018.
- [73] M. Kartal, O. Duman, Ship detection from optical satellite images with deep learning. In 2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2019.
- [74] A. Paszke, S. Gross, F. Massa, A. Lerer, J. Bradbury, G. Chanan, T. Killeen, Z. Lin, N. Gimshe, L. Antiga, A. Desmaison, A. Kopf, E. Yang, Z. DeVito, M. Raison, A. Tejani, S. Chilamkurthy, B. Steiner, L. Fang, J. Bai, S. Chintala, PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. Advances in Neural Information Processing Systems, 32, 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01703>.





Derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak gelişmekte olan ülkelerin finansal enstrümanlarının etkileşimi ile Bist 100 tahmini

Estimating Bist 100 with the interaction of financial instruments of developing countries using deep learning and machine learning methods

Serap Akbulut^{1,*} , Kemal Adem² 

¹ Aksaray Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, 68100, Aksaray, Türkiye

² Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 58100, Sivas, Türkiye

Öz

Döviz piyasaları, emtia piyasaları ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endekslerinin Bist100 üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Ülke ekonomileri hem kendi hem de diğer ülkelerin ekonomilerine güçlü bir şekilde bağlıdır ve bu sebeple piyasalar etkilenmektedirler. Ekonomik açıdan piyasayı takip etmek kararları doğru verebilmek için tahmin yöntemleri kullanılmaktadır. Veri kümesi Ocak 2017 – Ekim 2021 tarihleri arasındaki kapanış verilerinden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda objektifliğin sağlanması amacıyla k=5 ve 10 katlı çapraz geçerlilik modeli uygulanmıştır. Modellerin karşılaştırılmasında; Ortalama Mutlak Hata (MAE), Bağlı Mutlak Hata (RAE), Ortalama Karesel Hata Karekökü (RMSE) ve uzun kısa süreli bellek (LSTM) kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, LSTM modelinin makine öğrenmesi modellerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. LSTM modeli için test sonuçları incelendiğinde MAE değeri 10.27, RMSE değeri 14.15 ve RAE değeri ise 6.06'dır.

Anahtar kelimeler: Yapay zeka, Derin öğrenme, Veri madenciliği, Finansal tahmin

1 Giriş

Borsa kavramı genel olarak, alıcı ve satıcının ya da vekillerinin bir araya geldiği pazarlardır. Bu pazarlar da satıcılar/alıcılar, menkul kıymetler ile bu türden kıymet olarak kabul edilen değerler üzerinde alım satım işlemi gerçekleştirmek amacıyla bir araya gelirler. Alım satım işlemi yapılan pazarlar, belirli sürelerde ve yerlerde kurulan aynı zamanda belirli kurullarla organize edilen merkezi pazarları ifade etmektedir[1]. Borsa kavramı etimolojik açıdan Belçika'nın Bruges kentinde veya Anvers kentinde 1531 yılında ilk sürekli fuarı olan "Van Der Buers" ailesinin isminden türemiştir[2]. Öncelikle 16. yüzyılda Paris ve Londra'da, 17. yüzyılda Berlin'de, 18. yüzyılda Viyana ve New York'ta 19. yüzyılda ise Brüksel, Roma, Milano, Madrid, Tokyo ve İstanbul borsaları ortaya çıkmıştır. Finansal piyasalar, fon fazlası olan ve fon açığı olan ekonomik birimlerin karşı karşıya geldiği piyasalardır. Ülke ekonomileri hem kendi hem de diğer ülkelerin finans piyasalarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu yüzden

Abstract

The effect of foreign exchange markets, commodity markets and stock market indices of developing countries on Bist100 is very important. The economies of the countries are strongly dependent on the economies of both their own and other countries, and therefore the markets are affected. Forecasting methods are used to follow the market economically and to make correct decisions. The dataset consists of closing data between January 2017 and October 2021. In order to ensure objectivity in experimental studies, a k=5 and 10-fold cross-validation model was applied. In comparison of models; Mean Absolute Error (MAE), Relative Absolute Error (RAE), Root Mean Square Error (RMSE) and long short-term memory (LSTM) were used. As a result of experimental studies, it has been seen that the LSTM model gives better results than machine learning models. When the test results for the LSTM model are examined, the MAE value is 10.27, the RMSE value is 14.15, and the RAE value is 6.06.

Keywords: Artificial intelligence, Deep learning, Data mining, Financial estimate

piyasalarda ortaya çıkan durumdan etkilenmektedirler. Bunun yanı sıra artık finansal piyasalar sadece stratejik yatırımcılar için değil tasarruflarını değerlendirmek isteyen bireyler için de cazebeli bir yatırım aracı haline gelmiştir. Para ve sermaye piyasalarındaki yatırımcıların amacı, finansal piyasaların hareketlerini inceleyerek analiz etmek ve piyasanın gidişatına göre doğru tahminler yaparak kontrol ettikleri bütçeyi bu doğrultuda kullanmaktır. Bunun için borsalardaki hisse senetleri hareketlerinin dinamikleri doğru anlaşılmalıdır. Söz konusu dinamikler, önceki verilerin değerlendirilerek geliştirilmesini ve gelecek dönemlerde farklı modeller aracılığıyla hisse senetlerinin ne yönde hareket sergileyeceğinin öngörülmesini sağlamaktadır.

Teknoloji ve bilgisayar alanında, sistemin geliştirilebilmesi için farklı öğrenme yaklaşımlarının benimsenmesi, çoğunlukla geleneksel makine öğrenme yaklaşımının kullanılmasının yanı sıra son yıllarda teknoloji ve bilgisayar donanımı konusundaki hızlı gelişmeler ile güçlü bilgisayarlar yaygın şekilde kullanılmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: serapaakbulut@gmail.com (S. Akbulut)
Geliş / Recieved: 16.06.2022 Kabul / Accepted: 10.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1131191

Geliştirilen modern öğrenme yaklaşımı olan “Derin Öğrenme” ile gerçek dünyadaki uygulama alanlarına yeni yaklaşımlar getirilmiş farklı algoritmalar kullanılarak çoklu soyutlama yapısı ile verilerin temsillerinin öğrenilmesi kolaylaşmıştır[3]. Derin öğrenme, bilgiye ulaşma süresini kısaltmakta ve en doğru bilgiye ulaştırmakta bir araç olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte derin öğrenme yöntemi finans alanında yeni bakış açıları oluşturarak, gelecekte piyasa mekanizması üzerine öngörülerin daha sağlam temellere oturmasını sağlayacaktır. Derin öğrenme verilerin birden fazla özellik seviyesinin ve temsillerinin öğrenilmesine dayanmaktadır. Üst düzey nitelikler, alt düzey niteliklerden türetilerek hiyerarşik bir temsil ortaya çıkartır. Söz konusu temsil, soyutlamanın farklı düzeylerine denk gelen birden çok temsil seviyesini öğrenmektedir. Temel anlamda derin öğrenme, verinin temsilinden öğrenmeye dayanmaktadır.

Borsalar hakkında yapılan çalışmalar hisse senedi fiyat davranışlarının önemli olduğunu, ayrıca borsaların piyasada bulunan bilgilerinin de birer ifadesi olduğunu göstermiştir. Literatürde, Uğur (2009) çalışmasında teknik ve temel analiz değişkenlerinden olan finansal oranları, makroekonomik değişkenler ve hisse senedi geçmiş fiyat verileri ile sanayi, mali ve hizmet sektöründeki hisse senetleri fiyatlarını tahmin etmeye çalışmıştır. Tek yönlü ve iki yönlü sabit yönlü etkiler panel veri ve Arellano-Bond ile Arellano-Bover dinamik panel veri regresyon modelleri kullanılmıştır. Kullanılan modeller sonucunda sanayi sektörü hisse senedi fiyatlarını belirleyen değişkenler; piyasa değeri/defter değeri oranı, enflasyon oranı, faiz oranı, hisse başına kazanç, dönen varlık devir hızı olduğu tespit edilmiştir[4]. Kara ve arkadaşları (2011) çalışmasında BİST 100 endeksinin günlük fiyatlarının yönünü öngörmeye çalışmıştır. İki farklı model geliştirilerek yapay sinir ağları ve destek vektör makineleri (SVM) kullanılmıştır. Endeksin günlük fiyatlarının yönünü tahmin etmedeki performansları karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağlar modelinin ortalama performansı %75.74 destek vektör makinelerinin ise %72,52’lik doğruluk payı söz konusudur. Yapay sinir ağları modelinin önemli ölçüde daha iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Veri setinde belirli teknik indikatörler kullanılmıştır[5]. Akal çalışmasında (2013) BİST 100 endeksi ile Brezilya, Çin, Meksika, Endonezya, Hindistan, Güney Kore ve Rusya borsaları ile Kanada borsası arasındaki ilişkileri inceleyerek verileri analiz etmiştir. Bu çalışma neticesinde kısa dönem nedensellikleri açısından BİST 100 endeksi çoğunlukla Brezilya, Kanada, Meksika ve Çin borsalarının etkisinde kalırken Endonezya borsasının da BİST 100 endeksi altında olduğu ifade edilmiştir. Diğer taraftan BIST100 ile Güney Kore, Hindistan ve Rusya borsaları arasında ilişki bulunmamıştır. Bu borsaların birbirinden bağımsız olduğunu söylemek mümkündür[6]. Fischer ve Krauss (2017), çalışmalarında Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) ağlarını kullanarak son teknoloji tekniğini ile 1992-2015 tarihleri arasında S&P 500 hisselerinin verilerini kullanarak bir model oluşturmuşlardır. Oluşturdukları LSTM modelinin sonucunda anlamlı Random Forest, Deep Neural Net ve Lojistik Regresyon modellerine göre daha başarılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır[7]. Krauss ve arkadaşları (2017)

S&P 500 hisse senetlerinin gelecekteki fiyatlarını öngörebilmek için derin sinir ağlarının, gradyan artırılmış ağaçların, rastgele ormanların ve bu metodların topluluklarının performansını analiz etmişlerdir [8]. Nahil ve Lyhyaoui (2018), yatırımcıların parasını doğru zamanda değerlendirmesine ve kısa vadede daha fazla fayda sağlayabilmesine yardımcı olabilecek vektör makinesi (SVM) ile ilgili yeni bir borsa tahmini yöntemi önermiştir. Sermaye yatırımı endüstrisi açısından zaman serisi tahmininde önemli bir araçtır. Aynı zamanda sınıflandırma üzerine kurulan makine öğrenimi tekniği, finansal verileri daha doğru tahmin edebilmektedir[9]. Vuong, Dat, Mai, Uyen ve Bao (2021) çalışmalarında ilk olarak yüksek boyutlu zaman serisi verilerini ayırt ederek önemli olan özellikleri çıkarmak ve gereksiz özellikleri kaldırmak için aşırı gradyan artırma (XgBoost) uygulamışlardır. Fiyatlarını tahmin etmek için seçilen özellikleri derin öğrenme ağlarından uzun kısa süreli bellek ağına (LSTM) girdi olarak vermişlerdir. Veriler 01.01.2008-03.19.2018 arasında Forex EUR/USD paritesinin 5 dakikalık fiyat, hacim ve volatilitte içeren 200 civarında özellik verilerini kullanarak 60 dakikalık kapanış fiyatlarını tahmin etmişlerdir. Önerdikleri modeli ve ARIMA zaman serisi modelini karşılaştırmak için MAE, MSE ve RMSE ölçüm kriterlerine göre karşılaştırmışlar ve önerilen modelin ARIMA’dan daha iyi sonu verdiğini ortaya koymuşlardır[10]. Hu, Zhao ve Kushi (2021) çalışmalarında 2015-2021 tarihleri arasındaki derin öğrenme yöntemleri ile hisse senedi/forex fiyat hareketlerini tahmin eden 86 makaleyi incelemişlerdir. Yapılan incelemede CNN, LSTM, DNN, RNN, pekiştirmeli öğrenme ve diğer derin öğrenme yöntemleri HAN, NLP ve Wavenet gibi 58 teknik kullanılmıştır. Yapılan araştırma ile sonuçları her bir tekniğe göre karşılaştırmış ve analiz etmişlerdir. (RMSE, MAPE, MAE, MSE, doğruluk, Sharpe oranı ve geri dönüş oranı) ölçüt olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak Çoklu derin öğrenme metodlarının kombinasyonunun (melez) eksik olduğuna ve gelecek araştırmalarda hibrid ağları kullanmanın umut verici olduğuna kanaat etmişlerdir[11]. Gavcar ve Metin (2021) Hisse Senedi Değerlerinin Makine Öğrenimi (Derin Öğrenme) ile Tahmini, adlı çalışmalarında derin öğrenme modellerinden LSTM mimarisini kullanılarak Vestel şirketinin hisse senedi açılış fiyatlarının tahminine yönelik bir model geliştirmişlerdir. 2016 ile 2021 yılları arasındaki değerler kullanılarak belirli bir döneme ait hisse senedi değerleri 0,0050 hata ile tahmin edilmiştir[12]. Aker (2022) çalışmasında BİST100 endeksine ait verilerin tahmin edilmesi için LSTM ve Fbprophet yöntemlerini kullanılmıştır. Çalışma sonucunda LSTM modelinin her üç parametrede de düşük hata oranı ile Fbprophet modelinden daha başarılı olduğu tespit edilmiştir[13]. Dalkıran ve Ozan (2022) Derin öğrenme teknikleri kullanılarak BIST 30 ve Borsa İstanbul Bankacılık endeksi (BANKX) içerisinde işlem gören Türkiye İş Bankası A.Ş. ye ait ISCTR hissesine ilişkin gün sonu kapanış fiyatlarını günlük olarak tahmin etmeye çalışmışlardır[14].

Bu çalışmada, döviz piyasaları (Dolar, Euro, Pound), emtia piyasaları (Petrol, Altın, Gümüş, Doğal Gaz, Pamuk) ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endekslerini (Shanghai (Çin), Ipc (Meksika), Sensex (Hindistan), RTSI (Rusya),

Bovespa (Brezilya) ve BİST100 (Türkiye) temel olarak Ocak 2017 - Ekim 2021 tarihleri arasındaki değerler ile veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti Weka ve Python programlama dili üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleriyle analiz edilerek BİST100 piyasa hareketleri tahmin edilmektedir. Gelişmekte olan ülkelerin borsa endekslerinin incelenmesi ve tahminlenmesine ilişkin algoritmaların kullanıldığı bu çalışma bilişim teknolojilerinin gerçekleşmesine paralel olarak gelecekte gerçekleştirilebilecek olan çalışmalara referans niteliğinde olacaktır. Farklı makine öğrenme ve derin öğrenme yöntemlerinin birlikte kullanımı ayrıca farklı piyasalarda kullanılabilir olması ile beraber performansının test edilebilmesi, yöntemlerin araştırılması ve geliştirilmesi sonucunda gelişmekte olan ülkelerde tahminlere dayalı kısa ve uzun vadeli politikalara katkı sağlayacağı görülmektedir.

2 Materyal ve metod

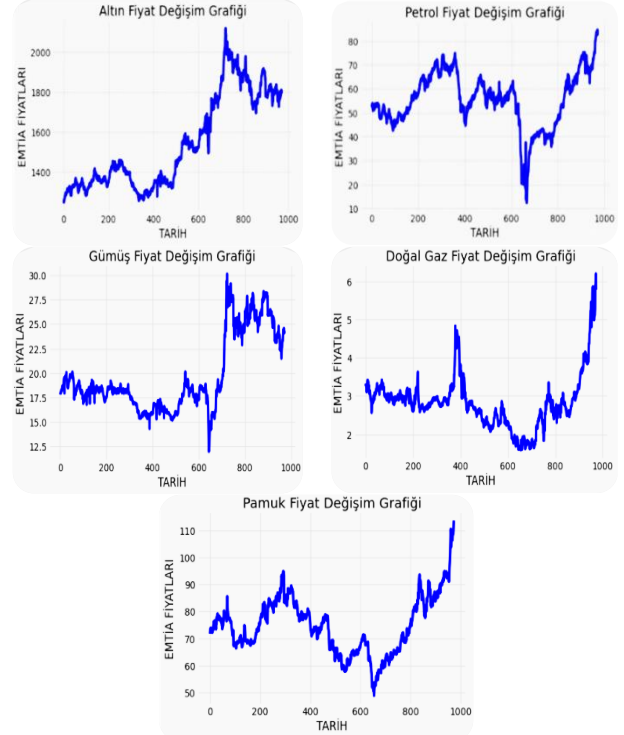
Döviz piyasaları (Dolar, Euro, Pound), emtia piyasaları (Petrol, Altın, Gümüş, Doğalgaz, Pamuk) ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endekslerini (Shanghai (Çin), İpc (Meksika), Sensex (Hindistan), RTSI (Rusya), Bovespa (Brezilya) ve BİST100 (Türkiye) temel olarak oluşturulan veri setleri değerlendirilerek analiz yapılacak; bu verilerin Ocak 2017 – Ekim 2021 tarihleri arasındaki değerleri Python programlama dili kullanılarak derin öğrenme yöntemleriyle bağ kurularak, gelişmekte olan ülkelerin borsa endekslerine paralel olarak açıklanmaya çalışılacaktır. Söz konusu hisse senetlerine ait veriler “<https://tr.investing.com/>” üzerinden elde edilmiştir. Kullanılan verilerde hafta sonları ve tatil günleri göz önüne alınmamıştır. Ayrıca gelişmekte olan ülkelerin borsa tatil günleri borsanın kapalı olması nedeniyle ayrıştırılarak ele alınmıştır. Ayrıştırmalar sonucunda 14 öz nitelikli veri seti ile çalışma planlanmıştır. Çalışmada Borsa endeksleri, Emtia piyasaları ve Döviz Piyasalarının kapanış verileri ile veri setleri oluşturulmuştur.

Veri setinden borsa verilerinin eksik olduğu günler ayrıştırılarak Ocak 2017 - Ekim 2021 tarihleri arasında 973 günlük fiyat bilgisi elde edilmiştir. Düzenlenen veri setinden 10 adet örnek Tablo 1’de yer almaktadır.

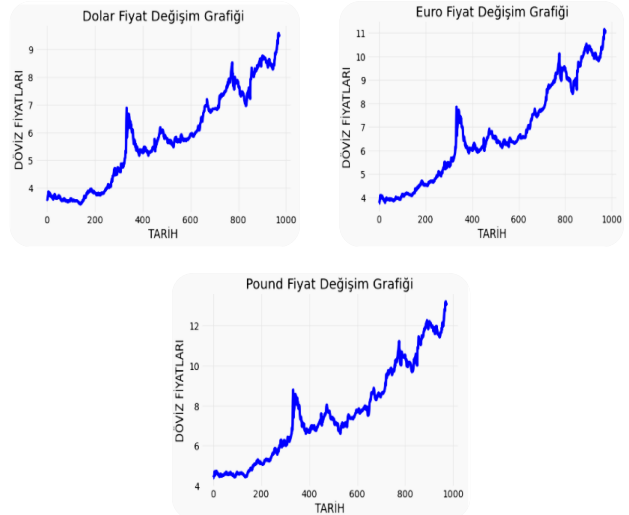
Emtia piyasası, özellikle hammadde ya da üretilmiş durumda ticarete konu olan gümüş, altın, petrol, bakır, doğalgaz, pamuk, mısır, şeker, buğday, kahve gibi malların alınıp satılmasıyla oluşan piyasalardır. Altın Spot, Ham Petrol, Gümüş Spot, Doğalgaz ve Pamuk temel alınarak veri seti oluşturulmuştur. Şekil 1’de, Altın, Petrol, Gümüş, Doğal Gaz ve Pamuk Ocak 2017 – Ekim 2021 yılları arasındaki fiyat değişim grafikleri gösterilmektedir. Fiyat hareketlerinin eğimleri altın ve gümüş grafiklerinde aynı yönlü hareket ederken petrol doğal gaz ve pamuk içinde kendi aralarında aynı yönde hareket ettiği görülmektedir.

Döviz piyasaları, yabancı ülke paralarının alınıp satıldığı piyasalar ya da bir ulusal para başka bir ulusal paraya çevrimi sonucu oluşan piyasalardır. Amerikan Doları / Türk Lirası, Euro / Türk Lirası, İngiliz Sterlini / Türk Lirası temel alınarak veri seti oluşturulmuştur. Şekil 2’de, Amerikan Doları, Euro ve İngiliz Sterlini Ocak 2017 – Ekim 2021 yılları arasındaki fiyat değişim grafikleri yer

almaktadır. Fiyat hareketlerinin eğimleri seçilen paritelerde birbirleri ile aynı yönde hareket ettiği görülmektedir.



Şekil 1. Altın, petrol, gümüş, doğal gaz ve pamuk fiyat değişimi

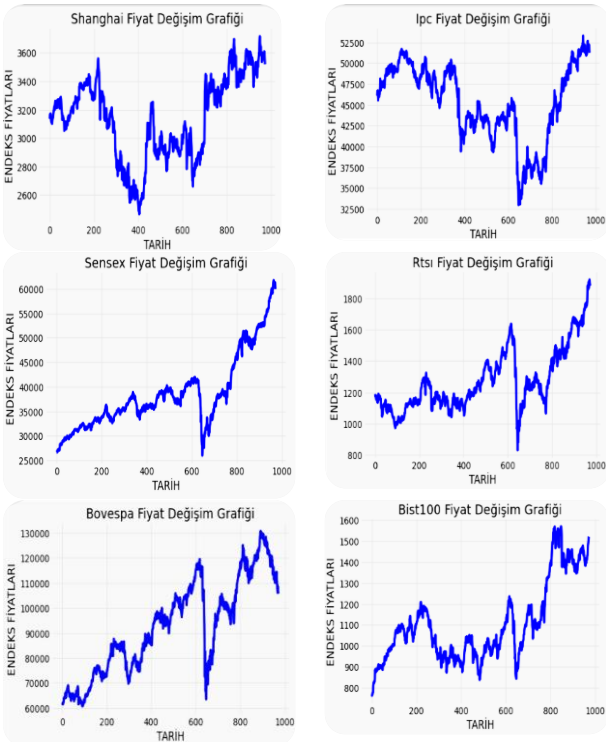


Şekil 2. Amerikan Doları, Euro ve İngiliz Sterlini fiyat değişimi

Borsa endeksleri, birçok veriyi içerebilen ve bu verilerden hesaplamalar sonucunda yaklaşık değerler ile hızlı bilgiye ulaşmamızı sağlayan göstergelerdir. Bist100, Çin, Hindistan, Meksika, Rusya, Brezilya borsa endeksleri temel alınarak veri seti oluşturulmuştur.

Tablo 1. Veri setinden örnek değerler

Tarih	Altın	Petrol	Gümüş	Doğalgaz	Pamuk	Dolar	Euro	Pound	Shanghai	IPC	SENSEX	RTSI	BOVESPA	BİST100
2017-01-03 00:00:00	1244.7	52.33	17.81	3.327	71.75	3.5944	3.7403	4.3991	3135.92	46123.36	26643.24	1189.32	61814	766.18
2017-01-04 00:00:00	1247.1	53.26	17.955	3.267	73.47	3.5713	3.746	4.4005	3158.79	46587.74	26633.13	1176.69	61589	761.44
2017-01-05 00:00:00	1262.1	53.76	18.037	3.273	73.81	3.5927	3.8108	4.4618	3165.41	46719.99	26878.24	1180.31	62071	763.86
2017-01-06 00:00:00	1255.7	53.99	17.921	3.285	73.94	3.6445	3.8388	4.478	3154.32	46071.57	26759.23	1172.59	61665	771.07
2017-01-09 00:00:00	1267.6	51.96	18.096	3.103	73.01	3.7129	3.926	4.5158	3171.24	45553.51	26726.55	1160.27	61700	773.94
2017-01-10 00:00:00	1268.5	50.82	18.282	3.278	73.08	3.7885	3.9987	4.6132	3161.67	45886.27	26899.56	1175.01	62132	773.94
2017-01-11 00:00:00	1280	52.25	18.275	3.224	73.17	3.8647	4.0899	4.7196	3136.75	45933.65	27140.41	1155.5	62446	776.67
2017-01-12 00:00:00	1283.3	53.01	18.271	3.386	72.39	3.7597	3.99	4.5718	3119.29	46060.98	27247.16	1175.28	63954	808.91
2017-01-13 00:00:00	1281.3	52.37	18.209	3.419	72.25	3.723	3.9628	4.534	3112.76	46182.43	27238.06	1158.19	63652	815.24
2017-01-17 00:00:00	1297.4	52.48	18.593	3.412	72.14	3.761	4.0293	4.6687	3108.77	46002.56	27235.66	1156.47	63831	823.
2017-01-18 00:00:00	1295.7	51.08	18.718	3.302	72.27	3.7966	4.0359	4.6543	3113.01	46360.63	27257.64	1151.65	64354	827.79
2017-01-19 00:00:00	1285.5	51.37	18.438	3.368	72.78	3.8273	4.0815	4.7237	3101.3	46265.26	27308.6	1136.62	63951	823
2017-01-20 00:00:00	1289.2	52.42	18.471	3.204	73	3.7655	4.0302	4.6598	3123.14	46331.6	27034.5	1138.99	64521	830.67



Şekil 3. Çin, Hindistan, Meksika, Rusya, Brezilya ve Türkiye borsa döviz grafiği

Makine öğrenmesine girdi olarak verilen Shanghai (Çin), Ipc (Meksika), Sensex (Hindistan), RTSI (Rusya), Bovespa (Brezilya) ve BIST (Türkiye)'nin Borsalarının verileri Ocak 2017 ile Ekim 2021 tarihleri arasındaki endekslerin kapanış değerlerini Şekil 3'te grafik üzerinde gösterilmektedir.

2.1 Makine öğrenmesi

Makine öğrenmesi bilgisayarların insanlar gibi öğrenme yeteneğinin olabilmesi için çeşitli algoritma, modelleme ve teknikleri geliştirmek amaçlı kullanılan bilimsel bir çalışma alanıdır [15]. Arthur Samuel 1959 yılında makine öğrenmesini "Açıkça programlanmadığı halde makineler öğrenme yeteneği kazandıran disiplin" olarak tanımlamıştır. Makine öğrenmesi 1990'larda gelişmeye başlamıştır [16]. Makine öğrenimi, veriden öğrenebilen öğrendikleriyle tahminde bulunabilen algoritmalarıdır. Bilgisayarlara veriler yüklenip bu verilerden çıkarım yapan bu çıkarımla tahminde bulunabilen, programlanan bilgilerin dışındaki bilgileri de ortaya çıkarabilen ve kendi kendini geliştirebilen sistemlerdir. Makine öğrenimi, yapay zekanın bir alt alanı/alt tipidir. Bilgisayarların analitik veri modelleri oluşturmasına ve net bir şekilde kodlanmadan otomatik olarak gizli iç görüler bulmasına izin verir. Amaç, veriler üzerine matematiksel ve istatistiksel işlemler uygulayarak tahminlerden çıkarımlar yaparak öğrenme metotları ve bu metotların performansı ile ilgilendirir [15]. Çözüme ulaşmak için farklı matematiksel ve istatistiksel yöntemler kullanılır. Her bir yöntem makine öğrenmesinde kullanılan veri kümesine uygun olarak seçilmelidir [17].

2.1.1 İbk (K-nearestneighbor – K-en yakın komşuluk)

K En Yakın Komşu algoritması 1950'lerin başında ortaya çıkmıştır. Bu yöntem, büyük eğitim setlerinde öğrenme işlemi zaman kaybedilmesine yol açmaktadır. Bu sebeple, bilgi işlem gücü kullanılabilir hale dönüşene kadar popülerlik kazanmamıştır. 1960'lardan sonra hazırlanan minimum uzaklık sınıflayıcı üzerine çalışmalarla geliştirilerek 1967'de T. Cover ve P. Hart'ın sunumunu gerçekleştirdiği yakın komşular örüntü sınıflama çalışmalarıyla netliğe kavuşmuştur [18].

Örnek tabanlı olup aynı mesafe ölçüsünü kullanan K-en yakın komşular sınıflandırma algoritmasıdır. Hem sınıflandırma hem de regresyon problemleri için kullanılır. Çapraz doğrulamaya dayalı olarak uygun k değerini seçebilir. Mesafe ağırlıklandırması da yapabilir. Denetimli sınıflandırma algoritmalarından k en yakın komşu algoritmasında sınıflandırma işlemi sırasında kaç adet k değerine bakılarak sınıflandırma yapılacağına karar verilir. Gelen değer sınıflandırmasında k değerine bakılarak o değere en yakın k adet değer karşılaştırılır ve en çok sınıflı olan değer sınıflı olmuş olur. K en yakın nokta hesaplaması sırasında çeşitli uzaklık hesaplama fonksiyonlarından faydalanılır. Aşağıdaki fonksiyonlar bunların başlıcalarıdır:

- Manhattan Hesaplaması
- Minkowski Hesaplaması
- Öklid Hesaplaması

Ağırlık belirleme yöntemi ile $W=1/(d*d)$ ile her uzaklığın ağırlığı bulunarak seçilen k değerine göre sınıflı karşılaştırması yapılır [19].

2.1.2 Random forest (Rastgele orman)

Rastgele orman sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan, karar ağacı algoritmalarından oluşan denetimli bir öğrenme algoritmasıdır. Karar ağaçları rastgele bir orman algoritmasının yapı taşlarıdır. Rastgele orman algoritması tarafından oluşturulan orman, torbalama veya önyükleme toplama yoluyla eğitilir. Torbalama, tek bir örnek yerine farklı eğitim veri örneklerinin kullanılmasını içerir [20]. Davranış ve sonuçları tahmin eder ve daha çok sınıflandırma problemleri için kullanılır. Rastgele orman algoritması, veri örnekleri üzerinde karar ağaçları oluşturur. Regresyon hesaplamak için tek tek karar ağaçlarının tahminlerinin ortalaması alınır. Karar ağaçlarının tahminlerine dayanarak sonuç belirlenir. Ağaç sayılarının artması ile sonucun kesinliği artar. Rastgele oluşan bir orman, karar ağacı algoritmalarının sınırlılıklarını ortadan kaldırır. Hassasiyeti artırır ve tahminler üretir.

Rastgele orman algoritması öncelikle veri kümesinden rastgele örnekler seçer ve seçilen her bir örnek için bir karar ağacı oluşturur. Oluşturulan her bir karar ağacından bir tahmin sonucu üretir. Daha sonra tahmin edilen her sonuç için ortalama hesaplanır ve en çok oylanan tahmin sonucunu seçecektir.

2.1.3 Random committee (Rastgele komite)

Veri içerisinde rastgele seçilen temel sınıflandırıcılar komitesini oluşturmak için kullanılan bir sınıflandırıcıdır. Aynı verilere dayalı olarak seçilen her temel sınıflandırıcı, farklı bir rasgele sayı çekirdeği kullanılarak oluşturulur. Bireysel temel sınıflandırıcılar ile üretilebilen tahminlerin düz bir ortalaması olarak nihai tahmin hesaplanır [21].

2.1.4 Kstar (K yıldız -K*)

K^* , regresyon için geliştirilmiş örnek tabanlı bir sınıflandırıcıdır, yani bir test örneğinin sınıfı, bazı benzerlik işlevleriyle belirlendiği üzere, ona benzer eğitim örneklerinin sınıfına dayanır. Entropi tabanlı bir uzaklık ölçütü işlevi kullanması açısından diğer örnek tabanlı

öğrencilerden farklıdır. Veri madenciliğinde kullanılan öğrenme algoritmalarından biri olan bu yöntemde amaç, test veri setinde yer alan özniteliği belirli olmayan bir örneğin, veri tabanı içerisinde daha önceden kategorize edilen fakat ortaya çıkmamış eğitim veri setindeki örnekler ile karşılaştırılması esasına göre sınıflandırma gerçekleştirmektir [22]. Kstar ve random forest algoritmalarının en iyi sınıflandırıcı algoritmalar oldukları bilinmektedir. Bunun yanında en az hata oranına sahip algoritmalar içerisinde sırasıyla Random Forest ve Kstar sıralanabilmektedir.

2.2 Derin öğrenme

Beynin sinir yapısından ve yapay sinir ağları işlevlerinden esinlenen makine öğrenme algoritması olan derin öğrenmede, biyolojik nöronlarda olduğu gibi yapay nöronlar giriş sinyallerini almaktadır ve bu sinyaller toplanarak işlenmiş olan çıkışlara iletilmektedir. Son yıllarda küreselleşmenin etkisiyle donanım ve bilişim teknolojisinin gelişmesiyle dijital ortamda her an milyonlarca veri büyük boyutlarda üretilerek depolanmaktadır. Eğitim için kullanılan veriler çoğaldıkça, klasik makine öğrenme algoritmalarının büyük verileri karşılamadaki performansı yetersiz kalmıştır. Makine öğrenme algoritmalarında hızlı gelişmeler gerçekleşmektedir; günümüzde internetin yaygın şekilde kullanılması ile verilere ulaşma kolaylaşmıştır. Sonuca hızlı ulaşmanın yanı sıra, ulaşılan sonucun performans değerinin yüksek olması son derece önemlidir. Derin öğrenme yöntemleri söz konusu verileri etkin bir şekilde kullanarak, verimli sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırmıştır. Derin öğrenme sınıflandırma niteliklerini ve görevlerini doğrudan veriden gerçekleştirmeyi öğrenmesi yönüyle diğer alanlarda ayrılmaktadır. Derin öğrenme modelleri, farklı ve çok sayıda sinir ağı kullanarak insan düzeyinde öğrenme ve bu seviyeye aşan bir performans göstermektedir [23]. Geleneksel makine öğrenme metodları ve derin öğrenme yöntemleri karşılaştırıldığında geleneksel yöntemler veri işleme noktasında sınırlı kalmaktadır. Derin öğrenme yöntemleri ise çoklu işlem katmanlarının hesaplamalarında kullanılmaktadır. Derin sinir ağları ise, klasik yapay sinir ağları yerine, çok fazla katman ve nörondan oluşan bir yapıya sahiptir. Bu yapıya sahip ardışık katman bir önceki katmandaki çıktıyı girdi olarak kullanmaktadır [24]. Kullanıldığı alana göre farklı modellerde tasarlanan derin öğrenme ağları probleme uygun öznitelikleri çıkarmakta ve çıkarılan öznitelikler ağı öğrenmesiyle oluşmaktadır. Kendine sunulan bilgiyi kullanmak yerine hangi bilgiden öğreneceğine kendi kendine karar veren derin öğrenme ağları klasik yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar üretebilmekte olup zaman içerisinde farklı problemlerin çözümleri içinde farklı yapıda derin sinir ağları geliştirilmiştir. Bunlar çok katmanlı derin yapay sinir ağları, tekrarlamalı sinir ağları, uzun kısa vadeli hafıza, sınırlı Boltzmann makinesi, otomatik kodlayıcı, konvolüsyonel derin sinir ağları literatürde geliştirilen derin sinir ağları modelleridir.

Derin yineleme denklemleri vasıtasıyla karmaşık zamansal dinamikleri öğrenebilmektedir. İnsanlar bilgiyi işlerken, daha önceden öğrendikleri bilgileri, tecrübe

ettikleri olayları, yeni durum ile analiz edip öyle tepki vermektedirler. RNN'ler pek çok görevde başarılı olduklarını kanıtlamıştır, ancak kısmen tekrar eden ağıın birçok katmanı (zaman karşılık gelen) boyunca geçişlerin neden olabileceği yok olma ve patlama eğilimlerine bağlı olarak uzun vadeli dinamikleri öğrenmede sorunlar çıkarmaktadır.

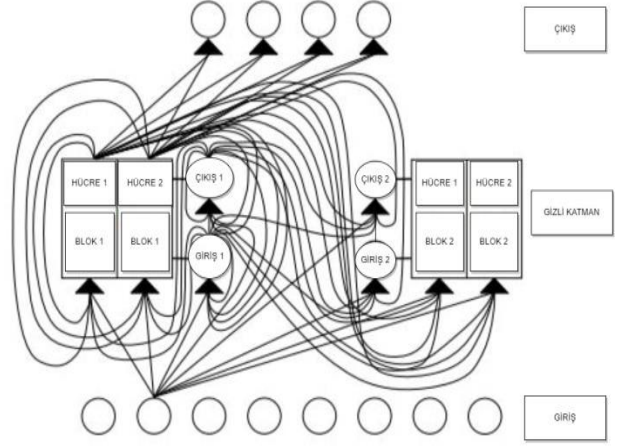
2.2.1 Uzun kısa süreli bellek (LSTM)

Uzun kısa süreli bellek tekrarlayan sinir ağlarının alt dalı olarak RNN'deki sorunların ortadan kaldırılmasına yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. Uzun kısa süreli bellek yapısında giriş, çıkış ve unut olmak üzere üç kapı bulunmaktadır. Bu kapılar sırasıyla; yazma, okuma ve sıfırlamadır. Hücre durumlarındaki değişiklikler üç kapı tarafından denetlenmektedir. Hücrelere iletilebilecek bilgilerin seçimi, bu bilgilerin çıktı olarak nasıl kullanılacağı ve ne kadarının kullanılacağı gibi seçimlerin gerçekleşmesini sağlayan kapı mekanizmalarını sisteme dahil ederek RNN'deki sorunların çözülmesine olanak tanımaktadır [23].

Uzun kısa süreli bellek yapısında giriş kapısı(yazma), çıkış kapısı(okuma) ve unut kapısı(sıfırlama) olmak üzere üç kapı yer almaktadır. Bu kapılar sırasıyla; yazma, okuma ve sıfırlamadır. Hücre durumlarındaki değişiklikler kapılar tarafından denetlenmektedir. Hücrelere iletilebilecek bilgilerin seçimi, bu bilgilerin çıktı olarak nasıl kullanılacağı ve kullanılacak miktar gibi seçimlerin gerçekleşmesini sağlayan kapı mekanizmalarıdır. Giriş kapısı belleğe eklenecek bilgileri kontrol ederken unut kapısı, eski bilgilerin hangi oranda sonraki aşamaya taşınacağını kontrol etmektedir. Çıkış kapısı ise bellekte bulunan verinin ne oranda çıktı aşamasında kullanılacağını kontrol etmektedir [20]. İleri faz, giriş ve önsel verileri uzun-kısa süreli bellek hücresi içerisinde işlemlerden geçirerek çıkış üretmektedir. Giriş verisi olarak uzun-kısa süreli bellek girişine x_t verisi gelir ve bir önceki çıkışı ifade eden O_{t-1} verisi ile birleştirilerek kullanılırlar. Veri sıralaması birleşmede bir önceki verinin değeri ile hesaplandığı için önem arz etmektedir. Hesaplanan değerler sonucunda oluşan veri Unutma Kapısı Ağırlıkları (W_f) ile çarpılarak kullanılır. Daha sonra sonucun üzerine bu kısma özgü Unutma Kapısı Sapma Değerleri (b_f) eklenir. En sonda sigmoid fonksiyonundan geçilerek unutma kapısı çıkışına ulaşılır. Bütün işlemlerin tamamlanmasının arkasından tek bir uzun-kısa süreli bellek hücresi için Unutma Kapısı Alanı çıkışı elde edilir. Söz konusu çıkış ilerleyen adımlardaki çıkışlarla birleştirilerek sonuca gidilir [24].

Unutma kapısı çıkış değerlerinin hesaplanmasının ardından, "Giriş Kapısı" ve "Aktivasyon Kapısı" çıkış değerleri hesaplanır. Çıkış değerleri hesaplanırken "Unutma Kapısı" bölümünde yer alan x_t ve O_{t-1} değerleri ile birleştirilerek kullanılırlar. Şekil 4'te giriş kapısı değerlerini hesaplarken daha önce oluşan değerler, Giriş Kapısı Ağırlıkları ile çarpılır ve oluşan değere Giriş Kapısı Sapma Değerleri (b_i) eklenir. Bu bölümde oluşan değer sigmoid fonksiyonuna tabi tutularak Giriş Kapısı çıkışları oluşur. İkinci bölümde birleştirilen x_t ve O_{t-1} değerleri önce Aktivasyon Kapısı Ağırlıkları (W_a) ile çarpılır, sonucun üzerine Aktivasyon

Kapısı Sapma (b_a) değerleri eklenir. Oluşan sonuç tanh fonksiyonuna dahil edilerek Aktivasyon Kapısı çıkışları oluşur. Son olarak, Giriş Kapısı çıkışları ve Aktivasyon Kapısı çıkışları çarpılarak bu alanın asıl çıktı değeri elde edilir.

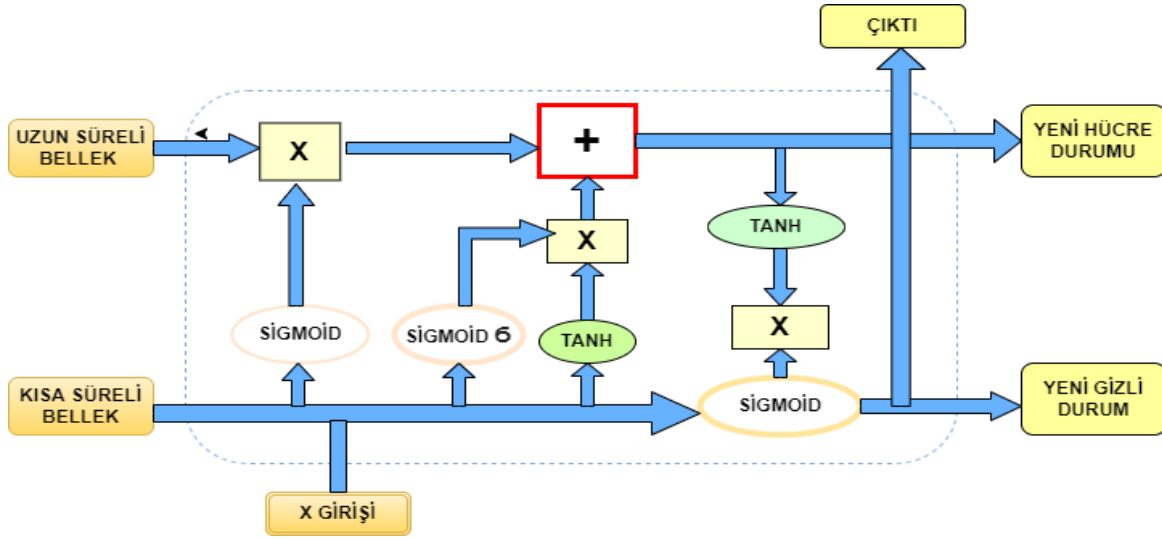


Şekil 4. LSTM modeli

Sıradaki adımda Giriş Kapısı, Aktivasyon Kapısı ve Unutma Kapısı çıkışları kullanılarak Bağlam Çıkışları değerleri elde edilir. Bu değerler bir sonraki uzun-kısa süreli bellek hücresi için kullanılacaktır ve amacı veri sırası arasında bağlantı kurarak sıralamayı gözetmektir. Şekil 5'de yer aldığı gibi son olarak uzun kısa süreli bellek çıkışları hesaplanmalıdır. Çıkışları hesaplamak için bir önceki çıkışlar ile giriş verisi birleştirilerek sigmoid fonksiyonu ile işleme alınır ve bu değer ile bir önceki adımda elde edilen bağlam çıkışlarını tanh fonksiyonundan geçirerek işleme alır. Elde edilen değer uzun-kısa süreli bellek hücresinin çıkışıdır.

Birden fazla çıkış olması halinde bağlam çıkışları ve hücre çıkışları bağlanarak uzun-kısa süreli bellek ağ yapısı oluşturulur. Tüm uzun-kısa süreli bellek hücreleri için çıkışlar hesaplandıktan sonra güncelleme değerleri için geri faz başlamaktadır. İleri fazda hesaplamalar en soldaki uzun-kısa süreli bellek hücresinden başlayarak en sağdaki hücrenin çıkışı elde edilene kadar sürer. Bundan sonra geri faz başlar. Geri faz ise ters yönde ilerletilerek en sağdan en sola doğru yani çıkıştan girişe doğru yönlenir.

Bellek birimlerini bir araya getirerek bir çözüm sağlayan belirli bir tekrarlayan ağ biçimidir. Bu, ağın önceki gizli durumları ne zaman unutması gerektiğini ve yeni bilgiler verildiğinde gizli durumları ne zaman güncelleyeceğini öğrenmesine olanak tanır. Bir LSTM modeli, önceki dönemlerin oynaklık modellerini ezberleyerek geçmişe ait verileri kullanarak tahminleri potansiyel olarak artırabilir. LSTM modeli, eğitilecek daha büyük zamansal ilişkilerin tanımlanmasını otomatikleştirebilir. LSTM modellerinin sayısız finans uygulama alanları mevcuttur. Bunlar, varlık geri dönüş hareketlerinin altında yatan ve uzun bellek etkileri yakalayabilen yeni bir değişkenlik sınıfı modeli sağlarlar.



Şekil 5. LSTM (Unut kapısı ve çıkış kapısı)

Öğrenme sürecinin verimli bir şekilde sonuçlanabilmesi amacıyla derin öğrenme uygulamalarında hata fonksiyonunun mutlak minimum değerinin hesaplanması gerekmektedir. Söz konusu süreç, optimizasyon yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Optimizasyon, ağın ürettiği çıkış değeri ile gerçek değer arasındaki farkı düşürmek ayrıca ortaya çıkabilecek hatayı en düşük seviyeye indirmek için kullanılır. Yapay sinir ağlarının optimizasyonun sağlanabilmesi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri gradyan inişidir. Veri setinin büyüklüğüne göre üç adet gradyan iniş yöntemi (Batch Gradient Descent, Stochastic Gradient Descent, Mini-Batch Gradient Descent) bulunmaktadır. Gradyan iniş yöntemini temel alan çeşitli algoritmalar (Rmsprop, Adagrad, Adam, Nadam) mevcuttur. Optimizasyon algoritmalarında öğrenme katsayısının ayarlanması modelin geliştirilmesinde önemli bir yere sahiptir. Fakat her algoritma ile modeldeki öğrenme katsayısını tam olarak ayarlayabilmek mümkün değildir. Bu sorunu çözebilmek için gradyan yöntemlerinin farklı çeşitleri kullanılabilir. Adam düşük dereceli momentlerin uyarlanabilir tahminlerine dayanan, stokastik amaç fonksiyonlarının birinci dereceden gradyan tabanlı bir algoritmasıdır. Adam, makine öğrenmesini birçok uygulayıcısı tarafından kullanılan teknoloji optimizasyon algoritmalarından birisidir. İkinci an ile normalize edilen ilk an güncellenen yönünü vermektedir. Adam optimizasyonu yönteminde, Rmsprop'ta gerçekleştiği gibi geçmiş eğitimlerin karelerinin üssel olarak ağırlıklandırılmış ortalamalarının (Vt) kullanılmasıdır. Ayrıca, momentum değişikliklerini (mt) de önbellekte saklar. Rmsprop ve momentumu birleştirir. Varsayılan değer β_1 için 0.9; β_2 için 0.999 ve ϵ için 10⁻⁸ olarak belirtilmiştir [25].

3 Bulgular ve tartışma

Finansal piyasalarda geleceğe yönelik tahmin için birçok yöntem geliştirilmiştir. Son dönemde makine öğrenmesi, derin öğrenme yapay zekâ başlıkları altında birçok çalışma yapılmaktadır [26-28]. Bu çalışmada da emtia, döviz fiyatları ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endeks verileri makine

öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri Weka programı ve python yazılım dili yardımıyla incelenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) yönteminin tahmin değeri karşılaştırılmıştır. BİST100 endeksinin kapalı olduğu günlere ilişkin olarak veri setlerinde ayrıştırma yapılmıştır.

Verileri tahmin etmek ve değerlendirmek için makine öğrenmesi modelleri Weka programı ile analiz edilmiştir. Makine öğrenmesi modelleri değerlendirilerek en yüksek başarı oranını veren 10 farklı makine öğrenmesi yöntemi ile 5 ve 10 fold (k katmanlı çapraz doğrulama) kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Makine öğrenmesi modellerinin performansında hata oranları ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error-MAE), ortalama karesel hata karekökü (Root Mean Squarederror-RMSE) ve (Relative Absolute Error-RAE) değerlendirme ölçütleri ile incelenmiştir.

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error-MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x - x'|}{n}$$

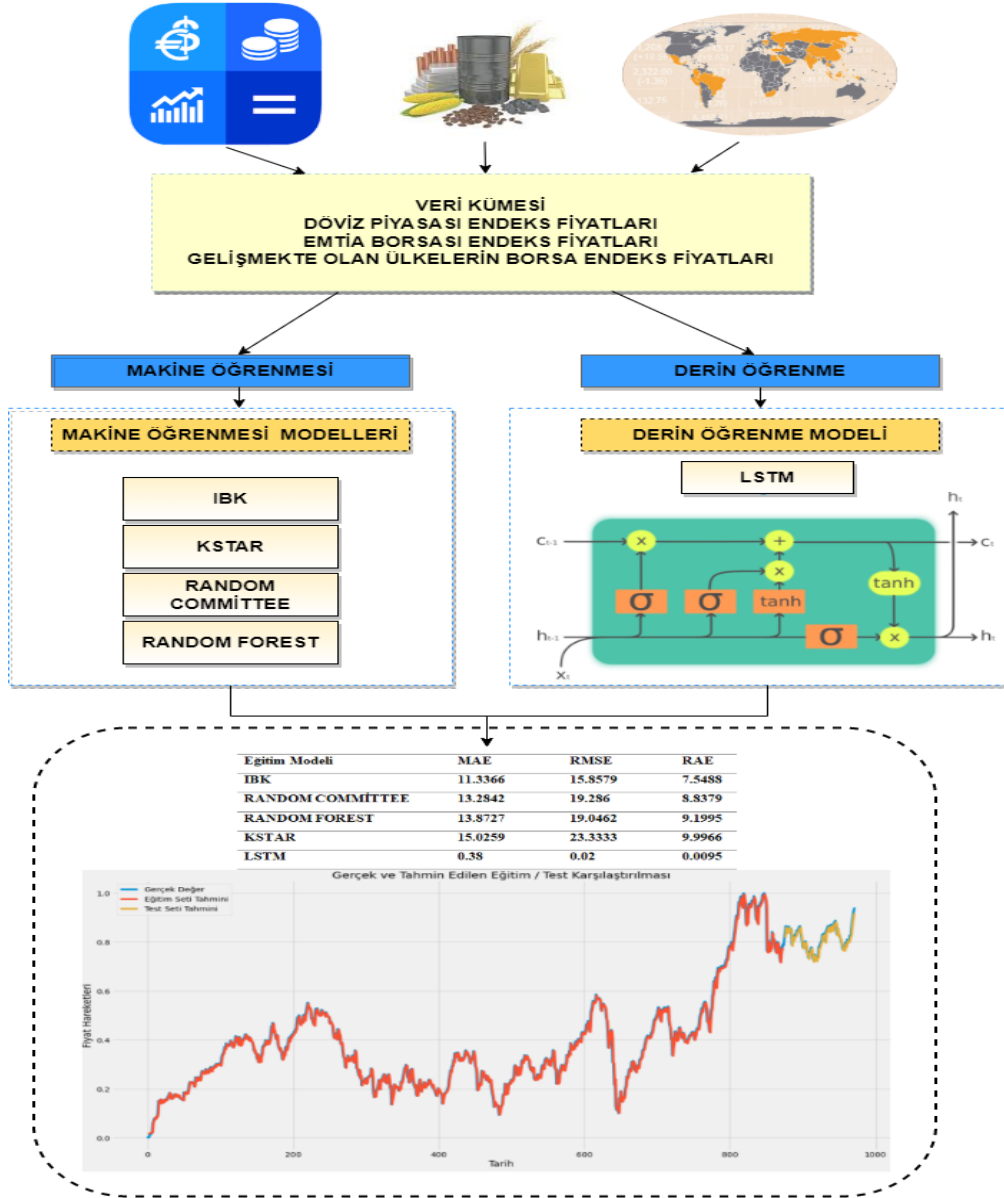
Ortalama Karesel Hata Karekökü (Root Mean Square Error-RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x')^2}{n}}$$

Bağıl Mutlak Hata (Relative Absolute Error-RAE)

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - A_i)}{\sum_{i=1}^n (A_i - A_m)}$$

Uygulanan veri setinin 14 öznetiliği bulunmaktadır. Analizler için Intel(R) Core™ i5-5300U CPU @ 2.30GHz ve 8 GB belleğe sahip bilgisayar kullanılmıştır. Çalışmada aynı veri seti üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile analiz yapılmıştır. Çalışmada oluşturulan veri seti üzerinde yapılan farklı deneyler ile düşük hata oranına sahip modelin belirlenmesi hedeflenmiştir.



Şekil 6. Çalışmanın mimarisi

Şekil 6'da çalışmanın mimarisi yer almaktadır. Veri kümesinde gelişmekte olan ülkelerin borsa endeksleri, emtia borsa endeksleri ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endeksleri kullanılmıştır. Derin öğrenme ve makine öğrenmesi ile verilerin analizi yapılmış ve eğitim modeli oluşturulmuştur.

Makine öğrenmesi modelleriyle tahmin yapma ve performans karşılaştırmasına ilişkin sonuçlar Tablo 2'de yer almaktadır. Tabloda, 5 ve 10 fold ile hesaplanan hata oranları yer almaktadır.

Tablo 2'de makine öğrenmesi algoritmalarının ile weka üzerinde yapılan analizlerin hata değerleri gösterilmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerine 5 fold ve 10 fold çapraz doğrulama kullanılarak yapılan tüm analizlerden 10 başarılı yöntemde detaylı olarak tabloda yer almaktadır. Algoritmaların performansları incelendiğinde en başarılı 5

öğrenme yönteminin sırası ile IBk, KStar, Random Forest, Random Committee'dir. Sonuçların objektif değerlendirilebilmesi için yöntemlere ayrıca 10 fold çapraz geçerlilik uygulanarak analizler yapılmıştır. İki farklı çapraz geçerlilik ile yapılan hata oranlarının ortalaması alınarak sonuçların objektif olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır

Tablo 3'de en başarılı beş yöntem ve iki farklı çapraz doğrulama uygulanması sonucunda oluşan değerler yer almaktadır. 5 ve 10 fold çapraz doğrulama uygulanan modellerin içerisinde IBk, Kstar, Random Committee, Random Forest modellerinin hata oranı diğer modellere göre daha düşük olduğu görülmektedir. Verilere en uygun parametreleri bulmak için çok sayıda deneme yapılmıştır. Denemeler sonucunda en az hata oranlarına sahip modellerin gerçek değer, tahmin değeri ve hata değerlerinin grafik olarak görselleştirilmiş hali verilmiştir.

Tablo 2. Makine öğrenmesi 5 ve 10 çapraz doğrulama ile performans karşılaştırması

Sınıf	MAE5	RMSE5	RAE5	MAE10	RMSE10	RAE10
Multilayer Perceptron	24.9645	31.6093	16.617	24.556	31.1729	16.3285
IBk	11.5213	16.1133	7.6689	11.172	15.6026	7.4288
KStar	15.0876	23.1503	10.0427	14.9643	23.5164	9.9505
Bagging	19.1072	26.5804	12.7182	18.2429	25.2856	12.1306
Random Committee	13.5368	19.9514	9.0104	13.0316	18.6206	8.6654
Randomizable Filtered Classifier	15.8639	24.3361	10.5594	15.1916	23.4192	10.1016
Random Sub Space	19.1738	26.2277	12.7625	18.4208	24.9351	12.2489
M5Rules	21.8232	30.2389	14.5261	20.3456	28.0132	13.5288
M5P	19.8036	26.9053	13.1818	19.4991	26.5143	12.9659
Random Forest	14.1467	19.5171	9.4164	13.5987	18.5753	8.9826

Tablo 3. Makine öğrenmesi performans karşılaştırması

Sınıf	Çapraz geçerlilik	MAE	RMSE	RAE
IBk	5 Fold	11.5213	16.1133	7.6689
	10 Fold	11.172	15.6026	7.4288
	Ortalama	11.3366	15.8579	7.5488
KStar	5 Fold	15.0876	23.1503	10.0427
	10 Fold	14.9643	23.5164	9.9505
	Ortalama	15.0259	23.3333	9.9966
Random Committee	5 Fold	13.5368	19.9514	9.0104
	10 Fold	13.0316	18.6206	8.6654
	Ortalama	13.2842	19.286	8.8379
Random Forest	5 Fold	14.1467	19.5171	9.4164
	10 Fold	13.5987	18.5753	8.9826
	Ortalama	13.8727	19.0462	9.1995

IBk sınıflandırma yönteminde, en yakın komşulara göre sınıflandırma yapılmaktadır. K en yakın komşulardaki k değeri değişken bir özellik göstermekte olup belli olmayan bir durumun ne şekilde sınıflandırılacağına karar vermek için kullanılmaktadır. Kendine komşu olarak kaç değer seçilebileceğini belirler. Performansı parametreler etkiler. Çalışmada farklı parametreler sonucunda oluşan yüksek performanslar baz alınmıştır. KNN= 2, batchSize=100 parametreleri ve numDecimalPlaces = 2, windowSize=0 olarak kullanılmıştır.

Random Committee, veri içerisinde rastgele seçilen temel sınıflandırıcılar komitesini oluşturmak için kullanılan bir sınıflandırıcıdır. BatchSize = 100 parametreleri ve numDecimalPlaces = 2, numIterations = 10, seed = 1 olarak kullanılmıştır. Rastgele orman algoritması, veri örnekleri üzerinde karar ağaçları oluşturur. Karar ağaçlarının tahminlerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Çalışmada farklı parametreler sonucunda oluşan yüksek performanslar baz alınmıştır. BagSizePercent =100, batchSize =100 parametreleri ve numDecimalPlaces =2, numIterations = 100, seed =3 olarak kullanılmıştır. Kstar sınıflandırma yönteminde sınıflandırıcı bazı benzerlik özelliklerine göre ona benzeyen eğitim örneklerinin sınıfına dayanır. Burada parametre olarak batchSize =100 ve globalBlend = 5, numDecimalPlaces =2 olarak kullanılmıştır. Şekil 7’de kullanılan parametre oluşan değerler görselleştirilmiştir.

```

Model: "sequential_1"
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
lstm_1 (LSTM)                (None, 15)                  1020
dense_1 (Dense)              (None, 1)                   16
-----
Total params: 1,036
Trainable params: 1,036
Non-trainable params: 0

```

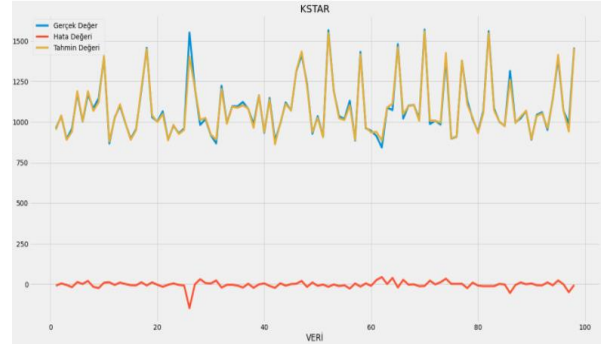
Şekil 8. Kullanılan modeller ve parametreler

Şekil 8’de LSTM yapısı yer almaktadır. Tek katmanlı LSTM modeli ve tek bir çıkış ile düğüm kullanılmıştır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri kullanılarak aynı veri kümesi üzerinde yapılan çalışmaların sonucu Tablo 4’te yer almaktadır.

Tablo 4. Performans değerleri

Eğitim Modeli	MAE	RMSE	RAE
IBk	11.3366	15.8579	7.5488
Random Committee	13.2842	19.286	8.8379
Random Forest	13.8727	19.0462	9.1995
KStar	15.0259	23.3333	9.9966
LSTM	10.27	14.15	6.06

Tablo 4’de kullanılan makine öğrenmesi teknikleri ve LSTM modelinin ölçüm değerleri sonucu yer almaktadır. IBk modelinin MAE değeri 11.3366, RMSE değeri 15.8579, RAE değeri 7.5488’dir. Random Committee modelinin MAE 13.2842 değeri RMSE değeri 19.286, RAE değeri 8.8379’dir. Random Forest modelinin MAE 13.8727 değeri RMSE değeri 19.0462, RAE değeri 9,1995’dir. KStar için MAE değeri 15.0259, RMSE değeri 23.3333 ve RAE değeri 9.9966’dir. LSTM modelinin MAE değeri 10.27, RMSE değeri 14.15 ve RAE değeri 6.06’dur. Sonuçlar incelendiğinde aynı veri seti üzerinde yapılan çalışmada sonuçlar incelendiğinde LSTM modelinin en yüksek başarıya ulaştığı görülmektedir.

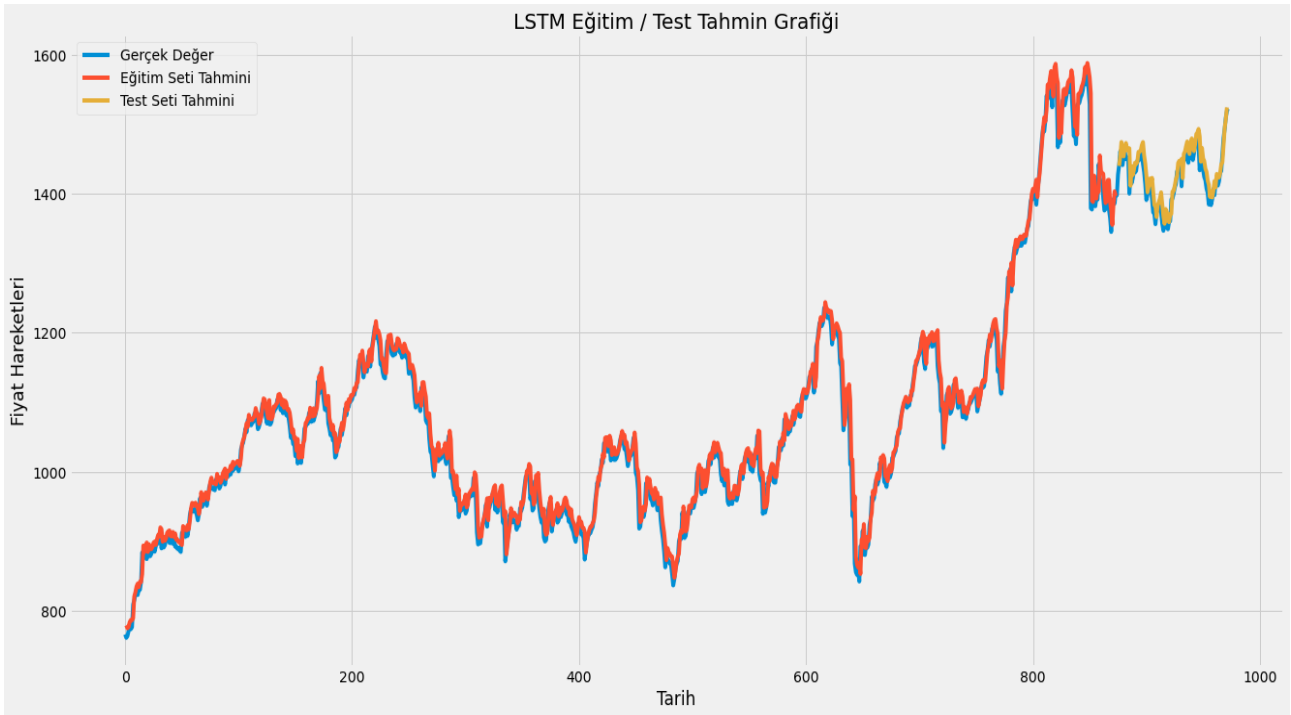


Şekil 7. IBk, Random Committee, Random Forest, KStar tahmin grafiği

Şekil 9’de LSTM modelinin MAE değeri 10.27, RMSE değeri 14.15 ve RAE değeri 6.06 ile oluşan hataların grafik modeli yer almaktadır. İşlenmemiş veri(True Value) grafikte mavi renkte, eğitim verisi(Training Set Prediction) grafikte kırmızı renkte ve test verisine uygulanan eğitilmiş model(Test Set Prediction) sarı renk ile gösterilmektedir. Toplam 973 günlük kapanış verininin 875 tanesi eğitim verisi 98 tanesi test verisi olarak kullanılmıştır. Grafik ayrıca hata oranları dikkate alındığında mavi ve sarı ile oluşan trend oldukça uyumlu ve hata oranları da düşüktür.

4 Sonuçlar ve öneriler

Finansal piyasalarda uygulanmak üzere, geleceğe yönelik tahmin için birçok yöntem geliştirilmiştir. Geleceği ön görmek doğru finansal kararlar vermemizi sağlamaktadır. Tahminleme için farklı yöntemlerle birçok tahmin teorisi hesaplanabilmektedir.



Şekil 9. LSTM tahmin grafiği

Son dönemde makine öğrenmesi ve yapay zekâ hakkında birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar ile finansal tahminlere, makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri ile ulaşılabilmektedir. Uygulamalar sonucunda makine öğrenmesinde başarılı sonucu IBk algoritması verirken derin öğrenmede kullanılan LSTM modelinin IBk algoritmasına göre daha düşük hata oranı verdiği görülmüştür. LSTM için test sonuçları incelendiğinde MAE değeri 10.27, RMSE değeri 14.15 ve RAE değeri 6.06'dır. Çalışmada emtia ve döviz kurları ve gelişmekte olan ülkelerin borsa endeksleri arasındaki ilişki uzun-kısa süreli hafıza modelinin etkili bir tahmin edici olduğu ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla bu modelin borsalar başta olmak üzere konu ile ilgili olan herkese ve bu alanda yapılacak olan bilimsel çalışmalar için katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Özellikle ekonomik kriz dönemlerinde yapılacak olan başarılı endeks tahminleri ile yatırımcılar piyasanın geleceği hakkında öngörü sahibi olacaklardır.

Çalışmada kullanılan veri seti belli bir dönemi 2017 Ocak ayı ve 2021 Ekim ayını kapsamaktadır. Bu veriler farklı ülke borsalarının farklı dönemlerini ele alarak uygulamış olduğumuz model ile incelenerek gelecekte ortaya çıkabilecek değişimler tahmin edilebilir. Bu değişimler pozitif olarak ortaya çıkması yatırımcıların gerçekleştirecekleri yatırımlar konusunda daha doğru kararlara ulaşmalarına, negatif olarak ortaya çıkması halinde yatırımcıların zarar etmemeleri konusunda tedbir almalarına yardımcı olacaktır. Teknolojinin gelişmesi finans piyasaları üzerinde etkinliğinin her geçen gün artması ve insan faktörü yerine geçmesi hayalden öte bir gerçeklik olarak son yıllarda karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda bu çalışmanın ortaya koymaya çalıştığı model ile bunun mümkün olduğu kanıtlanmış oldu. Uygulama sonucunda LSTM modelinin Bist 100 endeks fiyatını tahmin etmekte etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bazı algoritmalar farklı koşullarda devamlı olarak gerçek değerlerin altında veya üzerinde tahminler yapmaktadır. Bu algoritmaların birlikte kullanılması daha üstün performans göstermesini sağlayabilecektir. Farklı öğrenme süreleri ve farklı piyasalar üzerinde her bir algoritmanın performansının en üst seviyeye ulaşabileceği süreler araştırma konusu yapılarak farklı sonuçlara da ulaşılabilir. Çalışmanın sınırlılığı belirli tarihsel aralıktaki (Ocak 2017- Ekim 2021) menkul değerleri kapsamaktadır. Hedef çalışma olarak farklı finansal veri setleri ve farklı algoritmaların kullanılması ile başarı oranının artırılması düşünülmektedir

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] M. Karslı ve H. Karaman, İslam açısından borsa. İstanbul: Ensar Neşriyat, 1994.
- [2] A. Fertekligil, Türkiye'de borsanın tarihçisi. İstanbul: İMKB Yayınları, 2000.
- [3] U. Erkan, A. Toktas ve D. Ustun, Hyperparameter optimization of deep CNN classifier for plant species identification using artificial bee colony algorithm. J Ambient Intell Human Comput, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03631-w>
- [4] A. Uğur, Hisse senedi getirilerinin panel veri analizi ile tahmini: İstanbul menkul kıymetler borsasında bir inceleme. (Doktora Tezi), İnönü Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Malatya, 2009.
- [5] Y. Kara, M. A. Boyacioglu ve Ö. K. Baykan, Predicting direction of stock price index movement using artificial neural networks and support vector machines: The sample of the Istanbul Stock Exchange. Expert Systems with Applications, 38, 5311 – 5319, 2011.
- [6] M. Akal, BİST 100 endeksi ile GSPTSE ve yükselen borsalar arası etkileşim. Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler E-Dergisi, 38, 1-20, 10.09.2021.
- [7] T. Fischer ve C. Kraus, Deep learning with long-short term memory networks for financial market predictions. European Journal of Operational Research, 000,1-16, 2018.
- [8] C. Krauss, X. A. Do ve N. Huck, Deep neural networks, gradient-boosted trees, random forest: statistical arbitrage on the S&P 500. European Journal of Operational Research, 259(2), 689-702, 2017.
- [9] A. Nahil ve A. Lyhyaoui, Short-term stock price forecasting using kernel principal component analysis and support vector machines: the case of casablanca stock Exchange. Procedia Computer Science, 127, 161-169, 2018.
- [10] P. H. Vuong, T. T. Dat, T. K. Mai, P. H. Uyen ve Pham The Bao, Stock Price Forecasting Based on XGBoost and LSTM. Computer Systems Science and Engineering, 40(1), 237-246, E, 2022.
- [11] Z. Hu, Y. Zhao ve M. Khushi, A survey of forex and stock price prediction using deep learning. Applied System Innovation, 4(1), 9, 2021.
- [12] E. Gavcar, ve H. M. Metin, Hisse Senedi Değerlerinin Makine Öğrenimi (Derin Öğrenme) ile Tahmini. Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi, 10(2), 1-11, 2021. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/pub/eyad/issue/68049/1056795>
- [13] Y. Aker, Analysis of Price Volatility in BIST 100 Index With Time Series: Comparison of Fbprophet and LSTM Model. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (35), 89-93. DOI: 10.31590/ejosat.1066722, 2022.
- [14] İ. Dalkıran ve M. Ozan, Derin Öğrenme Teknikleri Kullanılarak Borsadaki Hisse Değerlerinin Tahmin Edilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, ICAENS, 143-148. DOI: 10.31590/ejosat.1145949, 2022.
- [15] E. Alpaydın, Introduction to machine learning. The MIT Press, 3-6, 2004.
- [16] H. Akpınar, Data veri madenciliği veri analizi. İstanbul: Papatya Bilim, 2014.
- [17] U. Erkan, A precise and stable machine learning algorithm: eigenvalue classification (EigenClass). Neural Comput and Applic 33, 5381–5392, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05343-2>

- [18] G. Dilki ve Ö. Deniz Başar, İşletmelerin finans tahmininde k – en yakın komşu algoritması üzerinden uzaklık ölçütlerinin karşılaştırılması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 19(38), 224-233, 2020.
- [19] Y. Kirelli, E-Ticaret siteleri için sahtekarlık tespit sistemleri. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul ticaret üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2016.
- [20] Ş. Sakarya ve Ü. Yılmaz, Derin öğrenme mimarisi kullanılarak BİST30 indeksinin tahmini. European Journal of Educational & Social Sciences, 4(2), 2654-6621, 2019.
- [21] Ş.E. Kara ve R. Şamlı, Yazılım Projelerinin Maliyet Tahmini için Weka’da Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Karşılaştırılması Analizi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 415-42, 2021.
- [22] K. Vursavuş, F. Üçkardeş, K-star, rastgele orman ve karar ağacı (C.4.5) sınıflandırma algoritmaları ile domatesin renk olgunluğu üzerinde bazı mekanik özelliklerin etkisinin belirlenmesi. Article in Turkish Journal of Agriculture Food Science and Technology, 2015.
- [23] G. Şişmanoğlu, F. Koçer, M.A. Önde ve Ö. K. Şahinsöz, Derin öğrenme yöntemleri ile borsada fiyat tahmini. BEU Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 434-455, 2020.
- [24] S. Turan, Uzun Kısa Süreli Hafıza ve Geçitli Yinelenebilir Birim İle Borsa İstanbul 100 Endeks Değeri Tahmini Üzerine Bir Uygulama. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [25] R. C. Staudemeyer, E. Rothstein Morris, Understanding LSTM a tutorial into long-short term memory recurrent neural networks. Faculty of Computer Science Schmalkalden University of Applied Sciences, Germany, 2019.
- [26] K. Adem ve C. Közkurt, Defect detection of seals in multilayer aseptic packages using deep learning. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 27(6), 4220-4230, 2019.
- [27] K. Adem, Prediction of Gold Prices Using Artificial Neural Networks. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 9(3), 83-89, 2021.
- [28] K. Adem, N. Zengin, M. Hekim, ve S. S. Karaca, Prediction of the relationship between the bist 100 index and advanced stock market indices using artificial neural network:(2011-2015). Journal of New Theory, (13), 86-95, 2016.





Şeker hastalığı teşhisi ve önerilen modellerinin karşılaştırılması Diagnosis of diabetes and comparison of proposed models

Merve Korkmaz¹ , Kaplan Kaplan^{2,*} 

¹ Kocaeli Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 41580, Kocaeli, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 41580, Kocaeli, Türkiye

Öz

Şeker hastalığı insanlarda kan şekeri seviyesinin anormal değerlere ulaştığı kronik bir rahatsızlıktır. Şeker hastalığının erken teşhisi, bu hastalığın sebep olabileceği daha büyük hastalıkların önlenmesi ve gerekli tedavi planlamasının zamanında gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışma kapsamında şeker hastalığı çeşitli modeller ile teşhis edilerek, bu problem için kullanılabilecek en uygun model belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada Lojistik Regresyon, k-En Yakın Komşuluk, CART (Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı), Rastgele Orman, Destek Vektör Makinesi, XGBoost ve LightGBM sınıflandırıcı modelleri kullanılmıştır. 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak performans ölçütleri elde edilmiştir. Modellerin doğruluk oranları sırası ile %84.58, %84.59, %85.02, %88.29, %84.73, %89.29 ve %88.72 olarak elde edilmiştir. Modeller arasında en iyi üç doğruluk oranını veren Rastgele Orman, XGBoost ve LightGBM yöntemlerinde hiper-parametre ayarlaması gerçekleştirilerek en iyi parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ile final modellerinin doğruluk oranları sırasıyla %89.30, %90.01 ve %90.01 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak XGBoost ve LightGBM modellerinin final teşhis modelleri olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Şeker hastalığı, Teşhis, Sınıflandırma, Makine öğrenmesi, Topluluk öğrenimi

1 Giriş

Şeker hastalığı vücutta yer alan pankreas organının yeterince insülin hormonu üretmemesi veya vücudun ürettiği insülin hormonunun yetersizliğine bağlı olarak gelişen ve günümüzde insanlarda en sık görülen kronik hastalıklardan bir tanesidir [1]. Ağız kuruluğu, noktüri, poliüri, polidipsi, iştahsızlık, halsizlik veya çabuk yorulma gibi klasik semptomlar ile ya da bulanık görme, açıklanamayan kilo kaybı, kaşıntı, tekrarlayan mantar enfeksiyonları ya da inatçı enfeksiyonlar gibi daha az görülen semptomlar ile belirti gösteren bu hastalık [2] hipoglisemi, diyabetik ketoasidoz, hiperglisemik hiperozmolar nonketotik koma, koroner arter hastalığı, serebrovasküler hastalık, periferik arter hastalığı gibi makrovasküler komplikasyonlara ya da retinopati, nefropati, nöropati veya diyabetik ayak gibi mikrovasküler komplikasyonlara sebep olması nedeni ile morbidite ve

Abstract

Diabetes is a chronic disease in which blood sugar levels reach abnormal values in humans. Early diagnosis of diabetes is important in terms of preventing larger diseases that this disease may cause and realizing the necessary treatment planning in a timely manner. Within the scope of this study, diabetes was diagnosed with various models and the most suitable model that could be used for this problem was tried to be determined. In this study, Logistic Regression, k-Nearest Neighborhood, CART (Classification and Regression Tree), Random Forest, Support Vector Machine, XGBoost and LightGBM classifier models were used. Performance metrics were obtained using the 10-fold cross-validation method. The accuracy rates of the models were obtained as 84.58%, 84.59%, 85.02%, 88.29%, 84.73%, 89.29% and 88.72%, respectively. The best parameters were determined by performing hyper-parameter tuning in Random Forest, XGBoost and LightGBM methods, which gave the three best accuracy rates among the models. With these parameters, the accuracy rates of the final models were 89.30%, 90.01% and 90.01%, respectively. As a result, it has been observed that XGBoost and LightGBM models can be used as final diagnostic models.

Keywords: Diabetes mellitus, Diagnosis, Classification, machine learning, Ensemble learning

mortalite oranı yüksek kronik metabolik hastalıklardan biridir [3].

2021 yılı itibari ile dünyada 537 milyon şeker hastası olduğu ve sadece 2021 yılında 6.7 milyon kişinin şeker hastalığı sebebi ile hayatını kaybettiği bilinmektedir [1]. Bu sebep ile şeker hastalığının erken teşhis edilmesi, şeker hastalığının sebep olabileceği komplikasyonların önüne geçilebilmesi ve şeker hastalığına bağlı gelişen komplikasyonlar sebebi ile oluşabilecek organ kaybı ya da insan ölümlerinin engellenebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Şeker hastalığının teşhisi insan sağlığı uzmanları tarafından elle yapılan muayeneler sonucunda ya da hastalardan alınan kan numunelerinin laboratuvar ortamında tıbbi bir cihaz yardımıyla incelenmesi sonunda yapılabilir. Fakat şeker hastalığı çok fazla belirti göstermeden ilerleyen bir hastalık olması sebebi ile alanında uzman olan doktorlar tarafından bile net olarak teşhis edilemez [4].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kaplan.kaplan@kocaeli.edu.tr (K. Kaplan)
Geliş / Received: 14.08.2022 Kabul / Accepted: 19.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1161768

Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesiyle birlikte dünya nüfusunu büyük oranda etkileyen bu gibi hastalıkların erken teşhis edilebilmesi için çoğu araştırmacı insan sağlığı uzmanlarının teşhis süresini en aza indirmek ve teşhislerin doğruluk oranını arttırmak amacıyla makine öğrenmesi, yapay zekâ ve derin öğrenme alanlarında çalışmalar yürütmektedir.

Bugüne kadar gerçekleştirilen ve aynı veri kümesinin kullanıldığı çalışmalarda veri kümesinde bulunan eksikliklerin göz ardı edilmesi ve aykırı değerlerin incelenmemesi model performanslarında önemli derecede azalmaya neden olmuştur. Aynı zamanda hesaplanan özniteliklerin karakteristik ve tanımlayıcı olmaması ve hiper parametre ayarlamasının deneme yanılma ile yapılması, diğer çalışmaların performanslarını sınırlandırmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalara kıyasla yapılmış olan bu çalışmanın keşifsel veri analizi aşamasında kullanılan yöntemlerin çeşitliliği sayesinde veri kümesindeki dengesizlikler belirlenerek veri kümesinde yer alan eksik ve aykırı değer sorunları çözülerek veri kümesi sınıflandırma modelleri için daha uygun bir hale getirildi. Ardından “Glucose”, “BMI” ve “İnsulin” özelliklerinden yeni özelliklerin oluşturulması ile kullanılan sınıflandırma modellerinde özelliklerin modellerdeki özellik önem düzeylerini de belirlememize katkı sağladı. Bu sayede final modellerinin hepsi için sınıflandırmadaki en önemli özelliğin “İnsulin” olduğu belirlendi. Bu çalışma kapsamında veri kümesi üzerinde dışarıda tutma ve 10 katlı çapraz doğrulama yöntemleri ayrı ayrı kullanıldı ve en iyi doğruluk veren yöntemin 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi olduğu belirlendi. Final modellerinin oluşturulması belirlenen bu yöntem üzerinden gerçekleştirildi.

Gerçekleştirilen bu çalışmada ise Kaggle platformunda yer alan ve literatürde; “Pima Indians Diabetes” ismi ile bilinen açık kaynak veri kümesi kullanılarak şeker hastalığının analizi, belirlenmesi ve sınıflandırılmasına yönelik makine öğrenmesi sınıflandırma modelleri kullanılarak kullanılan modellerin performanslarının karşılaştırılması ve özellik önem düzeylerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. En iyi doğruluk veren modellerde hiper parametre ayarlaması gerçekleştirilerek teşhis aşamasında kullanılabilecek final modeller belirlenmiştir.

Bu çalışmanın 2. bölümünde literatürde yer alan çalışmalara değinilerek bir literatür özeti verilmiştir. 3. bölümde çalışma kapsamında kullanılan yaklaşımlardan, veri kümesinden ve veri kümesinin uygulanacak olan modellere uygun hale getirilmesi aşamasına kadar yapılan işlemlerden bahsedilmiştir. 4. bölümde ise çalışmanın deneysel sonuçlarına değinilmiştir. Son olarak ise 5. bölümde çalışmanın sonuçları verilerek çalışma sonlandırılmıştır.

2 Literatür taraması

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte birçok alanda teknolojik yenilikler gerçekleşmiştir ve bu yenilikler gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde teknolojik yeniliklerin en önemli kullanım alanlarından bir tanesi de sağlık alanıdır. Sağlık alanındaki verimliliğin artırılması, tedavi planlamasının zamanında gerçekleştirilmesi, doğru ve

hızlı bir şekilde hastalık teşhislerinin yapılabilmesi için yapay zekâ teknolojileri sıkça tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır [5-6]. Literatürde yer alan çalışmalarda incelendiğinde sağlık alanında hastalıkların teşhis edilmesi, sınıflandırılması ve hastalıklara bağlı ölüm risk oranlarının tahmin edilmesi üzerine birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde şeker hastalığı tahmin veya teşhisi için yapılmış birçok çalışmanın var olduğu ve farklı veri kümelerinin kullanıldığı görülmektedir. Veranyurt ve ark. gerçekleştirdikleri çalışmada birçok hastalığın oluşumuna sebep olması ve görülme sıklığının giderek artması sebebi ile şeker hastalığı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında hastalığın erken teşhis edilebilmesinde büyük öneme sahip değişkenlerin olduğu açık kaynak bir veri kümesini seçerek bu veri kümesi üzerinde Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu ve Adaboost modellerini kullanarak şeker hastalığını sırasıyla %92.30, %92.3 ve %90.59 başarı oranları ile tespit etmişlerdir [7]. Özkan ve ark. [8] çalışmalarında şeker hastalığı tanısının konulmasında veri kümesinde yer alan hangi değişkenin daha önemli olduğunu belirlemek için sınıflandırma modellerini iki farklı yaklaşım üzerine kurmuşlardır. Ayrıca kullandıkları veri kümesini bir devlet hastanesinden 18 yaşından büyük hastalardan topladıkları veriler ile elde etmişlerdir. Çalışmalarında göze çarpan bir diğer detay ise veri kümelerinde yer alan verilerin sadece şeker hastası olan ve şeker hastası olmayan hastalardan oluşturmaktan ziyade şeker hastası olan, gizli şeker hastalığı (prediyabet) olan, şeker hastalığı olmayan ve gizli şeker hastalığı olmayan hastalardan elde ederek gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları veri kümesinde yedisi kategorik olmak üzere 39 bağımsız değişken yer almaktadır [8]. Yaptıkları bu çalışmada şeker hastalığının tahmini için denetimli öğrenme tekniklerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda en iyi performansa sahip algoritmanın Rastgele Orman algoritması olduğunu ve modelin doğruluğunun %84,48 olduğu belirtmişlerdir [8]. Açık kaynak veri kümelerinden bir başkasının kullanıldığı Akyol ve ark. [4] şeker hastalığının erken tanısı gerçekleştirmek için yaptıkları bu çalışmada şeker hastalığının belirtileri olan polüüri, polidipsi ve polifaji gibi özniteliklerin olduğu bir veri kümesini kullanmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada Topluluk Oylama, Gradyan Artırma, Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu ve Derin Sinir Ağı modellerini kullanmışlardır. Beş katlı çapraz doğrulama yöntemi sonucunda modellerin doğruluk oranlarını sırası ile %97.31, %95.38, %96.54, %85.58 ve %95.19 olarak bulduklarını belirtmişlerdir [4]. Fakat çalışmada veri kümesinde yer alan özniteliklerden hangisinin ya da hangilerinin önemli olduğuna değinilmediğini ilerleyen çalışmalarında bunun tespiti ve sınıflandırma modellerinin optimizasyonu üzerine çalışmayı hedeflediklerini belirtmişlerdir [4]. Şeker hastalığının erken dönemde teşhis edilebilmesi için yapılan farklı bir çalışmada ise açık kaynak bir veri kümesi kullanılmıştır. Kullanılan veri kümesi şeker hastalığı semptomlarını gösteren şeker hastası tanısı konmuş ve şeker hastalığı tanısı konulmamış ama şeker hastalığı semptomlarını gösteren bireylerden doğrudan yapılan bir anket çalışması ile oluşturulmuştur [9].

Bu çalışmada üç, beş ve 10 katlı çapraz doğrulama yöntemleri kullanılmıştır. 10 katlı çapraz doğrulama sonucunda K-En Yakın Komşu modeli %99.81 doğruluk oranı vermiştir. Ayrıca çalışma kapsamında veri kümesinde yer alan şeker hastalığı semptomlarının yer aldığı küçük bir anket tarzı bilgisayar arayüzü hazırlanarak şeker hastalığının ön tahminin yapılması gerçekleştirilmiştir [9].

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde şeker hastalığının makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak birçok sınıflandırma modeli önerildiği görülmektedir. Şeker hastalığının sınıflandırılması için kullanılan en yaygın açık veri kümelerinden bir tanesi "Pima Indians Diabetes" (PID) isimli veri kümesidir. Bu veri kümesinin dahil edildiği çalışmalardan birisini Tigga ve ark. gerçekleştirmiştir [10]. Çalışmalarında kullandıkları diğer bir veri kümesini 18 yaş üstü 952 katılımcıdan topladıkları veriler ile oluşturmuşlardır [10]. Çalışmalarında kullanılan makine öğrenmesi algoritmaları Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi, Naive Bayes, Karar Ağacı ve Rastgele Orman algoritmalarıdır. Bu sınıflandırma algoritmaları sırası PID veri kümesi üzerinde %74.4, %70.8, %74.4, %68.9, %69.7 ve %75 doğruluk değerlerini vermiştir. 10 katlı çapraz doğrulama sonuçları ise sırasıyla %77, %74.2, %77, %75.6, %74.9 ve %77.4 şeklindedir [10]. Çalışmalarında kullanmak üzere kendilerinin oluşturdukları daha kapsamlı olan veri kümesinde ise aynı modeller üzerindeki sonuçlar PID veri kümesinin sonuçlarına kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir [10]. Bu sonuçta göstermektedir ki kullanılan veri kümesinin içeriği ne kadar kapsamlı olursa modeller o kadar iyi sonuç vermektedir. Bir diğer çalışmada ise [11] makine öğrenmesi sınıflandırma algoritmaları kullanılarak yapılan şeker hastalığı tahmini çalışmasında yine aynı veri kümesi kullanılmıştır ve modellemelerden önce iki yeni özellik çıkarımı yapılmıştır. Bunun sonucunda kan basıncı değeri 80'in üzerinde ve glikoz seviyesi 105'in üzerinde olan herkes şeker hastası olarak tanımlanmıştır [11]. Yapılan çalışmada Rastgele Orman, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi, Karar Ağacı ve YSA (Yapay Sinir Ağı) algoritmaları ile tahmin modelleri oluşturulmuştur. Bu algoritmalar sonucunda %88.31, %81, %77, %84 ve %86 doğruluk oranları elde edilmiştir [11]. Aynı veri kümesinin kullanıldığı diğer bir çalışma da Chang ve ark. makine öğrenmesi algoritmalarına dayalı şeker hastalığı sınıflandırma çalışmasında J.48, Naive Bayes ve Rastgele Orman algoritmalarını kullanmışlardır [12]. Yapılan bu çalışmada araştırmacılar özellik seçiminin sınıflandırma modelleri üzerindeki etkisini incelemek için modelleri özellik seçimi olmadan, üç faktörlü ve beş faktörlü özellik seçimine bağlı olarak gösterdikleri sonuçları incelemişlerdir [12]. Çalışmada kullanılan algoritmalar arasında Rastgele Orman algoritmasının özellik seçimine tabi tutulmadığı durumda %79.57 doğruluk oranı ile diğer iki algoritmadan ve özellik seçimlerine tabi tutulan modellerden daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [12]. Joshi ve ark. yaptığı PID veri kümesinin kullanıldığı diğer bir çalışmada ise [13] WEKA yazılım aracı kullanılarak şeker hastalığının sınıflandırılmasında kullanılan farklı yöntemlerin performans analizinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Bayesnet, Naive Bayes,

J48, Rastgele Orman, Rastgele Ağaç, REP Ağacı, CART (Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı) ve K-En Yakın Komşu algoritmalarını kullanmışlardır. Bu algoritmaların sırasıyla şeker hastalığını doğru sınıflandırma oranlarının %78.25, %76.30, %84.11, %98.43, %100, %83.07, %77.21 ve %100 gözlemlenmiştir [13]. Aynı veri kümesi kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada da Harman [14] Destek Vektör Makinesi ve Naive Bayes algoritmaları kullanılarak şeker hastalığı sınıflandırması yapmıştır. Yapılan çalışmada Harman veri kümesindeki dengesiz sınıf problemini çözmek için SMOTE tekniğini kullanmıştır [14]. Çalışma sonucunda Destek Vektör Makinesi %90 doğruluk, Naive Bayes algoritması ise %77 doğruluk oranı vermiştir [14]. Aynı veri kümesinin kullanıldığı farklı bir çalışmada Gua ve ark. şeker hastalığının tahmini için yalnızca Bayes ağlarını kullanmışlardır [15]. Çalışmanın sonucunda Naive Bayes ağı %71.5 doğruluk oranı verirken önermiş oldukları "Byes Network" isimli metot ile %72.3 doğruluk oranı elde etmişlerdir [15]. Farklı bir çalışmada ise şeker hastalığının tahmini için Er ve ark. ESA (Evrışimli Sinir Ağı) ve LSTM (Uzun/Kısa Süreli Bellek) modellerini kullanmışlardır [16]. Araştırmacılar veri kümesi üzerinde iki deney yapmışlardır. İlk deneyde veri kümesinin %70 eğitim, %30 test verisi olarak bölmüşlerdir. İlk deneyin sonucunda ESA modelinde %82.47 doğruluk LSTM modelinde %83.77 doğruluk elde etmişlerdir. İkinci deneylerinde ise veri kümesini %80 eğitim, %20 test verisi olacak şekilde bölmüşlerdir ve bu deney sonucunda ESA modelinde %83.25 doğruluk LSTM modelinde ise %85.21 doğruluk elde etmişlerdir [16]. Aynı zamanda önermiş oldukları ESA+LSTM hibrit modeli veri kümesinin %70 eğitim, %30 test verisi olarak ayrıldığı deneyde %85.21 doğruluk oranı %80 eğitim, %20 test verisi olarak ayrıldığı deneyse ise %86.45 doğruluk oranı vermiştir [16]. PID veri kümesinin çalışmaya dâhil edildiği bir diğer çalışmada ise XGBoost ve Karar Ağacı tabanlı algoritmalar kullanılmıştır [17]. Yapılan bu çalışmada Türkiye'de on yıllık çalışma sonucunda oluşturulan bir şeker hastalığı veri kümesi de kullanılmıştır [17]. Karar Ağacı, Rastgele Orman, Gradient Boosting ve XGBoost algoritmalarının kullanıldığı bu çalışmada PID veri kümesine uygulanan algoritmalar daha yüksek doğruluk oranı vermiştir. Kullanılan algoritmaların PID veri kümesi üzerinde göstermiş oldukları doğruluk oranları sırasıyla %75.82, %81.05, %81.70 ve %82.35 şeklindedir [17]. Aynı veri kümesinin kullanıldığı farklı bir çalışma da ise Karegowda ve ark. alışılmışın dışında veri kümesini %60 eğitim ve %40 test verisi olacak şekilde bölerek kullanmışlardır. Yapılan bu çalışmada şeker hastalığının kural tabanlı sınıflandırılmasında K Ortalama Kümeleme ve Karar Ağacı C4.5 algoritmalarını kullanmışlardır [18]. Yapılan çalışmanın sonucunda bu iki algoritmanın oluşturduğu hibrit modeli kullanılmışlardır ve önerilen bu model %93.33 doğruluk oranı vermiştir [18]. PID veri kümesinin çalışmanın bir kısmında ele alındığı bir diğer çalışmada Maniruzzaman ve ark. şeker hastalığının sınıflandırılması için karşılaştırılmalı yaklaşımlar önermişlerdir [19]. Önerdikleri bu yaklaşımlardan birisi olan Gauss süreci (Gaussian Process) tabanlı model PID veri kümesi üzerinde %81.97 doğruluk oranı vermiştir [19]. Deperlioglu ve ark. yaptığı bir çalışma ise aynı veri kümesi

üzerinde derin sinir ağları tabanlı Oto Kodlayıcı Sinir Ağları (OKSA) kullanılmıştır [20]. Kullandıkları bu OKSA modeli ile %97.30 doğruluk oranı elde edilmiştir [20]. Çalışmalarında OKSA modelini tercih etmelerinin nedeni ise herhangi bir optimizasyon işlemi yapmadan sınıflandırma işleminin başarısının artırılabilceğini göstermektir [20]. Karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada Cihan ve ark. Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, Destek Vektör Makinesi, Gauss Naive Bayes, Karar Ağacı, Rastgele Orman ve Yapay Sinir Ağı modellerini kullanmışlardır [21]. 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile modellerin değerlendirilmesi sonucunda Lojistik Regresyon modelinin diğer modeller arasındaki en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Modelin performans ölçütleri olarak kesinlik, duyarlılık, ROC ve PRC değerleri ölçülmüştür. Bu değerler sırası ile 0.76, 0.77, 0.83 ve 0.83 şeklindedir [21]. Aynı veri kümesinin kullanıldığı farklı bir çalışmada ise [22] Kumar ve ark. sınıflandırma tahmini için Derin Sinir Ağı (DNN) sınıflandırıcısı kullanmıştır. Kullanılan modelin, %98.16 doğruluk oranı ile literatürde yer alan çalışmalara göre daha iyi sonuç verdiğini fakat hesaplama süresinin çalışmanın ana sınırlanması olduğunu bundan dolayı ilerleyen çalışmalarda hesaplama süresi için optimizasyon çalışmaları ile hesaplama süresinin iyileştirilebilmesi üzerine çalışmalar yapılmasının çalışmayı daha etkin bir hale getireceğini belirtmişlerdir [22]. PID veri kümesinin kullanıldığı son çalışmalardan birisini Yıldırım ve ark. gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada [23] Apache Spark teknolojilerinden faydalanarak Yapay Sinir Ağları, Destek Vektör Makinesi, Lojistik Regresyon, Rastgele Orman ve Naive Bayes sınıflandırma algoritmalarını kullanmışlardır. Kullandıkları sınıflandırma modellerini literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak kesinlik, duyarlılık, negatif tahmin değeri, f ölçüsü, doğruluk, özgünlük ve hata oranı olmak üzere yedi farklı ölçüm değeri üzerinden değerlendirmişlerdir [23]. Kullandıkları sınıflandırma modelleri arasında en yüksek ortalama doğruluk oranını veren model %85.04 ile Rastgele Orman modeliyken en düşük ortama doğruluk oranını veren sınıflandırma modeli ise %75.87 doğruluk oranı ile Naive Bayes modeli olmuştur [23].

3 Materyal ve metod

Bu bölümde ise çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan yaklaşımlardan ve kullanılan veri kümesinden bahsedilecektir. Çalışma esnasında “Pima Indians Diabetes” veri kümesi hakkında detaylı bilgi sahibi olabilmek amacıyla eksik değer analizi, eşsiz değer analizi, sayısal özellik analizi, box plot analizi, swarm plot analizi, cat plot analizi ve korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Veri analizi sonrasında veri kümesinin tahmin modelleri için hazır hale getirilmesi amacıyla eksik değerler ortalama değer ile değiştirilmiş, aykırı değerler veri kümesinden çıkarılmış ve var olan örneklerden özellik çıkarımı yapılmıştır. One Hot Encoding işlemi ile kategorik veriler sayısal hale dönüştürülmüştür. Son olarak ise veriler üzerinde standardizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlem adımlarını takiben sınıflandırma aşamasına geçilmiştir. Modelleme esnasında dışarıda tutma (Hold-Out , %80 eğitim - %20 test) ve 10 katlı çapraz doğrulama yöntemleri kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, CART (Sınıflandırma ve Regresyon Karar Ağacı), Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman, XGBoost ve LightGBM modelleri kullanılmıştır.

3.1 Veri kümesi

Gerçekleştirilen çalışma kapsamında kullanılan veri kümesi Kaggle platformunda açık kaynak olarak yer almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Sağlık Enstitülerinin bir parçası olan Ulusal Diyabet Sindirim ve Böbrek Enstitüsü’nden (NIDDK) elde edilen bu veriler 21 yaş ve üstü kadınlardan toplanmıştır [24]. Veri kümesinde 768 hasta kadına ait veriler yer almaktadır. **Tablo 1** veri kümesinde yer alan sekiz adet özellik ve bir adet hedef değişkeni göstermektedir.

Tablo 1. Veri kümesinde yer alan özellikler, açıklamaları ve değer aralıkları

Özellikler	Açıklama	Değer Aralığı
Pregnancies (Gebelik)	Habile kalma Sayısı	0-17 arası
Glucose (Glukoz)	Kan glukoz değeri (2 saatlik şeker yüklem testi)	0-199 arası
Blood Pressure (Kan Basıncı)	Kan Basıncı	0-122 (mm/Hg) arası
Skin Thickness (Cilt Kalınlığı)	Deri Kalınlığı	0-99 (mm) arası
Insulin (İnsülin)	2 saatlik kan insülin serum değeri	0-846 (mu U/ml) arası
BMI (Vücut Kitle İndeksi)	Vücut Kitle İndeksi	(kg ve m2)
Diabetes Pedigree Function (Diyabet Soyağacı Fonksiyonu)	Kişinin şeker hastalığına genetik olarak yatkınlık durumu	0.078-2.42 arası
Age (Yaş)	Kişinin yaşı	21-81 yıl arası
Outcome (Çıktı)	Hedef Değişken	0 veya 1

3.2 Veri kümesi analizi

Veri kümesi hakkında daha detaylı bilgi sahibi olabilmek amacıyla kayıp değer analizi, eşsiz değer analizi, sayısal özellik analizi, box plot analizi, swarm plot analizi, cat plot analizi ve korelasyon analizi gibi analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda veri kümesinde eksik değer olmadığı fakat bazı özelliklerin değerlerinde sorunların olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin “Insulin” özelliğinde değerlerin çoğunun sıfır (0) olduğu görülmüştür. Fakat veri kümesinde “Pregnancies” ve “Outcome” özellikleri dışında yer alan özelliklerin sıfır (0) değerini alması mümkün olmayacağından dolayı bu durum kullanılan veri kümesinde eksik değerlerin olduğunu ve bu

eksik değerlerin giderilmesi amacıyla eksik değerler yerine sıfır (0) değerlerinin girildiği belirlenmiştir. Ayrıca box plot analizi ve swarm plot analizi sonrasında veri kümesinde aykırı değerler olduğu belirlenmiştir. Bu durumun giderilmesi için veri kümesinde “Pregnancies” ve “Outcome” özellikleri dışında yer alan özelliklerdeki sıfır (0) değerleri Outcome sınıf değişkenine göre ortalama değer ile değiştirilmiştir.

3.3 Veri kümesini hazırlama

Veri analizi bölümünde bahsedilen analiz yöntemleri sonrasında analiz sırasında fark edilen problemlerin giderilmesi ve veri kümesinin makine öğrenmesi modellerinin uygulanması için uygun hale getirilmesi bu aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Eksik değerlerin ortalama değer ile değiştirilmesi

Veri kümesinde yer alan eksik değerlerin giderilmesi için veri kümesindeki “Pregnancies” ve “Outcome” özellikleri dışında yer alan tüm özelliklerdeki sıfır (0) değerleri Outcome sınıf değişkeni kırılımına göre ortalama değer ile değiştirilmiştir.

3.3.2 Aykırı değerlerin çıkarılması

Box plot analizi ve swarm plot analizinde veri kümesinde bazı aykırı değerler olduğu görüldüğü için veri kümesindeki alt sınır ve üst sınır değer dışında yer alan aykırı değerler veri kümesinden çıkarılarak veri kümesi (768,9) boyutundan (701,9) boyutuna getirildi.

3.3.3 Özellik çıkarımı

Son olarak ise var olan “Glucose”, “BMI” ve “Insulin” özelliklerinden özellik çıkarımı yapılarak yeni özellikler oluşturuldu. Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’te oluşturulan yeni özellikler ve değer aralıkları yer almaktadır.

Tablo 2. Glucose özelliğinden çıkarılan özellikler

Glukoz
Glukoz değeri 70’ e eşit veya 70’den küçük ise “Low”
Glukoz değeri 70’den büyük, 99’a eşit veya 99’dan küçük ise “Normal”
Glukoz değeri 99’dan büyük, 126’ya eşit veya 126’dan küçük ise “Secret”
Glukoz değeri 126’dan büyük ise “High”

Tablo 3. Insulin özelliğinden çıkarılan özellikler

Insulin
İnsülin değeri 16’ya eşit veya büyükse ve 166’ya eşit ve küçük ise küçük “Normal”
İnsülin değeri 166’dan büyük ise “Abnormal”

Tablo 4. BMI özelliğinden çıkarılan özellikler

BMI
Vücut kütle indeksi 18.5’ten küçük ise “Underweigh”
Vücut kütle indeksi 18.5’ten büyük ve 24.9’a eşit veya küçük ise “Normal”
Vücut kütle indeksi 24.9’dan büyük ve 29.9’a eşit veya küçük ise “Overweight”
Vücut kütle indeksi 29.9’dan büyük ve 34.9’a eşit veya küçük ise “Obesity 1”
Vücut kütle indeksi 34.9’dan büyük ve 39.9’a eşit veya küçük ise “Obesity 2”
Vücut kütle indeksi 39.9’dan büyük ise “Obesity 3”

3.3.4. One hot encoding yöntemi

Oluşturulan bu özellikler arasındaki kategorik değişkenler One-Hot-Encoding yöntemi ile sayısal değerler haline getirilmiştir.

3.3.5. Standardizasyon

Şeker hastalığının analiz edilmesi için oluşturulacak olan tahmin modellerinden önce verilere standardizasyon işlemi uygulanarak, veriler sıfır (0) ortalamalı ve bir (1) standart sapmalı hale dönüştürülmüştür.

4. Deneysel sonuçlar

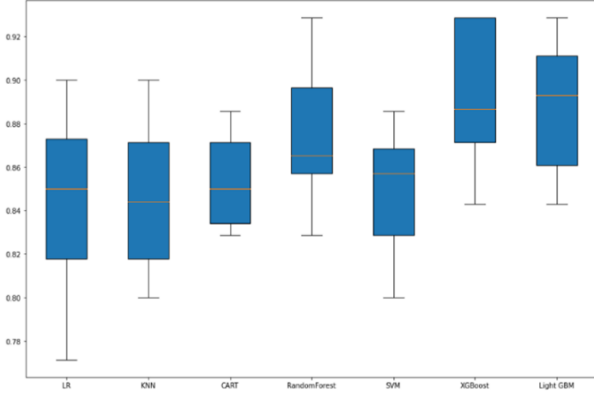
Bu çalışma kapsamında veri kümesi %80 eğitim ve %20 test veri kümesi şeklinde bölünerek modellerde iki farklı yöntem ile doğruluk skor değerleri incelenmiştir. Kullanılan tahmin modellerin, dışarıda tutma yöntemi ve 10 katlı çapraz doğrulama sonucunda oluşan doğruluk değerleri Tablo 5’deki gibidir.

Tablo 5. Veri kümesinde yer alan özellikler, açıklamaları ve değer aralıkları

Modeller	Dışarıda Tutma Yöntemi Doğruluk Oranları	10 Katlı Çapraz Doğrulama Doğruluk Oranları
Lojistik Regresyon (LR)	% 84.39	% 84.58
K En Yakın Komşu (KNN)	% 82.97	% 84.59
Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı (CART)	% 80.14	% 85.02
Rastgele Orman (RF)	% 82.97	% 88.29
Destek Vektör Makinesi (SVM)	% 79.43	% 84.73
XGBoost	% 83.68	% 89.29
LightGBM	% 85.10	% 88.72

10 katlı çapraz doğrulama sonucunda elde edilen doğruluk oranları dikkate alındığında en iyi doğruluk oranını veren modellerin Rastgele Orman, XGBoost ve LightGBM modelleri olduğu görülmüştür. Bu sebep ile bu çalışma kapsamında bu üç modelin performansını artırmaya yönelik Hiper-parametre ayarlaması Python Sklearn kütüphanesi GridSearchCV yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. **Tablo 6**, **Tablo 7** ve **Tablo 8**'de final modeli oluşturulacak modeller için ayarlanan parametreler ve parametre değerleri yer almaktadır.

ALGORİTMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 1. 10 Katlı çapraz doğrulama sonucunda modellerin karşılaştırılması

Tablo 6. Rastgele orman modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

Parametreler	Değerler
n_estimators	100, 200, 500, 1000
max_features	3, 5, 7
n_samples_split	2, 5, 10, 30
max_depth	3, 5, 8, None

Tablo 7. XGBoost modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

Parametreler	Değerler
learning_rate	0.01, 0.1, 0.2, 1
min_samples_split	0.1, 0.5, 3
max_depth	3, 5, 8
subsample	0.5, 0.9, 1.0
n_estimators	100, 500

Tablo 8. LightGBM modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

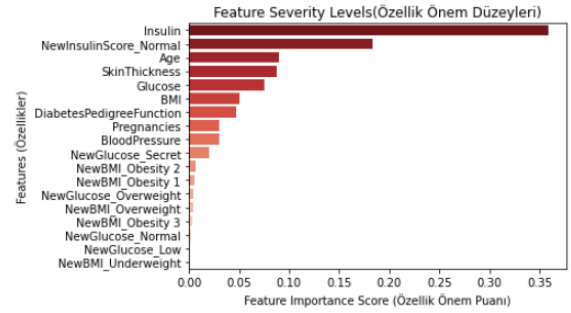
Parametreler	Değerler
learning_rate	0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.5
n_estimators	500, 1000, 1500
max_depth	3, 5, 8

GridSearchCV yönteminin 10 katlı çapraz doğrulama sonrasında final modelleri için elde edilen en iyi parametreleri **Tablo 9**, **Tablo 10** ve **Tablo 11**'de

gösterilmiştir. **Şekil 2**, **Şekil 3** ve **Şekil 4**' de ise final modellerinin özellik önem düzeyleri gösterilmiştir.

Tablo 9. Rastgele orman modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

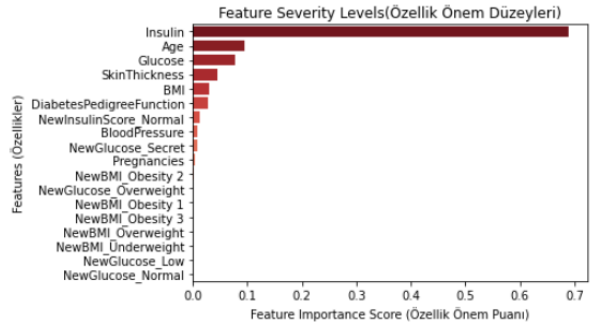
Parametreler	Değerler
n_estimators	100
max_features	7
min_samples_split	2
max_depth	8



Şekil 2. Rastgele Orman modeli özellik önem düzeyi

Tablo 10. XGBoost modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

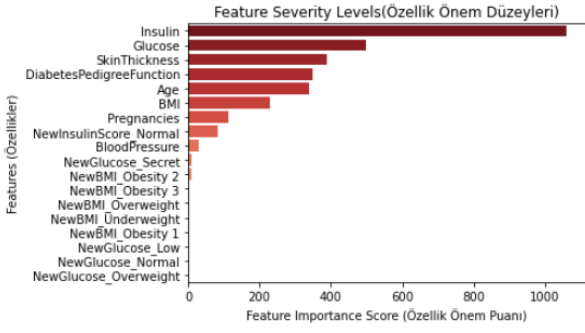
Parametreler	Değerler
learning_rate	0.01
min_samples_split	0.1
max_depth	5
subsample	1.0
n_estimators	500



Şekil 3. XGBoost modeli özellik önem düzeyi

Tablo 11. LightGBM modeli için GridSearchCV ile bulunan en iyi parametreler

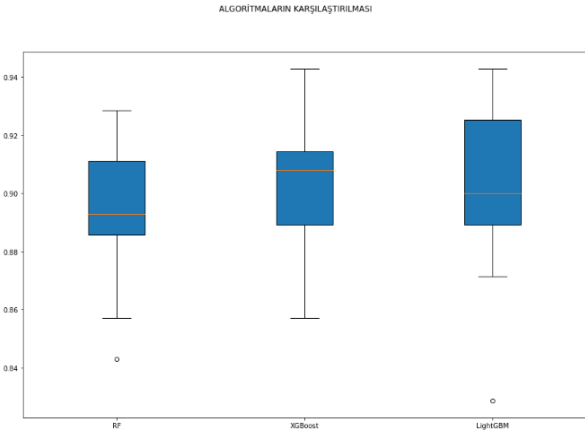
Parametreler	Değerler
learning_rate	0.01
n_estimators	500
max_depth	3



Şekil 4. LightGBM modeli özellik önem düzeyi

Tablo 12. Final modelleri ve doğruluk oranları

Modeller	Doğruluk
Rastgele Orman	% 89.30
XGBoost	% 90.01
LightGBM	% 90.01



Şekil 5. Final modellerinin karşılaştırılması

5 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında şeker hastalığının doğru teşhisinde kullanılmak üzere en uygun model belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla açık kaynak veri kümesi olan “Pima Indians Diabetes” isimli veri kümesi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ilk önce kayıp değer analizi, eşsiz değer analizi, sayısal özellik analizi, box plot analizi, swarm plot analizi, cat plot analizi ve korelasyon analizi gibi analiz yöntemleri ile analizler gerçekleştirilerek veri kümesi incelenmiştir. Veri kümesinde eksik değer olmadığı fakat bazı özelliklerin değerlerinde sorunların olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda aykırı değerlerin çıkarılarak veri kümesi daha temiz hale dönüştürülmüştür. Analizler tamamlandıktan sonra var olan “Glucose”, “BMI” ve “Insulin” isimli özelliklerinden özellik çıkarımı yapılarak yeni özellikler oluşturulmuştur. Elde edilen öznelik değerleri “one hot encoding” işlemi ile sayısal işleme çevrilmiş ve veri kümesi analiz ve iyileştirme işlemleri tamamlanmıştır. Son olarak sınıflandırma aşamasında Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu, CART (Sınıflandırma ve Regresyon Ağacı), Rastgele Orman, Destek Vektör Makinesi, XGBoost ve LightGBM

sınıflandırıcı modelleri kullanılmıştır. Kullanılan bu modeller 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi ile test edilmiş ve performans ölçütleri hesaplanmıştır. Modeller arasında en iyi üç doğruluk oranını veren Rastgele Orman, XGBoost ve LightGBM modellerinde hiperparametre ayarlaması yapılarak elde edilen parametreler ile final modelleri belirlenmiştir. Final modellerinin doğruluk oranları sırasıyla %89.30, %90.01 ve %90.01 olarak gözlemlenmiştir. XGBoost ve LightGBM modellerinin umut vaat eden sonuçlar verdiği gözlemlenmiş ve final modelleri olarak kullanılabileceği önerilmiştir.

Çalışmamız diğer çalışmalar ile kıyaslandığında daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenebilmektedir. Aynı veri kümesinin kullanıldığı çalışmalarda elde edilen sonuçların farklı olması, veri kümesinde yer alan verilerden eksik olanların giderilmesi, aykırı olan verilerin ne kadarının veri kümesinden çıkarıldığına veya veri kümesinde yer alan özelliklerden yeni özelliklerin oluşturulmasına bağlı olan ya da modellerin hiper parametre ayarlarının yapılmasındaki oluşturduğu farklar olarak değerlendirilebilir.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada literatür de yer alan çalışmalardan farklı olarak eksik değerlerin sınıf çıktı değişkeninin ortalaması ile değiştirilmesi sonucunda modellerin performansının büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda box plot analizi ve swarm plot analizinde görülen bazı aykırı değerler veri kümesinden çıkarılarak veri kümesinin daha temiz veri kümesi olmasına katkı sağlamıştır.

Gelecek çalışmalarda bu çalışma kapsamında kullanılan veri kümesindeki eksik değer sorununun giderilmesi için yeni yaklaşımlar geliştirilerek sınıflandırma modellerinin performansının artırılması planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] B. Ö. Başer, M. Yangın, ve E. S. Sarıdaş, Makine öğrenmesi teknikleriyle diyabet hastalığının sınıflandırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 25(1), 112–120, 2021. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.842460>.
- [2] Diabetes mellitus ve komplikasyonlarının tanı, tedavi ve izlem kılavuzu, https://file.temd.org.tr/Uploads/publications/guides/documents/diabetes-mellitus_2022.pdf, Accessed 09 May, 2022.
- [3] N. Eroğlu, Diabetes Mellitus’un komplikasyonları. İzmir Demokrasi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi, 1(2), 6-12, 2018.
- [4] K. Akyol ve A. Karacı, Diyabet hastalığının erken aşamada tahmin edilmesi için makine öğrenme algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(6), 123–134, 2021, <https://doi.org/10.1016/10.29130/dubited.1014508>.
- [5] F. Al-Areqi and M. Z. Konyar, Effectiveness evaluation of different feature extraction methods for classification of Covid-19 from computed tomography



- images: A high accuracy classification study. Biomedical Signal Processing and Control, 76, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103662>.
- [6] F. Al-Areqi and M. Z. Konyar, transfer öğrenme mimarileri kullanılarak bilgisayarlı tomografi görüntülerinden Covid-19'un yüksek doğrulukla sınıflandırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13(3), 457-466, 2022, <https://doi.org/10.24012/dumf.1129870>.
- [7] Ü. Veranyurt, A. F. Deveci, ve M. F. Esen, Makine öğrenmesi teknikleriyle hastalık sınıflandırması: Random Forest, K-Nearest Neighbour ve Adaboost algoritmaları uygulaması. Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Araştırmaları Dergisi, 6(2), 275-286, 2020.
- [8] Y. Özkan, B. S. Yürekli, ve A. Suner, Diyabet tanısının tahminlenmesinde denetimli makine öğrenme algoritmalarının performans karşılaştırması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(1), 211-226, 2021, <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.820882>.
- [9] G. Bilgin, Makine öğrenmesi algoritmaları kullanarak erken dönemde diyabet hastalığı riskinin araştırılması. Zeki Sistemler Teori ve Uygulamaları Dergisi, 4(1), 55-64, 2021, <https://doi.org/10.38016/jista.877292>.
- [10] N. P. Tigga and S. Garg, Prediction of type 2 diabetes using machine learning classification methods. Procedia Computer Science., 167, 706-716, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.336>.
- [11] S. Nahzat ve M. Yağanoğlu, Diabetes prediction using machine learning classification algorithms. European Journal of Science and Technology, 24, 53-59, 2021, <https://doi.org/10.31590/ejosat.899716>.
- [12] V. Chang, J. Bailey, Qianwen, A. Xu, and Z. Sun, Pima Indians diabetes mellitus classification based on machine learning (ML) algorithms, <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07049-z>.
- [13] S. Joshi and S. R. P. Shetty, Performance analysis of different classification methods in data mining for diabetes dataset using WEKA tool. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, 3(3), 1168-1173, 2015, <https://doi.org/10.17762/ijritcc2321-8169.150361>.
- [14] G. Harman, Prediction of Diabetes Mellitus by using SVM and Naive Bayes classification algorithms. European Journal of Science and Technology, 32, 7-13, 2021, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1041186>.
- [15] Y. Guo, G. Bai, and Y. Hu, Using Bayes Network for prediction of type-2 diabetes. International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST 2012), pp. 471-476, London, England, 2012.
- [16] M. B. ER ve İ. Işık, LSTM tabanlı derin ağlar kullanılarak diyabet hastalığı tahmini. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 10(1), 68-74, 2021, <https://doi.org/10.46810/tdfd.818528>.
- [17] G. Yangın, XGboost ve Karar Ağacı tabanlı algoritmaların diyabet veri setleri üzerine uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [18] A. G. Karegowda, V. Punya., M. A. Jayaram, and A. S. Manjunath, Rule based classification for diabetic patients using Cascaded K-Means and Decision Tree C4 . 5. International Journal of Computer Applications, 45(12), 45-50, 2012, <https://doi.org/10.5120/6836-9460>.
- [19] M. Maniruzzaman, N. Kumar, M. M. Abedin, M. S. Islam, H. S. Suri, A.s El-Baz, J. S. Suri, Comparative approaches for classification of Diabetes Mellitus data: Machine learning paradigm. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 152, 23-34, 2017, <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2017.09.004>.
- [20] Ö. Deperlioğlu ve U. Köse, Derin Sinir Ağları kullanarak diyabet teşhisi., 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), pp. 1-4, Ankara, Türkiye, 2018.
- [21] P. Cihan and H. Coskun, Performance comparison of machine learning models for diabetes prediction, 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2021), pp. 26-30, İstanbul, Türkiye, 2021,
- [22] P. B. M. Kumar, R. S. Perumal, R. K. Nadesh, and K. Arivuselvan, Type 2: Diabetes Mellitus prediction using Deep Neural Networks classifier. International Journal of Cognitive Computing in Engineering, 1, 55-61, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2020.10.002>.
- [23] E. Yıldırım and A. Çalhan, Machine learning supported diabetes prediction with Apache Spark. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 10(3), 1107-1117, 2022, <https://doi.org/10.29130/dubited.999048>.
- [24] Pima Indians Diabetes Database | Kaggle, <https://www.kaggle.com/datasets/uciml/pima-indians-diabetes-database/>, Accessed 09 May, 2022.





Küresel COVID-19 salgın döneminde kentsel katı atık yönetiminde karşılaşılan güçlükler ve öneriler

Challenges and suggestions for municipal solid waste management during the global COVID-19 outbreak

Hülya Durmaz Bekmezci ^{1,*} , Zehra Şapcı Ayas ² 

¹ Bitlis TOKİ, 13000, Bitlis, Türkiye

² Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 65090, Van, Türkiye

Öz

COVID-19 hızlı bulaşma oranı ve yüzeylerde uzun süre kalabilmesi nedeni ile kısa sürede küresel bir salgına dönüştü. Hızla yayılımı özellikle belediyeçilik hizmetlerinden olan Atık Yönetiminde sorunlara neden oldu. Tek kullanımlık maske, eldiven, gözlük gibi koruyucu ekipmanlar ve hastane yoğun bakımlarından çıkan enfekte atık miktarlarında ciddi artışlar meydana geldi. Bu durum mevcut atık bertaraf sistemleri üzerinde baskı oluşturdu. Ulusal ve uluslararası genelgeler yayınlanarak salgının yayılımı engellenmeye çalışıldı. Bu süreçte biyolojik parçalanabilir plastikler, çevresel ve ekonomik olarak uygun bertaraf yöntemleri ve uygun yönetim planlarının oluşturulmasına yönelik sistem optimizasyon çalışmaları ile veri üretme, saklama ve işleme konusunda yenilikçi çalışmalar ortaya çıktı. Bu çalışmada salgın döneminde Katı Atık Yönetiminde ortaya çıkan sorunlar, çevresel ve ekonomik etkileri, sorunların çözümüne yönelik yapılan yasal düzenlemeler, alınan tedbirler, önerilen uygun bertaraf yöntemleri ile yenilikçi çalışmalar incelenmiştir. Artan nüfus ve iklim değişikliğinin uzun süreli etkileri dikkate alındığında bu salgın ilk değil, son olmayacaktır. Bu dönemde kazanılan hız ile gerçekleştirilen yenilikçi çalışmalar hız kaybetmeden devam etmeli ve sektör içerisinde kullanılmaları yaygınlaştırılmalıdır.

Anahtar kelimeler: COVID-19 salgını, Kentsel katı atık yönetimi, Tıbbi atık yönetimi

1 Giriş

Dünya nüfusu her geçen gün hızla artmaktadır. Gelişen ve değişen dünyada tüketim alışkanlıklarımız da sürekli değişmektedir. Kaynakların atıklara dönüştüğü tek yönlü bir akış söz konusudur. Atıkların geri dönüştürülmesi ile atık miktarı azaltılarak tek yönlü akışın döngüsel hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Döngüsel süreçte atıkların bertaraf edilmeleri yerine, geri dönüşüm ile tekrar üretim sektörüne katılmaları ve kaynak oluşturmaları amaçlanmaktadır [1]. Nüfusun yoğunlaştığı kentsel alanlarda üretilen atıklar ve bu atıkların giderimi önemli bir sorundur. Yerel yönetimler iyi organize edilmiş birer Kentsel Katı Atık Yönetim (KKAY) sistemleri inşa etmelidirler. Gelişmekte olan ve gelişmemiş ülkelerde, hatta ne yazık ki gelişmiş ülkelerde dahi

Abstract

COVID-19 turned into a global epidemic in a short time, due to its rapid rate of infection and its longevity on surfaces. Its rapid spread caused problems in the municipal services especially Waste Management. There have been serious increases in the amount of protective equipment such as disposable masks, gloves, goggles and the amount of infected waste from hospital intensive care units. This put pressure on existing waste disposal systems. National and international circulars were published to prevent the spread of the epidemic. In this process emerged innovative studies such as biodegradable plastics, system optimization studies for environmentally and economically appropriate disposal methods, the creation of appropriate management plans, and data generation, storage, processing. In this study, during the epidemic, Waste Management problems, its environmental and economic effects, the related legal regulations, the recommended disposal methods and innovative studies were examined. Considering the increasing population and the long-term effects of climate change, this epidemic is not the first and will not be the last. Innovative studies carried out with the momentum gained in this period should continue without losing speed and their use within the sector should be expanded.

Keywords: COVID-19 outbreak, Municipal solid waste management, Medical waste management

olgunlaşmamış bu sistemler önemli halk sağlığı sorunlarına neden olmaktadır. Afet ve salgınlar gibi ani gelişen durumlar atık yönetimi üzerindeki baskıyı artırmakta ve sorunların artmasına neden olabilmektedir.

Aralık 2019'da Çin'in Wuhan kentinde, yeni bir koronavirüs hastalığı (COVID-19) ortaya çıktı ve ilerleyen süreçte Şiddetli Akut Solunum Sendromu Koronavirüs-2 (SARS-CoV-2) olarak adlandırıldı [2, 3]. Daha önce yine salgınlara neden olan türlerine (SARS-CoV (2002) ve MERS-CoV (2012)) kıyasla çok daha hızlı yayılım sağlayarak çok kısa sürede, Mart 2020'de, tüm dünyaya yayıldı [4]. 10 Mart 2020 itibari ile Çin kayıtlı toplam 80.778 vaka ve 3.158 ölüm, İtalya 10.156 vaka ve 631 ölüm, İran 8.042 toplam vaka ve 291 ölüm ve Güney Kore 7.513 vaka

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hulyadurmaz80@gmail.com (H. Durmaz Bekmezci)

Geliş / Received: 29.07.2022 Kabul / Accepted: 09.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1150538

ve 60 ölüm ile salgının en yoğun yaşandığı yerler olarak kayda geçti. Bu tablo karşısında Dünya Sağlık Örgütü daha fazla beklemeyerek 11 Mart 2020'de dünya genelinde yüz binden fazla (118.319) vaka ve 4.000'den fazla ölümü göz önüne alarak yeni koronavirüs hastalığını küresel bir salgın olarak ilan etti [5]. Kasım 2020'de toplam vaka sayısı kırk milyona (47.277.834 kişi, 03/11/2020) ulaşırken, bir milyondan fazla insan (1.210.328 kişi) hayatını kaybetti. Nisan 2021'e gelindiğinde ise vaka sayısı 140 milyonu, hayatını kaybedenlerin sayısı ise 3 milyonu aşmıştı. Mart 2022'de vaka sayıları oldukça azalmış, virüs geçirdiği mutasyonlar ile ölümcül gücünü kaybetmeye başlamış ve ülkemizde 26 Nisan 2022 tarihli İç İşleri Bakanlığı tarafından valiliklere gönderilen genelge ile açık ve kapalı alanlarda ve tüm okullarda maske kullanım zorunluluğu kaldırılmıştır [6].

Salgının akut dönemlerinde hızla artan vakalar endişe uyandırmış, ulusal ve uluslararası düzenlemeler ile tedbirler alınmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda dünya genelinde okullar ve iş yerleri kapatılmış, uzaktan eğitim ve uzaktan çalışma imkanları ile insanlar evlerine kapanmıştır. Dışarı çıkmak zorunda kalanlar için ise sosyal ve fiziksel mesafe ayarlamaları ile ulusal ve uluslararası hareket kısıtlamaları gibi bazı tedbirler alınmıştır. Kişisel hijyene önem verilmesi, ellerin sık ve uzun süreli yıkanmaları, maske, eldiven ve koruyucu giysiler gibi tek kullanımlık kişisel koruyucu ekipmanların kullanılması önerilmiştir.

Kişisel koruyucu ekipmanların (plastik eldivenler, maskeler, özel koruyucu giysiler) kullanımı hızla artmıştır. Ayrıca evlerinde ve iş yerlerinde kapalı kalan insanların özellikle ambalajlı gıdaları tercih etmeleri [7] ve bunun yanında tek kullanımlık kağıt ve plastik tabak, çatal, kaşık, bardak vb. kullanmaları ve özellikle hastanelerde salgınla mücadele kapsamında şırıngaların, yaşam destek ürünlerinin ve kişisel koruyucu materyallerin artmasına bağlı olarak, olağan dışı bir atık üretimi ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte bazı hastaneler tümüyle salgın hastanelerine dönüştürülmüş ve COVID-19 hastaları dışında başka hasta kabul edilmemiştir. Artan korku ve kaygılar nedeni ile çok acil durumlarda dışında hastanelere gitme eğilimi gözlenmiştir. Dünyada ve ülkemiz genelinde polikliniklere gitme oranları ve ameliyat oranlarında ciddi azalmalar gerçekleşmiştir. Bununla birlikte yeterli olmamakla birlikte hastanelerde alınan tedbirler ile atıklar kontrol altında tutulmaya çalışılmıştır [8, 9]. Vavarkova ve ark. [9] Çek Cumhuriyeti ve Polonya'dan benzer bir sonuç bildirirken, ülkemizde Samsun'da yapılan bir çalışmada da hastanelerden kaynaklanan Tıbbi Atık miktarında bir artış olmadığını göstermiştir. Görüldüğü üzere salgın sırasında atık miktarında bir değişim gözlenmez iken atık çeşitliliğinde ciddi değişim gözlenmiş ve tehlikeli atık sınıfında gruplandırılan enfekte atık miktarları artmıştır. Bu durum KKA alanında yeni düzenlemeler yapılması gerekliliğini doğurmuştur. Salgının akut döneminde dünya genelinde her ay 129-200 milyar tek kullanımlık maske ve 65 milyar tek kullanımlık eldiven kullanıldığı bildirilmiştir [10-12].

Koronavirüs hastalığı etkeni olan SARS-CoV-2 virüsünün çeşitli yüzeylerde uzun süreler kalabildiği tespit edilmiştir [13]. Yapılan çalışmalar ile virüsün morfolojisi ve

yapısı göz önüne alındığında, aerosollerin bir parçası olarak havada 3-4 saat, bakır yüzeylerde 4 saat, kartonlarda 24 saat, cam yüzeyinde 4 saat, paslanmaz çelik malzemelerde 72 saat, eldivenlerde 24 saat, plastik yüzeylerde 72 saat, kanalizasyonda 3 gün ve katı dışkı üzerinde 3-4 gün yaşadığı belirlenmiştir [14-19]. Çeşitli ortamlardaki uzun kalıcılık süreleri, hastanelerde ve evlerinde karantinede olan hasta bireyler tarafından kullanılan malzemeler ile KKA akışına katılabileceği ve iyi yönetilemeyen atıklar ile salgının yayılımına katkıda bulunacağı düşüncesi endişe uyandırmıştır [20, 21]. Atıkların bu alanlardan uygun olmayan yöntemler ile alınması, KAYS içerisinde yer alan tüm birimlerde (çevre yetkilileri ve kurumları; belediyeler=KKA toplama, taşıma ve bertaraf şirketleri; yöneticiler, mühendisler ve KKA çalışanları vb.) çalışan insanlar için önemli bir sağlık riski oluşturmakta ve hastalığın çevre yoluyla yayılımını engelleme çabalarına engel oluşturmaktadır [22]. Cam, plastik, kâğıt ve biyolojik atıklar geri dönüşüm ekonomisinin önemli bileşenleridirler ve salgın döneminde geri dönüşüm sektörü de ciddi zarar görmüştür.

Bu çalışmada salgın döneminde KKAYS'de ortaya çıkan sorunlar ile çevresel ve ekonomik etkileri, sorunların çözümüne yönelik yapılan yasal düzenlemeler ile alınan tedbirler, uygun ve önerilen bertaraf yöntemleri ile yenilikçi çalışmalar literatür üzerinden incelenmiştir. Son olarak bu çalışmada KKAYS'i daha verimli ve salgınlar karşısında daha dayanıklı olabilmesi için öneriler paylaşılmıştır. Artan nüfus ve iklim değişikliğinin uzun süreli etkileri dikkate alınca bu salgın ilk değil ve son olmayacaktır.

2 Kentsel katı atık yönetiminde ortaya çıkan sorunlar, çevresel ve ekonomik etkiler

Kentsel katı atıkların uygun olmayan şekillerde toplanması, paketlenmesi, taşınması veya bertaraf edilmesi durumunda kentsel katı atıklar yoluyla virüsün yayılabileceği açıktır. Salgın atığın tanımlanması, sınıflandırılması, toplanması, ayrıştırılması, depolanması, taşınması, geri dönüşümü, arıtımı ve bertarafı gibi tüm işlemler üzerinde baskı oluşturmuştur [9]. Gelişmiş ülkelerde dahi atıkların sağlıklı bir şekilde yönetilmeleri ancak kentsel alanlardaki nüfusun %30-35'i için mümkün olmaktadır [23]. Bu tesisler mevsimsel bazı değişikliklerin göze alınması ile öngörülebilir ve sabit miktarlarda atık üretimine göre tasarlanmıştır. Salgın döneminde sağlık ve tıbbi atık miktarları (S&TA) öngörülebilir limitlerin çok üzerinde gerçekleşmiştir. Örneğin Newyork'da sıra ile %3,3 ve %13,3 daha fazla KKA ve organik atık üretilmiştir [24]. Çin'in Wuhan kentinde günlük tıbbi atık üretimi 40 tondan 240 tona yükselmiş, maksimum yakma kapasitesini aşmıştır ve 46 mobil atık yönetim tesisi kurulmuştur. Aynı çalışmada sağlık alanındaki atık üretim hızının en yüksek Wuhan (%600) ve en düşük ise Ha Noi'de (%492) kaydedildiğini, atık üretim hızının salgının şiddeti, hastaneye yatış oranları ve popülasyon yoğunluğuna bağlı olduğunu bildirmişlerdir [25].

Salgın döneminde özellikle tek kullanımlık maskeler, eldivenler ve koruyucu giysiler ile tek kullanımlık gıda ambalajları ve mutfak araçlarına ait atıkların atık

bileşimindeki yeri çok ciddi artmıştır. Bu malzemeler genellikle polipropilen, polistiren, polietilen, polikarbonat ve poliester ürünlerdir. Bu plastik türevi bileşenler uzun vadede dünyanın karşı karşıya olduğu plastik kirliliğine katkıda bulunabilir [26]. Bununla birlikte maskelerin tekrar kullanımlarını artırmak için çalışmalar yürütülmüştür. Tuz ve bakır iyonları kullanılarak antiviral özellik kazandırılmaya çalışılmıştır [27, 28].

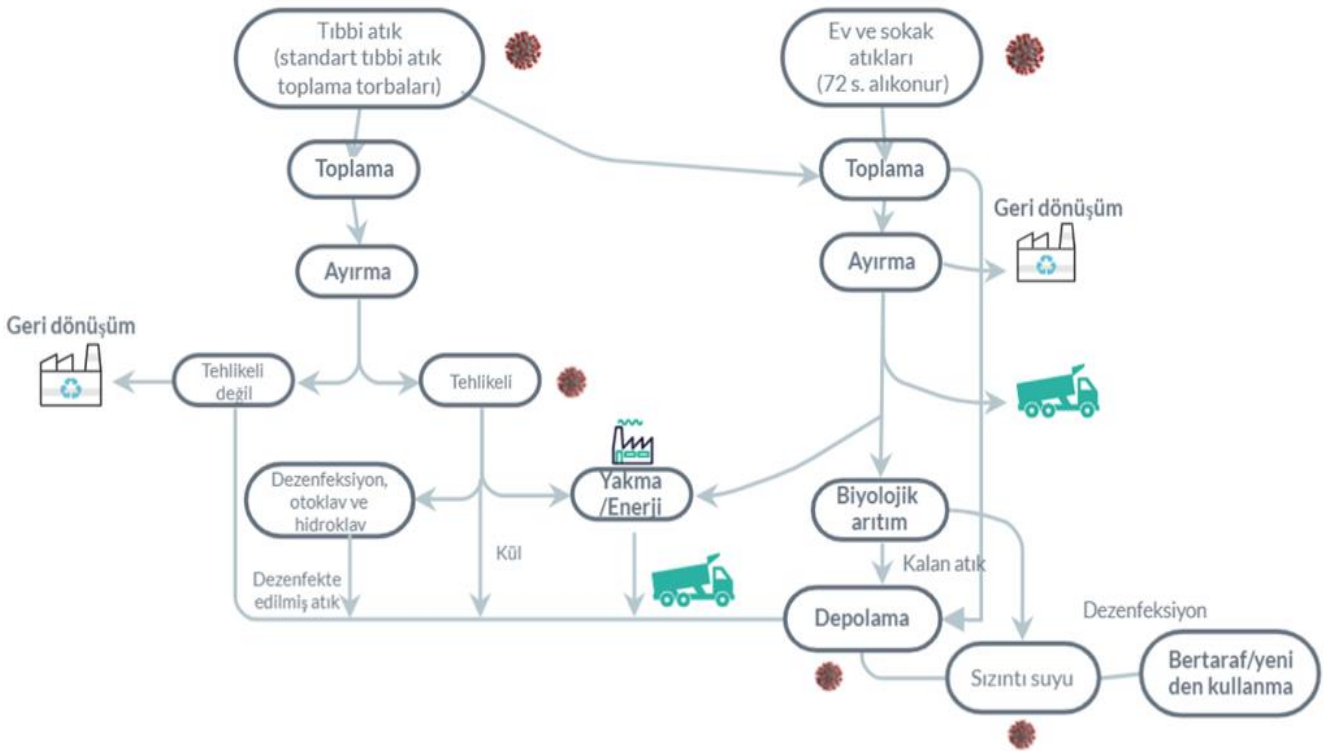
Şekil 1 ile SARS-Cov-2 virüsünün Kentsel Atık Yönetim zincirindeki olası yerlerini gösterilmesi amaçlanmıştır.

Tıbbi atıklar tehlikeli ve tehlikesiz atık olarak gruplandırılan önemli bir atık kaynağıdır. Gelişmekte olan ülkelerde sosyo-ekonomik koşullar ve kişi başına düşen gayri safi yurtiçi hasılaya (GSYH) bağlı olarak tehlikeli olmayan bileşenler %35-98,7 ve tehlikeli bileşenler %1,3-65 arasında değişmektedir. Atıklar genellikle yakılarak ya da uygun olmayan koşullarda depolama sahalarında tutulmaktadır. Salgın döneminde yakma tesislerinde oluşan yükü dengelemek adına 72 saat yerinde alıkonmaları istenmiştir, ancak bu durum hastanelerde geçici depolama sahalarında fazladan alan gereksinimi doğurmuştur [9]. İspanya, atık miktarındaki artışın üstesinden gelmek için çimento fabrikaları ile atıkların yakılması konusunda işbirliği oluşturmuştur. Norveç'te hükümet, depolama izinlerinde (ve atıkları başka bir yere taşıma izinlerinde) geçici değişikliklere izin vermiştir [29]. Tıbbi atıkların bertarafı sırasında yayılımı en az düzeye indiren yakma yöntemi en iyi yöntem iken, çevresel açıdan değerlendirildiğinde yüksek enerji gereksinimi çevresel ayak izini önemli ölçüde artmıştır. Çevresel açıdan en iyi yönetim

sisteminin geri dönüşüm ile dögüsel kullanımları olduğu görülmektedir [1].

Her iki yöntemin de çevresel etkilerinde farklılıklar bildirilmiştir. Farklılıklar atık bileşimi ve türleri, yönetim sistemleri, enerji geri kazanım sistemleri, sistem sınırlılıkları ve süreç içerisinde kullanılan enerji kaynaklarından (kömür, hidroelektrik santrali vb.) kaynaklanmaktadır. Atıkların miktarı, kalitesi ve bileşimi yakma sonucu çıkan baca gazının (CO₂, SO₂, HCl ve NO_x) nitelik ve niceliğini etkileyecektir. Yakma işleminde kullanılan teknolojiler ve gaz temizleme yöntemleri ile atık bileşimindeki farklılıklar kirletici gaz emisyonlarının çeşitlilik göstermesine neden olur [30]. Atıkların enerji üretiminde kullanıldığı atık-enerji tesisleri (Waste to Energy; WtE) ile enerji geri kazanılırken, atık türüne, elde edilen enerji miktarına ve verimliliğine ve yakma parametrelerine bağlı olarak çevresel etki ve ekonomik yük dengelenebilir. Atık yönetim maliyeti atık akış miktarı, atık yönetim sistemleri, enerji geri kazanımı ve dezenfeksiyon yöntemlerine bağlıdır. Yüksek geri kazanım (%80-95) oranları atık yönetim maliyetini önemli ölçüde azaltacaktır [25].

Karantina bölgelerinin iyi bir şekilde belirlenmiş olması ve buna göre yönetim planlarının oluşturulması salgın kaynaklı baskıyı azaltabilir. Örneğin salgının gözlenmediği yerlerde normal plan uygulanırken, sık görüldüğü yerlerde özel eğitilmiş personel ile dezenfeksiyon işlemleri ve özel taşıma yolları planlanabilir. Birleşik Krallık'ta kendini izole eden bireylere, temaslı tüm atıkları için çift torba kullanmaları, 72 saat boyunca alıkoymaları ve ancak sonuçları negatif ise genel atıklara bırakmaları tavsiye



Şekil 1. KKA yönetim akışında potansiyel COVID-19 virüsü bulunma olasılıkları olan alanlar

edilmiştir. Salgının yoğun olduğu sıcak noktalarda ise her toplamadan sonra toplama alanlarının, konteynır ve araçların dezenfekte edilmesi önerilmiştir. Singapur'da atıklar kapalı olarak sahipleri tarafından kamyonlara teslim edilmiş, bu şekilde atık toplayıcıların virüs ile olası temasının engellenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sıcak noktalarda sefer sayıları da üç defaya kadar artırılmıştır [29, 31]. Türkiye dahil dünya genelinde, sağlık kuruluşları ile öğrenci yurtları gibi toplu karantina alanlarından çıkan atıkların tıbbi atık olarak değerlendirilerek diğer atıklar ile karıştırılmamaları belirtilmiştir. Evlerden ve işyerlerinden kaynaklanan enfekte atıkların ayrı toplanması, yırtılmaları karşı çift ve güçlü poşetler kullanılması, doluluk oranlarına dikkat edilmesi, insan ve hayvanların temasını engelleyecek şekilde balkon veya kapalı alanlarda 72 saat bekletilerek "diğer atık" kapsamında, toplama saatinde belediye çalışanlarına teslim edilmeleri gibi virüsün dağılmasının en aza indirecek tedbirler yayınlanmıştır [32]. Özellikle salgın döneminde "kilit işçi" olarak konumlandırılan atık toplama personelinin olası temastan korumak için Uluslararası Katı Atık Birliği (ISWA), Amerika İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi (OSHA; Occupational Safety and Health Administration) gibi uluslararası kuruluşlar ve hemen her ülkede ulusal düzenlemeler işleme alınmıştır.

Tıbbi atıklar sağlık kuruluşlarında +4 °C'de bir haftaya kadar standartlara göre hazırlanmış geçici depolama alanlarında saklanabilirler. Eğer soğutma yoksa depolama süreleri sıcak iklimlerde, ılık mevsimde 24 saati, soğuk mevsimde 48 saati, ılıman iklimlerde ise 48 ve 72 saati geçmemelidir [33]. Enfekte atıklar yeterli sterilizasyon ve bertaraf yönteminin olmadığı durumlarda depolama alanlarında günde bir kez kil ile örtülerek gömülmektedir. Sıcak noktalarda gün sonuna kadarki sürede açıkta bekleyen enfekte atıklar önemli bir hastalık kaynağı olarak risk taşımaktadırlar. Sıcak noktalardan gelen atıklar için günde bir kez yerine daha sık kil örtü ile kapatılması elleçleme sırasında personelin enfeksiyöze maruz kalmasını engelleyecektir [9]. Düzenli depolama alanlarında enfekte atıkların işlenecekleri yere oldukça yakın bırakılmaları diğer atıkların enfekte olmasını ve aerosoller ile virüsün yayılımını engellemek üzere faydalı olabilecektir. Düzenli depolama alanlarında oluşan sızıntı suları tehlikeli maddeler ve patojenler içerebilmektedir. SARS-Cov-2 durumunda sızıntı sularında uygulanacak olan geleneksel veya modern dezenfeksiyon yöntemleri (Şekil 1) yeterli olacaktır. Sızıntı sularının yönetiminde yapışkan toprak astarlar ve kesme duvarlarının kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. [9, 34]. Polonya'da kesme duvarı kullanılması ile yeraltı su kalitesinde iyileşme gözlenmiştir [34]. Sızıntı suları hastalık etkenlerinin yeraltı su kaynaklarına ve dolayısı ile kuyulara ulaşmasına neden olabilir. Bu yüzden yeraltı suları ve kuyu sularının bu hastalık etmenleri açısından düzenli olarak incelenmeleri çok önemlidir.

Virüsün farklı yüzeylerdeki kalıcılığına ait verilerin oluşması ile atık toplayıcıların özellikle korunmaları gerektiği ortaya çıkmıştır. Geri dönüşüm tesisleri büyük oranda otomasyon olsa da sistemin denetlenmesi ve istenmeyen maddelerin manuel uzaklaştırılmaları

gerekmektedir. Salgın sırasında geri dönüşüm sektörü ciddi zarar görmüştür. En çok gelişmiş olduğu Belçika ve Norveç'te dönüştürülebilir atıkların halk tarafından teslim edildiği sivil tesis alanları kapatılmış ve halktan evlerinde saklamaları ya da kiralayabilecekleri özel atık konteynırlarında saklayabilecekleri söylenmiştir [35]. Amerika'da süpermarketler ve halka açık geri dönüşüm toplama alanlarında şişe ve tenekelerin alınması ve ödeme yapılması askıya alınmış ve bu nedenle plastik ve alüminyum geri dönüşüm akışı azalmıştır [36]. Atık geri dönüşümü daha az atık üretirken kar etmeyi amaçlamaktadır [37] ve salgın döneminde çok ciddi zarar görmüştür. Tesislere gelen ham madde niteliğine sahip atıklar enfekte olmuş tehlikeli madde olarak işlem görmüş ve ham madde olarak kullanılabilir kaynak miktarı azalmışlardır. Ayrıca sosyal mesafe, esnek çalışma saatleri ve tehlike altında olan bireylerin çalıştırılmaması nedeni ile iş gücünün azalması toplanabilecek miktarların azalmasında önemli etkenlerdir [17].

Dünya Bankası'nın (2019), gelişmekte olan ülkelerde, açık ve kötü yönetilen düzenli depolama alanlarına boşaltılan katı atıkların, yeniden kullanmak ve satmak üzere geri dönüştürülebilir malzemeler arayan çöpçüler için çekim yerleri olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca bu alanlar özellikle geri kalmış ülkelerde önemli hayvan gıda depoları olarak hizmet etmektedirler [22]. Dolayısıyla, bu tür depolama alanları çöpçüleri (hem insan hem de çiftlik hayvanları) COVID-19'a maruz bırakabilir ve böylece yayılmasına katkıda bulunabilir [38]. Salgın öncesi Çin'in Hunan Eyaletinde düzenli depolama alanları zaten mevcut kapasitelerine yaklaşmışlardır. Salgın sonucu Çin önümüzdeki 5 yıl için yakma kapasitesini %50 oranında artırma kararı almıştır [39].

Salgın durumunda atık yönetimine ilişkin sorunların ve olası etkilerinin yönetilebilmesi için atıkların toplanması ve taşınması sırasında KKA çalışanlarının korunması için özel önlemlerin uygulanması gereken şehir veya bölgelerdeki yüksek riskli alanların ve KKA türlerinin analiz edilmesi gereklidir. Tıbbi yakma tesisleri üzerindeki baskıyı hafifletmek için enfekte KKA'nın (EKKA) geçici olarak depolanması, düzenli depolama ve atık-enerji (Waste to Energy=WtE) operasyonlarında güvenlik önlemlerinin yükseltilmesi imkanlarının iyi değerlendirilmesi gereklidir. KKA'ı güvenli bir şekilde yönetmek için politikaların ve kılavuzların değişen koşullara göre güncellenmesi dikkatle analiz edilmelidir.

3 Ulusal ve uluslararası yasal düzenlemeler

"Atık yönetim sorununun üstesinden gelme" her düzeyde paydaşı içeren bütünsel ve katılımcı politikalar gerektirir. Salgın döneminde atık yönetim sorununa kamuoyu algısı ve desteği atık yönetimine halkın katılımına yönelik politik stratejiler için önemlidir [22]. Yerel yönetimler ve ilgili bakanlıkların, salgın sırasında atık azaltma önerileri, koruyucu önlemler ve toplama sıklığı ile ilgili uygulama prosedürleri hakkında toplumu bilgilendirmeleri gerekmektedir.

Uluslararası kuruluşlar ve ülkeler, salgın sırasında KAY hizmetleri ile ilgili çok sayıda tebliğ ve kılavuz yayınladılar. Avrupa Komisyonu (EC) 14 Nisan 2020, hastanelerde katı atık toplama açısından şu yönergeleri içeren kılavuz yayınladı [35];

- Enfekte kişilerin kâğıt mendilleri ve yüz maskeleri, kullanımdan hemen sonra hasta odasında bulunan bir çöp torbasına bırakılmalıdır.
- Her hasta ziyaretinden sonra hasta bakımının eldivenleri maskesi hasta odasının dışında bulunan ayrı bir kutuya bırakılmalıdır
- Her iki poşette bağlanarak temiz bir genel atık torbasına konmalı, içerik aktarılmamalıdır (çift poşet uygulaması)
- Genel torba normal KKA olarak bertaraf edilmeli ve özel imha ve toplama önlemi alınması gerekmemektedir.

Sağlık tesisleri açısından, ilgili yasa, atıklarla ilgili 2008/98/EC sayılı Avrupa Direktifidir [40]. Salgın döneminde Avrupa Hastalık Önleme ve Kontrol Merkezi (European Centre for Disease Prevention and Control; ECDC) [41] tarafından çeşitli güncellemeler ile yorumlanmıştır.

ECDC'nin [41] 13 Mayıs 2020 kılavuzu, sağlık tesislerinin çevre temizliği ve atık yönetimi ile ilgilenen personelinin cerrahi maske, eldiven göz koruyucu (siperlik veya gözlük) ve önlük takmasını ve tesisin, özellikle hasta odalarının, düzenli temizlenmesini ve dezenfekte edilmesini tavsiye etmiştir.

AB üye devletler EC ve ECDC'nin tavsiyelerini kendi özel KAY endüstrilerinin özelliklerine (WtE tesislerinin varlığı, kapasitesi, geri dönüşümün kapsamı, vb.) uyarlamışlardır. Finlandiya gibi bazı ülkeler ise EC'nin bazı yönergelerinden ayrılarak, enfekte atıkların ayrı toplanması gerektiği talimatını vermişlerdir [35].

Amerika'da Taşıma Birimi ve Hastalık Kontrol ve Önleme birimlerinin her ikisi de mevcut KAY uygulamalarının çalışanların sağlığını korumasında yeterli olduğunu ve enfekte atıkların diğer KKA'lar gibi yönetilmeleri gerektiğini bildirmişlerdir [29]. ABD iş sağlığı ve güvenliği idaresi, KKA yönetiminde yer alan personel için önceden tanımlanmış güvenlik yönergelerine sahiptir. COVID-19 krizine yanıt olarak OSHA, KKA yönetimini temel bir hizmet olarak kabul ederek, KKA yönetiminde yer alan personeli bu önlemleri uygulamakla görevlendirmiştir [42, 43].

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından 7 Nisan 2020 tarihinde üç adet genelge yayımlandı. "Tek Kullanımlık Maske, Eldiven gibi Kişisel Hijyen Malzeme Atıklarının Yönetiminde COVID-19 Tedbirleri", "COVID-19 Salgını ve Atıksu Yönetiminde İlişkin Önlemler Genelgesi" ve "COVID-19 Salgını süresince Gemi Atıkları Yönetimi Genelgesi" olmak üzere [44]. Bu genelgelerde tek kullanımlık kişisel koruyucu ekipmanlar ile hijyen sağlamak amaçlı kullanılan malzemelerin atıklarının biriktirilmesi, toplanması, taşınması, geçici olarak depolanması ve atık işleme tesislerine ulaştırılması süreçlerinde dikkat edilmesi gerekenler anlatılmaktadır.

Uluslararası Katı Atık Birliği (ISWA) COVID-19 salgını sürecinde katı atık yönetimine ilişkin üç genel öncelik gündeme getirmiştir; (a) geri dönüşüm hizmetlerinin, arıtma ve bertaraf tesislerinin işleyişinin kesintiye uğramamasını ve uygunsuz yönetim nedeniyle halk sağlığı için ek risk oluşturmamasını sağlamak; (b) çapraz bulaşma ve enfeksiyonları önlemek için geri dönüşüm faaliyetlerini ayarlamak; ve (c) sağlık ve tıbbi atıkların (S&TA) güvenli bir şekilde işlenmesini ve bertaraf edilmesini sağlayarak, daha fazla enfeksiyon ve kirlilik riski olmadığından emin olmak. ISWA ayrıca çalışanlar tarafından dikkat edilmesi gereken bir dizi önlem yayınlamıştır. Bunlar; yüz ve göz koruyucu ve delinmeye karşı dayanıklı eldivenler kullanmak, iş eldivenlerinin altına tek kullanımlık eldivenler takmak, üniformaların ve ayakkabıların günlük olarak değiştirilmesi ve 60 °C'nin üzerinde yıkanması, atık toplama işlemi sırasında mahalle sakinleri ile temastan kaçınmak, her toplama aracıyla dezenfektanların bulunması, her çalışma döngüsünden sonra sürücü kabini dezenfekte edilmesi ve ayrıca sosyal mesafe ve sık el yıkama gibi genel halka uygulanan tüm kuralların uygulanmasıdır. Birçok ülkede atık yönetimi çalışanları "kilit işçi" olarak konumlandırılmışlardır. Birleşik krallıkta çalışanların çocuklarına salgın boyunca eğitim ve bakım desteği sağlanmıştır [31].

4 Atık bertarafında kullanılan yöntemler

Hastalık yapıcı etkenlere sahip katı atıkların etkisiz hale getirilmesinde günümüzde iki ana bertaraf yöntemi vardır; (1) dezenfeksiyon, mikrodalga, sterilizasyon ve güvenli depolama gibi geleneksel yöntemler ve (2) yakma, proliz ve gazlaştırma gibi yüksek sıcaklıkta bertaraf yöntemleri [23]. Birkaç bin derece sıcaklığın elde edildiği plazma ark yöntemi umut vadeden sınırlı sayıda bir teknolojidir [45]. Hangi teknolojinin seçileceği sosyal kabuller kadar teknik, çevresel ve ekonomik faktörlere bağlıdır [46]. Roy ve ark., [25] yaptıkları derlemede COVID 19 salgını sırasında Katı Tıbbi Atıkları (KTA) dezenfekte etmek için kullanılan atık dezenfeksiyon/ Yönetim teknolojilerini derlemişlerdir;

- Yüksek basınçlı buhar sterilizasyonu (121 °C, 110 dk)
- Yüksek sıcaklıkta proliz (540-830 °C)
- Yüksek sıcaklıkta yakma (800-1200 °C)
- Yakma (>1100 °C)
- Çift hazneli yakma (birincil hazne 750-980 °C, ikincil hazne >1100 °C); Çift hazneli yakma fırını gazın kalış süresini artırarak, haznede türbülansı teşvik eder ve emisyon azalır.
- Akışkan yataklı veya ızgaralı yakma fırınları; enerji yoğun ön işlem (parçalama) ve yüksek uçucu kül oluşumuna neden olur. Ancak COVID-19 döneminde atık işlemede partikül emisyonunun azalmasında faydalı olabilir [30].
- Akışkan yataklı döner fırın teknolojileri;
- Kimyasal dezenfeksiyon: Sodyum hipoklorit (NaOCl), klor dioksit (ClO₂), ultraviyole ışınlama, sıvı atıklar için ozon, H₂O₂ (>%0.5); etanol (>%7.5), izopropil alkol (>%70), formaldehit (>%0.7), povidon iyot (>%0.23), sodyum hipoklorit (>%0.21), 60 dk ışınlama.

- Mikrodalga teknolojisi (177-540 °C)
- Derin gömme (yeraltı suyu seviyesinden 1-2 m yukarda, 1-2 m toprak örtü)

DSÖ, kontamine atık yönetimi teknolojilerini üç kategoride ele almıştır (Tablo 1). Tabloda kullanılan renklendirmede çevreye olan etkileri derecelendirmektedir. Kırmızı tehlikeli, yeşil daha çevre dostu uygulamayı göstermektedir. Açık yakma ve ocakta yakma en az tercih edilen teknolojiler olarak tanımlanırken, otoklavlama, tek ve çift hazneli yakma fırınları orta düzeyde ve çift hazneli yakma ile düşük ısı bazlı kimyasal işlemler en çok tercih edilen teknolojilerdir [47].

Katı atıkların dezenfeksiyon öncesinde ya da sırasında, dezenfektan ile atık partikül yüzeyleri arasında iyi bir temas sağlamak için parçalanmaları gereklidir ve bu işlem virüslerin etrafa yayılımının engellenmesi için tamamen kapalı bir sistem içinde yapılmalıdır. İç parçalayıcılara sahip mikrodalga üniteleri, iç parçalayıcılara sahip otoklav ve sürekli buharlı arıtma sistemlerinin karışımına eşdeğerdir, teorik olarak kullanışlı olabilmektedirler [9].

Tablo 1. WHO tarafından kirlenmiş sağlık atıkları için önerilen teknoloji basamakları

KontROLSÜZ Atık Yakma	Açık yakma Çukurda (ocakta) yakma
Geçici Arıtma Yöntemleri	Otomatik basınçlı gravite otoklavlama Baca gazı arıtımı olmadan tek hazneli yakma Baca gazı olmadan çift hazneli yakma
Uluslararası Sözleşmelere Uygun Teknolojiler	Baca gazı arıtmalı çift hazneli yakma Düşük ısı bazlı ve kimyasal bazlı işlemler

Atık-enerji tesisleri salgın gibi durumlarda oldukça etkili olabilecek sistemlerdir. Atık negatif basınçta tutulan bunkerlere atıldığı için virüslerin bunkerlerden yayılma olasılıkları yok denecek kadar azdır. Ancak salgın durumları gibi yoğun çalışma süreçlerinde büyük bakım gerekliliklerinin oluşmaması için çok özen gösterilmelidir. Isı ve enerji geri kazanımlı mobil yakma tesisleri atıkların toplanması, taşınması ve depolanması sırasında çalışanlar ve çevre açısından oluşacak risklerin potansiyel çözümü olarak tavsiye edilmiştir. Bu tür cihazların varlığı taşıma, geçici depolama ve merkezi WtE sistemleri arasında bulaşıcı maddelerin yayılımını engelleyecektir. Oluşan küllerde inşaatlarda çimentolara katkı olarak değerlendirilebilir.

Atık-enerji üretim tesisleri oldukça maliyetli işletmelerdir. Gelişmekte olan ülkeler yasal zemin ve teşvikler olmadığı için, ne yazık ki, depolama alanlarını kullanmak zorundadırlar. Ayrıca atıklardaki yüksek nem ve organik madde miktarı nedeniyle kompostlama, anaerobik çürütme ve biyoreaktör depolama alanları ile bertarafı daha yaygındır. Salgın sırasında mevcut sterilizasyon işlemlerinin materyallere zarar verebileceği görülmüş ve geleneksel yöntemlere alternatif yöntemler düşünülmüştür. Bunlar arasında en önemlisi süperkritik akışkan teknolojilerinin kullanılmasıdır. Geleneksel yöntemlerinin yerini alma potansiyeli zayıf ancak hassas materyallerin sterilizasyonlarında kullanılma potansiyeli oldukça yüksektir [48].

Salgın döneminde atık yönetiminde yöntemlerin verimliliklerinin artırılmasına yönelik ciddi disiplinler arası çalışmalar yürütülmüştür. Atıkların hızlı bir şekilde ayrıştırılması için plazma enerjisinin kullanıldığı plazma ark teknolojileri ile atık yakma fırınları birleştirilerek verim artışının sağlandığı Organik Rankine Çevrimi (atık ısıdan enerji üretme) bunlara örnek verilebilir. Hedef Programlama (bir süreci optimize etmek için kullanılan program: Sırbistan'da uygun yakma yerlerinin belirlenmesinde) ve optimizasyon modelleri (hastane atık yönetiminde karar verme süreçlerinde), Bileşimsel Bayesyal Regresyon (atık oluşumu çevresel etkilerin tahmini), sistem yaklaşımı ve sinir ağı modellemesi (atık yönetim süreçlerinde) ile ileri yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleri de KAYS içerisinde toplama, sınıflandırma ve bertaraf aşamalarında denenmiştir. Yapay sinir ağları nüfus, ekonomi ve yerleşim yeri verilerini kullanarak uygun rotaların belirlenmesinde, görüntü işleme teknikleri ile otomatik sınıflandırmada, WtE tesislerinin optimizasyonunda, genetik algoritmalar, uygun rotaların ve konuların belirlenmesi, veri madenciliği daha iyi bir atık yönetimi için kaynakların verimli yönlendirilmesine yardımcı olabilmektedir [49].

5 Sonuç ve öneriler

Tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 hastalığı küresel bir salgına dönüşmüş ve çok kısa sürede ciddi yaşam kayıplarına yol açmıştır. Salgının ilerleyişini durdurabilmek adına küresel ölçekte tedbirler alınmıştır. Eğitim kurumları, iş yerleri kapatılmış ve uygulanan hareket kısıtlamaları ile insanların yaşam tarzı tamamen değişmiştir. Değişen bu koşullar özellikle üretilen atık miktarı değilse de bileşenlerinde önemli değişimlere yol açmıştır. Atık yönetimi atıkların toplanması, taşınması, depolanması, bertarafı ve yeniden kullanılmasını kapsayan dinamik bir ağıdır. Salgından korunmak adına kullanılan tek kullanımlık maske, eldiven koruyucu giysiler, hastanelerde kullanılan şırınga ve yaşam destek sistem elemanları ve tek kullanımlık mutfak gereçleri, gıda ambalajları gibi plastik temelli atıkların miktarı hızla artmıştır ve uzun vadede plastik kirliliğine katkıda bulunabilir. Atık yönetim sistemi içerisinde yer alan tüm personel hastalık taşıyan materyaller ile temas riskine sahiptir. Özellikle atık toplayıcıları korumaya yönelik tedbirlerin alınması talimatı verilmiştir. Hassas bireyler izne ayrılmış, bu sebeple çalışan sayısı azalmış ve bazı ülkelerde çocuklarına eğitim yardımları şeklinde maddi olarak da desteklenmişlerdir. Virüsü çeşitli yüzeylerde 2 saat ile 9 güne kadar kalabildiği tespit edilmiştir. Bu durum atıklar üzerindeki virüslerin atıklar aracılığı ile yayılımlarının artacağı düşüncesini gündeme getirmiştir. Atıkların güvenli şekillerde toplanması amacıyla toplama alanlarına götürülmeden, çift paketlenmesi, 72 saat alıkonması, kimyasallar ile dezenfekte edilmeleri vb. bir dizi düzenleme yayınlanmıştır.

Salgın ortamında oluşan atık yönetimi sorunları beraberinde çözüm arayışlarını getirmiştir. Biyoparçalanabilir plastiklerin üretilmesi, maskelerin antiviral özellikleri kazandırılması, ideal bertaraf yöntemlerinin değerlendirilmesi, atık yönetim planlarının optimize edilmesi, sürdürülebilir atık yönetim sistemlerinin

inşası gibi çalışmalar yürütülmüştür. Mobil yakma işlemleri toplama ve taşıma kaynaklı yayılımı en aza indirirken özellikle nüfusun yoğun olduğu noktalarda önemli bir hava kirliliği kaynağına dönüşmüştür. Kimyasal dezenfektanların kullanımı yakılması gereken atıkları kurtarıp geri dönüşüme kazandırmak için bir fırsat iken, ekosistem üzerinde kimyasal kirlilik baskısı oluşturmuştur.

Geri dönüşüm sektörü bu dönemde önemli bir darbe almış geri dönüştürülebilir atıkların bir kısmı enfekte atıklar ile bertaraf edilirken, geri dönüşüm toplama noktaların atıkların ulaşımı sınırlanmıştır ve ciddi kaynak sıkıntısı oluşmuştur. Küresel “sıfır atık” planları ötelenmek zorunda kalmıştır. Oysa WtE teknolojilerinin yaygınlaştırılması ile yakma ve enerji sistemlerinin birleştirildiği tesisler hem çevresel hem de ekonomik anlamda elverişli sistemlerdir. Ancak kurulum ve işletim maliyetleri yüksek olduğu için özellikle gelişmekte olan ülkelerde düzenli depolama, gelişmemiş ülkelerde ise vahşi depolama ve açık çöplükler insanlar ve hayvanlar için önemli hastalık kaynaklarına dönüşmüşlerdir. Salgın döneminde düzenli depolama sahaları içinde tedbirler ve çözüm önerileri oluşturulmuştur, gündün üç defaya kadar örtü kullanmak gibi. Düzenli depolama sahalarında oluşan sızıntı suları ayrıca incelenmesi ve yönetilmesi gereken bir sorun teşkil etmektedir. Sızıntı suları gerekli tedbirler alınmazsa kirleticilerin yeraltı sularının en yakın kuyulara dolayısı ile insanlara ulaşmasında etken olabilmektedir.

Salgın sürecinde ortaya çıkan önemli bir konu ise kentlere ait verilerin tespitinde yaşanan sorunlardır. Özellikle kenar mahallelere ait sağlıklı verilere ulaşamamış ve bu da etkili atık yönetim planlarının oluşturulmasında engel teşkil etmiştir. Sağlıklı verilerin elde edilip kullanılabilmesi için düzenlemeler yapılmıştır.

Bu dönemde atık yönetimi üzerinde bilimsel çalışmalar hız alırken, disiplinler arası çalışmalar artmıştır. Salgın toplumun hızla dönüşebildiğini ve adapte olabildiğini ortaya koymuştur. Salgın öncesi döneme dönmek yerine tüm dünyada kentleri gelecekte daha dirençli, kapsayıcı ve ekonomik bakımdan daha sürdürülebilir kılmak şarttır. Yaşanan tecrübeler ile bunun mümkün olabileceği artık bilinmektedir.

Atık yönetiminin geleceğine yönelik ortaya çıkan önerileri şöyle özetleyebiliriz.

- Her anlamda optimize edilmiş entegre atık yönetim tesislerinin hızla tüm dünyada yaygın hale getirilmesi ve optimum koşullarda çalışmalarını sağlanmalıdır.
- Pnömatik sistemler gibi geleceğin teknolojileri ile atık toplayıcıları temastan sakınan el değmeden otomatik çalışan toplama sistemleri geliştirilerek yaygınlaştırılmalıdır.
- Yetkin personel oluşturulması konusunda gerekli eğitim çalışmaları işbirlikleri kurularak artırılmalıdır.
- Özellikle kaynağında ayrı toplama ile ülkemizde devam etmekte olan “sıfır atık” farkındalık projeleri ile bireysel eğitim çalışmaları her alanda desteklenmeli ve ilgili düzenlemeler ile teşvik edilmelidir.

- Doğada kalıcılığı yüksek plastik ürünler yerine kolay parçalanabilir, yeniden kullanılabilir potansiyeli yüksek materyallerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar teşvik edilmelidir.
- WtE tesisleri gibi entegre atık yönetim tesislerinin yaygınlaştırılmaları sağlanmalı, böyle çevresel ve ekonomik etkiler arasında denge oluşturulması hedeflenmelidir.
- Yakma işlemleri sonrasında oluşan atıkların inşaat sektörü gibi başka alanlarda kullanılmalrı değerlendirilmelidir.
- Büyük, küresel, eksiksiz ve herkes tarafından erişilebilir veri bankaları kurulmalıdır.
- COVID-19 salgını sırasında elde edilen tecrübeler sürekli incelenmeye devam edilerek olası benzer durumlar için uyarlamalar yapılmalıdır.
- Salgın döneminde artan disiplinler arası çalışmalar ile üretilen yenilikçi teknolojilerin kullanılmalrıının desteklenmesi gereklidir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 18

Kaynaklar

- [1] Ş. Balbay, A. Sarıhan, E. Avşar, Dünya’da ve Türkiye’de “Döngüsel ekonomi / endüstriyel sürdürülebilirlik” yaklaşımı. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 27, 557-569, 2021. DOI: 10.31590/ejosat.971172.
- [2] A. E. Gorbalenya, S. C. Baker, R. S. Baric, R. J. de Groot, C. Drosten, A. A. Gulyaeva, B. L. Haagmans, C. Lauber, A. M. Leontovich, B. W. Neuman, D. Penzar, S. Perlman, L. L. M. Poon, D. Samborskiy, I. A. Sidorov, I. Sola, and J. Ziebuhr, Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus– the species and its viruses, a statement of the Coronavirus Study Group. BioRxiv, 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.02.07.937862>
- [3] F. Wu, S. Zhao, B. Yu, Y. Chen, W. Wang, Z.-G. Song, Y. Hu, Z.-W. Tao, J.-H. Tian, Y.-Y. Pei, M.-L. Yuan, Y.-L. Zhang, F.-H. Dai, Y. Liu, Q.-M. Wang, J.-J. Zheng, L. Xu, E. C. Holmes, and Y.-Z. Zhang, A new coronavirus associated with human respiratory disease in China. Nature, 579 (7798), 265–269, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2008-3>
- [4] B. Kulkarni, and V. Anantharama, Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. Science of the Total Environment, 743, 1–7, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>
- [5] Shortage of personal protective equipment endangering health workers worldwide; World Health Organization of the United Nations. <https://www.who.int/news/item/03-03-2020-shortage-of-personal-protective-equipment-endangering-health-workers-worldwide>, Accessed 30 May 2022.

- [6] İç İşleri Bakanlığı: 81 il valiliğine kapalı alanlarda maske kullanımı genelgesi gönderildi. 27 Nisan 2022. <https://www.icisleri.gov.tr/81-il-valiligine-kapali-alanlarda-maske-kullanimi-genelgesi-gonderildi>
- [7] S. Oğur, Ş. Hayta, H. Durmaz Bekmezci, Covid -19 pandemisi sürecinde gıda güvenliği riskleri ve önlemleri. Sağlık, Tarım ve Gıda: Covid-19 Küresel Salgının Siyasi, Sosyal ve Ekonomik Yansımaları. 91-100. (Ed. K.A. Koçak), Vega Basım Hizmetleri, Ankara, TASAV 2020. ISBN:978-605-66939-4-6 https://www.tasav.org/media/k2/attachments/Covid-19_K%C3%BCresel_Salg%C4%B1n%C4%B1n_Siyasi,_Sosyal_ve_Ekonomik_Yans%C4%B1malar%C4%B1_web.pdf, Accessed 30 May 2022.
- [8] D. Karakuş, E. Avşar, Covid-19 Pandemi sürecinde Türkiye’de hastanelerde alınan önlemlerin ve uygulamaların incelenmesi ve değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 35 564-572. 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1086478>
- [9] M. D. Vaverková, E. K. Paleologos, A. Dominijanni, E. Koda, C. S. Tang, W. Malgorzata, Q. Li, N. Guarena, A. M. O. Mohamed, C. S. Vieira, M. Manassero, B. C. O. Q. X. M. Win Bo, D. Adamcova, A. P. U. M. Anand, A. Mohammad, V. S. N. S. Goli, G. Kuntikana, E. M. P. S. Pathak, D. N. Singh, Municipal solid waste management under COVID-19: challenges and recommendations. Environmental Geotechnics, 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00082>
- [10] L. Willis, Are We Burying Ourselves In PPE Waste?: The impact of COVID-19 on our waste stream could last decades. 2020. <https://emagazine.com/are-we-burying-ourselves-in-ppe-waste/>, Accessed 30 May 2022)
- [11] J. C. Prata, A. L. P. Silva, T. R. Walker, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. Environmental Science and Technology, 54 (13), 7760–7765, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02178>
- [12] D. Hantoko, X. Li, A. Pariatamby, K. Yoshikawa, M. Horttanainen and M. Yan, Challenges and practices on waste management and disposal during COVID-19 pandemic. Journal of Environmental Management. 286, 112140, 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112140>
- [13] G. Kampf, D. Todt, S. Pfaender and E. Steinmann, Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. The Journal of Hospital Infection 104 (3): 246–251. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.01.022>
- [14] N. van Doremalen, T. Bushmaker, D. H. Morris, M. G. Holbrook, A. Gamble, B. N. Williamson, A. Tamin, J. L. Harcourt, N. J. Thornburg, S. I. Gerber, J. O. Lloyd-Smith, E. de Wit and V. J. Munster, Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. New England Journal of Medicine, 382, 1564–1567, 2020. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
- [15] Y. Ye, R. M. Ellenberg, K. E. Graham and K. R. Wigginton, Survivability, partitioning, and recovery of enveloped viruses in untreated municipal wastewater. Environmental Science and Technology, 50 (10), 5077–5085, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00876>
- [16] A. W. H. Chin, J. T. S. Chu, M. R. A. Perera, K. P. Y. Hui, H. L. Yen, M. C. W. Chan, M. Peiris and L. L. M. Poon, Stability of SARS-CoV-2 in different environmental conditions. The Lancet Microbe, 1 (1), e10, 2020. [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30003-3](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30003-3)
- [17] L. D. Nghiem, B. Morgon, E. Donner and M. D. Short, The COVID-19 pandemic: Considerations for the waste and wastewater services sector. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 1, 100006, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100006>
- [18] H. B. Sharma, K. R. Vanapalli, V. R. S. Cheela, V. P. Ranjan, A. K. Jaglan, B. Dubey, S. Goel and J. Bhattacharya, Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. Resources, Conservation and Recycling, 162, 105052, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>
- [19] R. Suman, M. Javaid, A. Haleem, R. Vaishya, S. Bahl and D. Nandan, Sustainability of coronavirus on different surfaces. Journal of Clinical and Experimental Hepatology, 10 (4), 386–390. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jceh.2020.04.020>
- [20] G. Qu, X. Li, L. Hu and G. Jiang, An imperative need for research on the role of environmental factors in the transmission of novel coronavirus (COVID-19). Environmental Science and Technology, 54 (7), 3730–3732, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01102>
- [21] M. P. G. Mol, and S. Caldas, Can the Human Coronavirus Epidemic Also Spread through Solid Waste? Waste Management and Research, 38, 485-486. 2020. <https://doi.org/10.1177/2F0734242X20918312>
- [22] T. D. T. Oyedotun, O. F. Kasim, A. Famewo, T. D. Oyedotun, S. Moonsammy, N. Ally and D. M. Renn-Moonsammy, Municipal waste management in the era of COVID-19: Perceptions, practices and potentials for research in developing countries. Research in Globalization, 2, 100033. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resglo.2020.100033>
- [23] C. S. Tang, E. K. Paleologos, C. Vitone, Y. J. Du, J. S. Li, N. J. Jiang, Y. F. Deng, J. Chu, Z. Shen, E. Koda, A. Dominijanni, X. Fei, M. D. Vaverkova, P. Osinski, X. Chen, A. Asadi, M. R. H. Takeuchi, M. W. Bo, H. Abuel-Naga, E. C. Leong, A. Farid, T. Baser, B. O’Kelly, B. Jha, V. S. N. S. Goli and D. N. Singh, Environmental geotechnics: challenges and opportunities in the post COVID-19 world. Environmental Geotechnics, 8 (3), 172-192, 2021. <https://doi.org/10.1680/jenge.20.00054>

- [24] T. M. Straub, I. L. Pepper and C. P. Gerba, Persistence of viruses in desert soils amended with anaerobically digested sewage sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, 58, 636–641, 1992. <https://doi.org/10.1128/aem.58.2.636-641.1992>
- [25] P. Roy, A. K. Mohanty, A. Wagner, S. Sharif, H. Khalil and M. Misra, Impacts of COVID-19 Outbreak on the Municipal Solid Waste Management: Now and beyond the Pandemic. *ACS Environmental Au.1* (1), 32-45, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.1c00005>
- [26] B. Henneberry, *How Surgical Masks are Made*. Thomas Publishing Company, 2020. <https://www.thomasnet.com/articles/other/how-surgical-masks-are-made/#:~:text=Masks%20are%20made%20on%20a,se nt%20out%20of%20the%20factory>. Accessed 30 May 2022.
- [27] H. J. Choi, (2020). COVID-19 pandemic has spurred materials researchers to develop antiviral masks. *Chemical Engineering News* (Dinsa Sachan haberi), 98 (31), 2020. ISSN 0009-2347 Copyright © 2022. American Chemical Society. <https://cen.acs.org/safety/COVID-19-pandemic-spurred-materials/98/i31>, Accessed 30 May 2022.
- [28] F. S. Quan, I. Rubino, S. H. Lee, B. Koch, H. J. Choi, Universal and reusable virus deactivation system for respiratory protection. *Scientific Reports*, 7 (1), 39956, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep39956>
- [29] Association of Cities and Regions for Sustainable Resource Management; ACR, *Municipal Waste Management and COVID-19*. 2020. <https://www.acrplus.org/en/municipal-waste-management-covid-19>. Accessed 30 May 2022.
- [30] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan and K. Techato, The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 91, 812–21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.088>
- [31] J. Langley, Waste sector receives ‘key worker’ status. 20 March 2020. Letsrecycle.com. <https://www.letsrecycle.com/news/waste-sector-receives-key-worker-status/> Accessed 29 July 2022.
- [32] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Tek kullanımlık maske, eldiven gibi kişisel hijyen malzeme atıklarının yönetiminde Covid-19 tedbirleri. Genelge 2020/12. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/gng2020-16-cov-d-19-20200408101457.pdf> Accessed 30 May.2022.
- [33] Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete Sayı: 29959 ve Tarih: 25.01.2017. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=23273&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> Accessed 06.Oct.2022.
- [34] E. Koda and P. Osinski, Bentonite cut-off walls: solution for landfill remedial works. *Environmental Geotechnics*. 4 (4): 223–232, 2017. <https://doi.org/10.1680/jenge.14.00022>
- [35] European Commission, *Waste Management in the Context of the Coronavirus Crisis*. 14 April 2020. EC, Brussels, Belgium. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/waste_management_guidance_dg-env.pdf Accessed 30 May 2022
- [36] L. Kaufman and E. Chasan, Climate adaptation: cities wonder whether recycling counts as essential during the virus. *Bloomberg Law*, 27 March 2020. <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/cities-wonder-whether-recycling-is-essential-during-virus> Accessed 30 May 2022.
- [37] A. Almasi, M. Mohammadi, A. Azizi, Z. Berizi, K. Shamsi, A. Shahbazi and S. A. Mosavi, Assessing the knowledge, attitude and practice of the Kermanshahi women towards reducing, recycling and reusing of municipal solid waste. *Resources, Conservation Recycling*, 141, 329–338, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.017>
- [38] C. Nzediegwu and S. X. Chang, Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries. *Resources, Conservation & Recycling*, 161,104947. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104947>
- [39] S. Yu and H. Dong, Uncover cost–benefit disparity of municipal solid waste incineration in Chinese provinces. *Sustainability*. 12 (2), 697, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12020697>.
- [40] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union* L312/3. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj> Accessed 30 May 2022.
- [41] European Centre for Disease Prevention and Control ECDC, *Infection Prevention and Control and Preparedness for COVID-19 in Healthcare Settings – third update*. 13 May 2020. ECDC, Stockholm, Sweden, Technical Report. https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Infection-prevention-control-for-the-care-of-patients-with-2019-nCoV-healthcare-settings_third-update.pdf Accessed 30.05.2022)
- [42] Occupational Safety and Health Act; OSHA, *Occupational Exposure to COVID-19; Emergency Temporary Standard; Interim Final Rule*. 2021. <https://www.osha.gov/laws-regs/federalregister/2021-06-21> , Accessed 29 July 2022
- [43] Y. Liu, Z. Ning, Y. Chen, M. Guo, Y. Liu, N. K. Gali, L. Sun, Y. Duan, J. Cai, D. Westerdahl, X. Liu, K. Xu, K. Ho, H. Kan, Q. Fu and K. Lan, Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*, 582 557–560, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2271-3>.
- [44] E. Çelen, *Salgın günlerinde atık yönetimi*. 06.06.2020. Escarus Blog, 2020. <https://www.escarus.com/salgin-gunlerinde-atik-yonetimi> Accessed 30 May 2022.

- [45] A. N. Bratsev, V. E. Popov, A. F. Rutberg and S. V. Shtengel, A facility for plasma gasification of waste of various types. *High Temperature*, 44, 823–828, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10740-006-0099-7>
- [46] H. C. Liu, J. X. You, C. Lu and Y. Z. Chen, Evaluating healthcare waste treatment technologies using a hybrid multi-criteria decision making model. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 41, 932–42, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.061>
- [47] World Health Organization, Overview of technologies for the treatment of infectious and sharp waste from health care facilities. 2019. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516228> Accessed 29 July 2022.
- [48] N. Ribeiro, G. C. Soares, V. Santos-Rosales, A. Concheiro, C. Alvarez-Lorenzo, C. A. Garcia-Gonzalez A. L. Oliveira, A new era for sterilization based on supercritical CO₂ technology. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 108 (2), 399–428, 2019. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34398>.
- [49] A. Rubabi, M. M. Khan, F. Uddin, Y. A. Bangash and S. A. A. Taqvi, A Study on AI-based Waste Management Strategies for the COVID-19 Pandemic. *ChemBioEng Reviews*, 9 (2), 212-226, 2022 <https://doi.org/10.1002/cben.202100044>





Elma posasından biyohidrojen üretimine farklı yükleme oranlarının etkisi

Effect of different loading rates on biohydrogen production from apple pulp

Furkan Baş^{1*}, Hamdi Muratçobanoğlu², Begüm Öznur Gökçek³, Sevgi Demirel⁴

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Biyosistem Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
^{2,3,4} Niğde Ömer Halisdemir University, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Küresel çevre problemleri ve modern dünyanın artan enerji talebi alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları arayışını ortaya çıkarmıştır. Alternatif enerji kaynaklarının başında ise yüksek enerji içeriğine sahip olması, enerji taşıyıcısı olması ve çevre dostu olması gibi avantajları nedeniyle hidrojen gelmektedir. Hidrojen üretim prosesleri; elektrokimyasal yöntemler, termal yöntemler ve biyolojik hidrojen üretimi olarak sıralanabilir. Bu yöntemler arasında daha sürdürülebilir olması nedeniyle biyolojik yöntemler ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada, biyolojik bir proses olan karanlık fermantasyon yöntemi ile elma posasından biyohidrojen üretimi incelenmiştir. Elma posası kullanılarak, aşı çamuruna uygulanan fiziksel ön işlem (90°C- 30 dk) sonrası farklı substrat/aşı (S/I) yükleme oranlarında kesikli reaktörlerden elde edilen biyohidrojen verimleri karşılaştırılmıştır. En iyi performansı gösteren S/I 2 yükleme koşullarında uçucu katı başına (UK) 208 ml/gUK biyogaz ve 18 mlH₂/gUK biyohidrojen üretimi gerçekleşmiştir. Mikrobiyal dağılım sonuçları incelendiğinde *Lactobacillus*, *Clostridium* ve *Lachnospiraceae* türlerinin en baskın türler olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Biyohidrojen, Elma posası, Karanlık fermantasyon, Metagenomik analiz

Abstract

Global environmental problems and the increasing energy demand of the modern world have revealed the search for alternative and renewable energy sources. Hydrogen is one of these sources and has advantages such as having high energy content, being an energy carrier and being environmentally friendly. Hydrogen production processes can be lined as electrochemical methods, thermal methods, and biological hydrogen production. Among these methods, biological methods come to the fore because they are more economical and sustainable. In this study, biohydrogen production from apple pulp by dark fermentation method, which is a biological process, was investigated. Biohydrogen yields obtained from batch reactors at different substrate/inoculum (S/I) ratios were compared after physical pretreatment on inoculum (90°C-30 min). S/I 2 was the best performance yielded for per volatile solid (VS) 208 ml/gVS biogas and 18 mlH₂/gVS biohydrogen production. When the microbial distribution results are examined, it is seen that *Lactobacillus*, *Clostridium* and *Lachnospiraceae* are the most dominant species.

Keywords: Biohydrogen, Apple pulp, Dark fermentation, Metagenomic analysis

1

1 Giriş

Nüfus artışı ve küreselleşme ile özellikle gelişmekte olan ülkelerin günlük ihtiyaçlarının karşılanması için gerekli olan enerji ihtiyaçları hızla artmakta ve bu durum yakıt tüketimindeki talepleri de arttırmaktadır. Bu da mevcut fosil yakıt rezervlerinin (petrol ve doğalgaz gibi) tükenme tehlikesini doğurmaktadır [1]. Günümüzde yenilenemeyen enerji kaynağı olan fosil yakıtlar dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %80'ini karşılamaktadır [2]. Karbon, hidrojen, kükürt ve azot gibi atomlar içeren fosil yakıtların tüketimi atmosfere karbon dioksit, sülfür dioksit ve karbon monoksit gibi gazlar salınmasına neden olmaktadır. Bu sera gazlarının uzun süreli çevreye salınımı küresel ısınma gibi çevreyi ve canlıları etkileyen olumsuz sonuçlar doğurmaktadır [3]. Yenilenebilir enerji kaynakları hızla tükenmekte olan ve yoğun CO₂ içeren fosil yakıtlara alternatif olarak geliştirilmektedir. Yakıtlardan meydana gelen CO₂ emisyonları yakıtın karbon içeriğine ve karbon/hidrojen

(C/H) oranına bağlıdır. Yakıttaki C/H oranı ne kadar düşük olursa, yakıtın enerji verimi de o kadar yüksek olur ve yanmadan kaynaklanan CO₂ emisyonu da düşer. Yakıt olarak kullanılan odun, kömür, petrol ve doğal gazla kıyaslandığında hidrojen, su buharı ve ısı dışında herhangi bir emisyon ortaya çıkarmamaktadır. Hidrojen gibi biyoyakıtların C/H oranı sıfırdır. Bu yüzden hidrojenin yakıt olarak kullanılması atmosfere salınan CO₂ miktarını azaltacağı düşünülmektedir. Hidrojen üretim teknolojisinin giderek gelişmesiyle tükenmekte olan fosil yakıtlara güçlü bir alternatif olacağı düşünülmektedir [4]. Avrupa Yeşil Mutabakatı ile 2050'de karbon nötr bir Avrupa yaratmak ve "Sınırdan karbon düzenlemesi" ile hidrojen enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazla ilgi çekmektedir. Hidrojen kütle bazında yüksek enerji yoğunluğuna sahip enerji taşıyıcısı olmasından dolayı fosil yakıtlardan üretilebilmesinin yanında biyokütle kaynakları kullanarak da üretilebilmektedir. Hidrojen üretimi için elektrokimyasal, termokimyasal ve biyolojik yöntemler

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: furkanbas@ohu.edu.tr (F. Baş)

Geliş / Received: 21.06.2022 Kabul / Accepted: 12.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1133871

uygulanmaktadır. Biyolojik yöntemlerle hidrojen üretiminin ekonomik bedeli ile ilgili çalışmalar incelendiğinde doğrudan biyofotolizde 2.13-7.24 \$/kg, dolaylı biyofotolizde 1.42 \$/kg ve karanlık fermentasyonda ise 7.54- 7.62 \$/kg aralığında olduğu görülmektedir [5]. Çevresel açıdan birçok faydası bulunan biyolojik yöntemlerin, elektrokimyasal ve termokimyasal yöntemlerle yarışabilir hale gelmesi için bu alanda yapılacak işletme koşullarının optimizasyonu ve mikroorganizmaların genetik modifikasyonu gibi konularda yeni nesil araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Hidrojen; biyofotoliz (doğrudan fotoliz-dolaylı fotoliz), fermentasyon (fotofermentasyon- karanlık-fermentasyon) veya hibrit prosesler [6,7] gibi biyolojik prosesler ile üretilebilmektedir. Bunlardan karanlık fermentasyon, heterotrofik mikroorganizmaların ışık yokluğunda organik maddeyi fermentasyonu atık azaltımı sağlarken hidrojen üretimini gerçekleştiren bir yöntemdir [8]. Karanlık fermentasyon prosesinde biyokütle kaynağı, anaerobik bakteriler yardımıyla belirli sıcaklıkta karanlık bir ortamda fermentasyona uğratılır ve hidrojen üretilir. Biyokütle kaynağı kullanılarak elde edilen hidrojen biyohidrojen olarak adlandırılmaktadır. Karanlık fermentasyon yöntemi ile hidrojen üreten sistemlerin verimi %85'lere kadar çıkabilmektedir [9]. Öte yandan yapılan güncel çalışmalar incelendiğinde karanlık fermentasyon yöntemi ile %99.5'e varan saflıkta hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir [10]. Tarım, ağaç işleme ve ormancılık atıkları, gıda atıkları, hayvansal ve kentsel katı atıklar, biyohidrojen üretimi için kullanılan biyokütle kaynaklarıdır [11]. Bu atıkların organik içerikleri birbirlerinden farklı olup buna bağlı olarak bu atıklardan üretilebilecek biyohidrojen miktarları da farklılık göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında biyokütle kaynağı olarak kullanılan elma, dünya çapında büyük üretim ve tüketim oranına sahip, besin ve ticari değeri yüksek bir ürün olmakla birlikte birçok endüstriyel alanda ve birçok şekilde kullanılmaktadır. 2017 verilerine göre, elma 83 milyon ton ile dünya çapında en çok üretilen üçüncü meyve olmuştur [12]. Bu üretimin 3 milyon tonu ise Türkiye'de gerçekleşmiştir ve bu üretim miktarıyla Türkiye elma üretiminde dünyada üçüncü sıradadır [13]. Elma üretimine bağlı olarak meyve suyu ve konsantresi işletmelerinde üretim için kullanılmayan ham, çürük, kusurlu meyveler ve posadan oluşan katı atıklar meydana gelmektedir. Endüstriyel faaliyetler sonucu oluşan organik atıkların enerji kaynağı olarak değerlendirilmesiyle atıkların bertaraf edilmesi sağlanırken, atıktan enerji elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, elma işleme endüstrisinden kaynaklanan atıkların doğaya zarar vermeden bertaraf edilmesi, öte yandan bu atıkların geri kazanımı sağlanarak hem döngüsel ekonomiye katkı sağlanması hem de yerli bir kaynaktan katma değeri yüksek ve verimli bir enerji kaynağı olan hidrojen üretimi amaçlanmıştır. Böylece hem ekolojik hem de ekonomik faydalar sağlanması mümkün olabilecektir. Biyohidrojen üretimini artırmak ve metan oluşturan bakterileri elimine etmek için kullanılan aşı çamuruna ön işlem uygulanmaktadır [14]. Bu ön işlemler fiziksel ve kimyasal yöntemlerdir. Fiziksel ön arıtma işlemleri; ısı, ultrason, UV, havalandırma, dondurma vs.

yöntemlerinden birisi ile yapılabilirken; kimyasal ön işlemler, pH, kimyasal aktivasyon ya da inhibisyon yöntemleri ile yapılabilmektedir. Ön işlem metodunun seçimi, baskın hale getirilmesi planlanan bakteri türüne göre değişmektedir. Çünkü her bakteri her stres uygulamasına farklı tepki vermektedir [15]. Biyokimyasal yöntemler ile H₂ üretiminde kesikli sistem işletme parametrelerinden biri de organik yükleme oranıdır, organik yükleme oranının optimize edilmesi gerçek ölçekli sistemler için hem ilk yatırım hem de işletme maliyetlerinin optimizasyonuna katkı sağlayabilmektedir. Bu çalışma ile gerçek bir elma işleme tesisi atıklarının (posa) kontrollü bir şekilde biyolojik bertarafında S/I oranının biyohidrojen üretimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada biyokütle atığından (elma posasından) biyohidrojen üretimi amacıyla toplam 500 ml, 150 ml çalışma hacmine sahip kesikli cam reaktörler kullanılmıştır. Farklı substrat/aşı oranlarının biyohidrojen üretimi üzerindeki etkisi S/I ise 0, 2, 4, 8 ve 10 grUK/grUK oranlarında araştırılmıştır.

2.1 Ön işlemler

Çalışmada kullanılan aşı çamuru Kayseri İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi anaerobik çürütücüsünden temin edilmiştir. Temin edilen çamur yüksek miktarda metan üreten mikroorganizmalar, düşük miktarda hidrojen üreten mikroorganizmalar içermektedir. Biyolojik atıksu arıtım tesislerinde kullanılan aşı, hidrojen üreten bakterileri bulundurmamasını yanı sıra hidrojen tüketen bakteriler de ihtiva ettiği için homoasetojenler ve metanojenler gibi hidrojen kullanan mikroorganizmaların baskılanması gerekmektedir. Baskılama işlemi genellikle aşının ısı arıtımı ile spor oluşturan fermente edici bakterinin dışındaki tüm mikroorganizmaların öldürülmesi ile başarılmaktadır [16-17]. Ek olarak, termal, havalandırma, UV, pH değiştirme, aktivasyon, inhibisyon gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal ön biyohidrojen üretim verimini artırmak için de çeşitli fiziksel ve kimyasal ön işlemler biyohidrojen üretim verimini artırmak için kullanılmaktadır. Ancak her bakteri kültürünün ön işlemlere vereceği tepki farklılık göstermektedir. Öte yandan, yapılan literatür taramaları sonucunda ileri atıksu arıtım tesislerinden alınan aşı çamurlarına uygulanan termal (ısıtma) ön işlemin hidrojen üretimindeki artışa katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır [18-19]. Bu nedenle, hidrojen üreten mikroorganizmaların baskın hale gelebilmesi için, aşı çamuruna 90°C'de 15 dakika boyunca termal ön işlem uygulanmıştır.

Çalışmada kullanılan elma atıkları, bölgede faaliyet gösteren elma işleme tesisinden temin edilmiştir. Elma atığı içerisinde bulunan kabuk, tohum ve sap gibi odunsu yapıları mikroorganizmalar tarafından sindirilmesi oldukça zordur. Bu gibi yapılar sistem verimini olumsuz etkileyebilmektedir, bu nedenle atığa mekanik ön işlem uygulanmıştır. Elma atığı, ev tipi parçalayıcı yardımıyla homojen lapa kıvamına getirilmiş ve bakterilerin daha kolay çürütme yapabilmelerine olanak sağlanmıştır. Parçalama işlemi uygulandıktan sonra lapa haline getirilen atık 60-80

mesh elekten geçirilerek atık genelinin aynı boyutta olması sağlanmıştır.

2.1.1 Kesikli reaktör kurulumu

Çalışmada optimum S/I oranını belirlemek için farklı S/I oranlarında üç paralelli kesikli reaktörler kurulmuştur. Ön işleme tabii tutulmuş aşı çamuru içerisine ilave edilen atığın reaktör içerisinde homojen bir şekilde dağılması için çalkalamalı inkübatörde 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Reaktörler çalkalamalı inkübatörden alındıktan sonra reaktörler içerisine iz element (1.25 g/L NaHCO₃; 0.5 g/L NH₄Cl; 0.25 g/L KH₂PO₄; 0.25 g/L CaCl₂; 0.032 g/L NiSO₄; 0.32 g/L MgSO₄ · 7H₂O; 0.02 g/L FeCl₂; 0.0144 g/L Na₂MoO₄ · 2H₂O; 0.023 g/L ZnCl₂; 0.021 g/L CoCl₂ 6H₂O; 0.01 g/L CuCl₂ 6H₂O ve 0.03 g/L MnCl₂ · 4H₂O) ilavesi yapılmıştır. Son olarak, reaktör içerisinde bulunan oksijen ve diğer reaktif gazların sıyrılması amacıyla, reaktör 10 dakika boyunca N₂ gazından geçirilmiş ve reaktörler sızdırmaz silikon contalı kapaklarla sıkıca kapatılmıştır.

Çalışmada karanlık fermantasyon yöntemi ile kurulan kesikli reaktörlerin etrafı alüminyum folyo sarılarak sıcaklık ve ışık yalıtımı sağlanmıştır. Reaktörlerin çalışma sıcaklığı 37°C olarak belirlenmiştir.

2.1.2 Analiz yöntemleri

Üretilen biyogaz reaktör içerisinde birikmekte ve basınç oluşturmaktadır. 12 saatlik aralıklarla, yer değiştirme prensibinden yararlanılarak toplam biyogaz hacmi şırınga ile belirlenmiştir. Alınan biyogaz örneğinin gaz kromatografi analizi ile biyogaz içindeki hidrojenin yüzde oranına bağlı olarak hacimsel miktarı hesaplanmıştır. Miktarı belirlenen gazın GC (Agilent 7820A) cihazı ile H₂, CO₂ ve metanojenlerin varlığını kontrol amaçlı olarak CH₄ analizleri yapılmıştır. Toplam organik karbon (TOK) ve toplam azot (TN) analizleri TOK analizörü (Shimadzu TOC analyzer-SSM) ile yapılmıştır. Uçucu yağ asitleri (UYA) ölçümleri Shimadzu marka GC-MS QP2010 Plus model cihazda yapılmıştır (kromatografik şartlar: enjeksiyon sıcaklığı 220 °C, kolon boyutları 30mx0.53mmx0.25 µm, kolon türü SupraWAX-280° Capillary Column, helyum taşıyıcı gaz hızı 1,5 ml/dk).

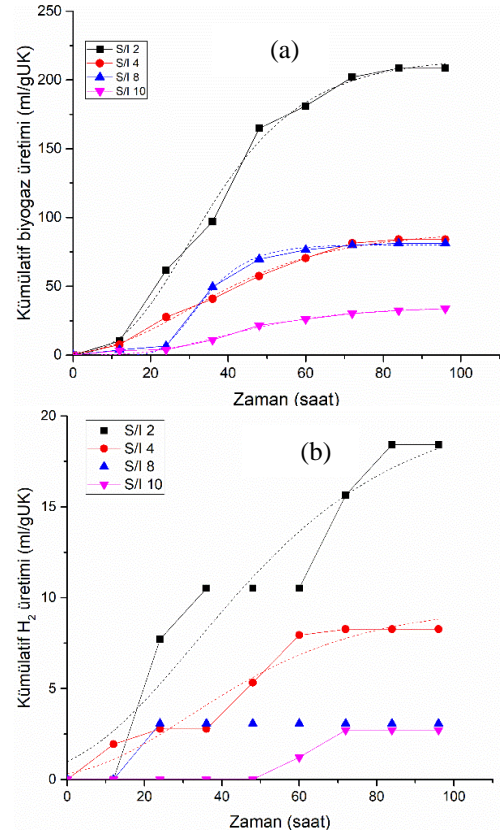
2.1.3 DNA izolasyonu ve dizileme

En uygun S/I oranını belirlemek için yapılan deneme sonuçlarında en yüksek H₂ verimi elde edilen S/I=2 reaktöründe mikrobiyal dağılımı belirlemek için 10 ml'lik biyofilm örneği alınmıştır. Alınan örnek DNA izolasyonu aşamasına kadar -20°C koşullarında saklanmıştır. Biyofilm örneğinde, DNeasy PowerSoil Kit (QIAGEN) kullanılarak, prosedürüne uygun bir şekilde DNA izolasyonu gerçekleştirilmiştir. DNA izolasyonu için 0.5 ml biyofilm örneği kullanılmıştır. İzole edilen DNA örneklerinin miktar ve kalitesi Quawell Nanodrop spektrofotometre (Q 5000, Quawell UV-VIS Spectrophotometer, USA) kullanılarak belirlenmiştir. DNA örneklerinin A 260/280 değerleri 1.8-2.0 olacak şekilde ayarlanmıştır. Mikrobiyal kompozisyondaki değişim yeni nesil dizileme tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla 16S rDNA V3-V4 gen bölgeleri hedefli olarak yeni nesil dizileme uygulaması gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Biyogaz ve biyohidrojen üretimi

Bu bölümde farklı yükleme oranlarında işletilmiş olan kesikli reaktörlerin biyogaz ve biyohidrojen üretimleri değerlendirilmiştir. Çalışmada 2, 4, 8, 10 gUK/gUK olmak üzere dört farklı S/I oranında denemeler gerçekleştirilmiştir. Kümülatif biyogaz ve biyohidrojen üretimleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



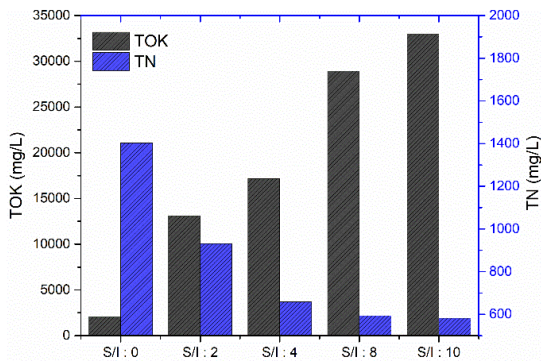
Şekil 1. Farklı yükleme oranlarındaki biyogaz* (a) ve biyohidrojen (b) üretimleri*

*Kontrol reaktörüne göre normalize edilmiştir.

S/I 2, 4, 8 ve 10 gUK/gUK yükleme oranlarındaki biyogaz üretimleri sırasıyla 208, 84, 81 ve 33 ml/gUK olarak belirlenmiştir. S/I oranının artırılması ile birim biyogaz üretiminde düşüş gözlemlenmektedir. Yükleme oranının artması ile birim mikroorganizma başına düşen besin miktarının artması sağlanmıştır, bu fazla yüklemenin mikroorganizmaların faaliyetlerinde baskılanmaya neden olduğu ve bu sebeple birim biyogaz üretiminde düşüşlerin gözlemlendiği düşünülebilir. Yükleme oranının yükseltilmesi ile gaz üretiminde düşüşler literatürde de gözlemlenmektedir [20]. Biyohidrojen üretimleri S/I 2, 4, 8 ve 10 gUK/gUK yükleme oranında sırası ile 18, 8, 3 ve 2.7 mlH₂/gUK mertebesindedir. Biyogaz üretimine benzer olarak biyohidrojen üretimi de yükleme oranının artırılmasıyla düşüş göstermektedir. S/I oranlarının artırılması ile sistemde besin miktarının artışına bağlı olarak toplam üretilen H₂ miktarının da artması beklenebilir. Fakat, karanlık fermantasyon son ürünlerinden biri de UYA'dır, Son ürünlerin sistemde birikiyor olması sistemdeki

biyokimyasal reaksiyonların hızlarını düşürebilmekte veya tamamen durdurabilmektedir [21]. Buna bağlı olarak çalışmada S/I oranının artırılması ile (fazla besin sağlanması koşulu) sistemde UYA birikimlerinin olduğu bu sebeple biyokimyasal reaksiyonun yavaşladığı ve sonuç olarak tamamen durduğu düşünülmektedir.

Farklı yükleme oranlarındaki TOK ve TN değerleri Şekil 2’de verilmektedir. S/I 2, 4, 8 ve 10 gUK/gUK yükleme oranlarında çıkış TOK konsantrasyonları sırası ile 13124, 17168, 28913 ve 32940 mg/L, çıkış TN konsantrasyonları sırası ile 930, 658, 593 ve 581 mg/L mertebesindedir. TOK değerlerindeki yükseliş yüklenen besin miktarının artışı ile paralellik göstermektedir, çözünür forma geçen karbonlu besinin çözeltiye geçmesi ile TOK konsantrasyonunda artışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 2. Farklı yükleme oranlarındaki çıkış TOK ve TN konsantrasyonları

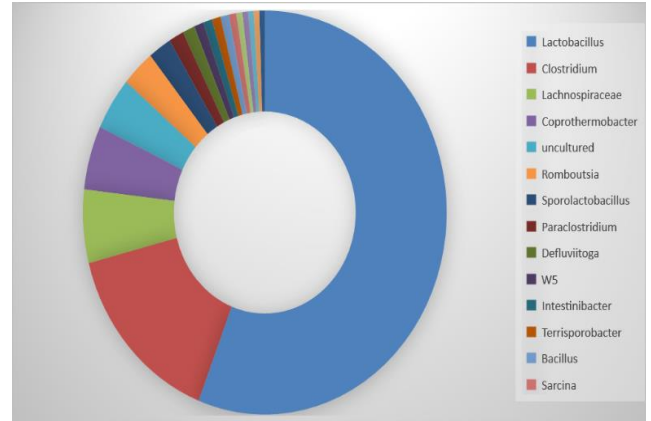
Tablo 1’de farklı yükleme oranlarındaki UYA sonuçları gösterilmektedir. S/I 2, 4, 8 ve 10 gUK/gUK yükleme oranlarındaki UYA konsantrasyonları sırasıyla 56.6, 49.3, 70.6 ve 88.1 mmol seviyesindedir, S/I 4 hariç olmak üzere UYA konsantrasyonlarının yükleme oranına bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumun anaerobik asit üretimi safhasında mikroorganizmaların fazla besinleri indirgeyerek UYA’ya çevirmesi yolu ile gerçekleştiği düşünülmektedir.

Tablo 1. Farklı yükleme oranlarındaki UYA konsantrasyonları

	S/I: 0	S/I: 2	S/I: 4	S/I: 8	S/I: 10
Acetic acid (CAS)	2.39	40.39	44.75	36.59	87.0
Propanoic acid (CAS)	0	0	0.36	0.28	0
Propanoic acid, 2-methyl- (CAS)	0.09	0.15	0.14	0.08	0.07
Butanoic acid (CAS)	1.01	1.37	3.17	3.13	0.51
iso-VALERIC ACID	0.13	0.30	0.26	0.21	0.23
Pentanoic acid (CAS)	0.16	0.16	0.15	0.15	0
Pentanoic acid, 4-methyl-	0.05	0.10	0.07	0.03	0.006
Hexanoic acid (CAS)	0.13	0.10	0.09	0.07	0.06
Heptanoic acid	0.27	0.26	0.27	0.24	0.21

3.2 H₂ üretimi ve mikrobiyal dağılım arasındaki ilişki

S/I=2 oranındaki reaktörden alınan biyofilm örneğine ait mikrobiyal dağılım Şekil 3’te görülmektedir. Mikrobiyal dağılım sonuçları incelendiğinde *Lactobacillus*, *Clostridium* ve *Lachnospiraceae* türlerinin en baskın türler olduğu görülmektedir (Şekil 3). Biyofilm yapısında en çok bulunan üçüncü mikroorganizma grubunu *Lachnospiraceae* oluşturmaktadır. Bu gruptaki bakteriler bütirat üreten anaerobik bakteriler olarak bilinmektedir [22]. *Clostridium* türleri H₂ üretimi ile ilgili çalışmalarda en sık rastlanan fermentatif anaerobik bakteriler arasında yer almaktadır. *Lactobacillus* ise karbonhidrat fermentasyonundan sorumlu gram pozitif bakteri grupları arasında yer alır. *Lactobacillus* ve *Clostridium* türlerinin kompleks atıkların fermentasyonunda birlikte görev aldığına sıkça rastlanmaktadır [23]. Daha önce muz ve kahve atıkları ile yapılan iki farklı çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir [24-25]. *Lactobacillus* türleri şeker kamışı gibi lifli yapıdaki karbonhidratı fermente ederek laktik asit ve asetik asit üretimine katkıda bulunurken *Clostridium* türleri bu iki asiti ve bütirik asiti kullanarak H₂ üretimini gerçekleştirirler [26]. Literatürle uyumlu bir şekilde *Lactobacillus* ve *Clostridium*’un birlikte bulunması sonucu ortaya çıkan sinerjistik etkinin H₂ üretim performansını olumlu etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 3. Mikrobiyal dağılım

4 Sonuçlar

Elma posası atıklarından biyohidrojen üretiminde farklı S/I oranlarının verim üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, en iyi performansı gösteren S/I 2 yükleme koşullarında uçucu katı başına (UK) 208 ml/gUK biyogaz ve 18 mlH₂/gUK biyohidrojen üretimi gerçekleşmiştir. S/I oranları arttıkça biyohidrojen üretimi olumsuz etkilenmiş ve verim düşüşü gözlemlenmiştir. En iyi reaktör koşullarında yapılan metagenomik analizlerde *Lactobacillus*, *Clostridium* ve *Lachnospiraceae* türlerinin baskın türler olduğu görülmüştür. Biyokütleden H₂ üretim proseslerinin büyük ölçekte kullanımı ve ticarileşmesi konusundaki en önemli problem düşük H₂ verimi ve üretim hızıdır. Bu çalışmada elde edilen biyohidrojen verimlerinin fosil kaynaklardan hidrojen üretimi ile yarışabilir boyuta taşınması için daha ileri araştırmalara ihtiyaç vardır.

Tablo 2. Farklı çalışma koşullarında karanlık fermantasyon ile biyohidrojen üretimi

Atık	Aşısı Kültürü	Reaktör	°C	HAS	Üretim	Ref.
Meyve-sebze atıkları	Atık su arıtım tesislerinde kullanılan anaerobik çamur	Yarı sürekli cam reaktör	35	3 gün	52 ml/gUK	[27]
Şeker pancarı posası				3 gün	17-37 ml/gUK	
Fasulye atık suyu	Atık su arıtım tesisinden alınan çamur	Kesikli cam reaktör	37	24 saat	80 ml/gUK	[28]
Patates atık suyu				18 saat	150 ml/gUK	
Elma posası	İleri biyolojik atık su arıtım tesisinden alınan çamur			3-5 gün	18 ml/gUK	Bu çalışma

*HAS: Hidrolik Alınma Süresi

Tablo 2’de farklı çalışma koşullarında (atık çeşidi, kullanılan aşısı kültürü, reaktör tipi, ortam sıcaklığı, işletme süresi) karanlık fermantasyon yöntemiyle biyohidrojen üretmek amacıyla yapılan çalışmalar görülmektedir. Tablo 2 incelendiğinde aşısı kültürü, reaktör tipi, sıcaklık ve işletme süresi aynı olmasına rağmen meyve-sebze atıkları ve şeker pancarı posası arasında üretim farklarının olduğu görülmektedir. Bu farkın atıkların içerisinde bulunan, mikroorganizmaların kullanabileceği besinlerin çeşitliliği ya da bu besinlerin organizma tarafından parçalanabilme kolaylığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan elma posası atığı için çalışma koşulları ve biyohidrojen üretimi dikkate alındığında elde edilen sonuçlar literatürde yapılan benzer çalışmalarla tutarlılık göstermektedir. Ek olarak, literatür bulguları ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde karanlık fermantasyonla biyohidrojen üretim sürecinde iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla reaktördeki mikrobiyal faaliyetleri desteklemek amacıyla nanopartikül ilavesi gibi çalışmalar yapılabilir ve bu sayede üretim verimi ve miktarı artırılabilir.

Teşekkür

Yazarlar, 121Y452 no’lu projeye desteklerinden ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) teşekkürü borç bilirlir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] R. Haron, R. Mat, T. Abdullah, and R. Rahman, Overview on utilization of biodiesel by-product for biohydrogen production, *Journal of Cleaner Production*, 172, 314-324, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.160>
- [2] M. Ali, Q. Shafique, D. Kumar, S. Kumar and S. Kumar, Energy and exergy analysis of a 747-MW combined cycle power plant Guddu, *International*

- Journal of Ambient Energy*, 41(13), 1495-1504, 2020. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1517680>
- [3] J. Ratnasingam, G. Ramasamy, F. Ioras and N. Parasuraman, Assessment of the carbon footprint of rubberwood sawmilling in peninsular Malaysia: Challenging the green label of the material, *BioResources*, 12(2), 3490-3503, 2017. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3490-3503>
- [4] B. Hüner, N. Demir and M.F. Kaya, Electrodeposition of NiCu bimetal on 3D printed electrodes for hydrogen evolution reactions in alkaline media, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12136-12146, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.009>
- [5] S. F. Ahmed, N. Rafa, M. Mofijur, I.A. Badruddin, A. Inayat, M.S. Ali and T.M. Yunus Khan, Biohydrogen production from biomass sources: metabolic pathways and economic analysis, *Frontiers in Energy Research*, 9, 753878, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.753878>
- [6] G. Balachandar, N. Khanna and D. Das, Biohydrogen production from organic wastes by dark fermentation, In *Biohydrogen* (pp. 103-144), 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59555-3.00006-4>
- [7] L. Zhao, Z. Wang, H.Y. Ren, C. Chen, J. Nan, G. L. Cao, and N. Q. Ren, Residue cornstalk derived biochar promotes direct bio-hydrogen production from anaerobic fermentation of cornstalk, *Bioresource Technology*, 320, 124338, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124338>
- [8] G. Kumar, T. Mathimani, E.R. Rene, and A. Pugazhendhi, Application of nanotechnology in dark fermentation for enhanced biohydrogen production using inorganic nanoparticles, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13106-13113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.131>
- [9] H. Singh, S. Rout, and D. Das, Dark fermentative biohydrogen production using pretreated *Scenedesmus obliquus* biomass under an integrated paradigm of biorefinery, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(1), 102-116, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.018>

- [10] D. Cheng, H. H. Ngo, W. Guo, S. W. Chang, D. D. Nguyen, L. Deng, L. and N. B. Hoang, Advanced strategies for enhancing dark fermentative biohydrogen production from biowaste towards sustainable environment, *Bioresource Technology*, 127045, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127045>
- [11] L. Rosa and M. Mazzotti, Potential for hydrogen production from sustainable biomass with carbon capture and storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112123, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112123>
- [12] Statista, Apple production worldwide, <https://www.statista.com/statistics/961248/production-of-apples-worldwide/> Erişim tarihi: 17.09.2021.
- [13] USDA Foreign Agricultural Service, Turkey: Fresh Deciduous Fruit Annual, <https://www.fas.usda.gov/data/turkey-fresh-deciduous-fruit-annual-5> . Erişim tarihi: 17.09.2021
- [14] J. R. Banu, J. Merrylin, T. M. Usman, R. Y. Kannah, M. Gunasekaran, S. H. Kim and G. Kumar, Impact of pretreatment on food waste for biohydrogen production: a review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(36), 18211-18225, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.176>
- [15] Y. Yin, J. Hu and J. Wang, Enriching hydrogen-producing bacteria from digested sludge by different pretreatment methods, *International journal of hydrogen energy*, 39(25), 13550-13556, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.145>
- [16] R. Ali, F. Saravia, A. Hille-Reichel, J. Gescher and H. Horn, Propionic acid production from food waste in batch reactors: Effect of pH, types of inoculums, and thermal pre-treatment, *Bioresource technology*, 319, 124166, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124166>
- [17] D. R. S. Lima, O. F. H. Adarme, B. E. L. Baêta, L. V. A. Gurgel and de S. F. Aquino, Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis, *Industrial Crops and Products*, 111, 684-693, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.048>
- [18] T. N. B. Dung, C. H. Lay, D. D. Nguyen, S. W. Chang, J. R. Banu, Y. Hong and J. H. Park, Improving the biohydrogen production potential of macroalgal biomass through mild acid dispersion pretreatment, *Fuel*, 332, 125895, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125895>
- [19] Y. Wong, T. Wu, J. Juan, A Review of Sustainable Hydrogen Production Using Seed Sludge Via Dark Fermentation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 471-482, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.008>
- [20] P. Mishra, F. Ameen, R. M. Zaid, L. Singh, Z. Ab Wahid, M. A. Islam and S. Al Nadhari, Relative effectiveness of substrate-inoculum ratio and initial pH on hydrogen production from palm oil mill effluent: kinetics and statistical optimization, *Journal of Cleaner Production*, 228, 276-283, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.317>
- [21] S. Srikanth and S. V. Mohan, Regulating feedback inhibition caused by the accumulated acid intermediates during acidogenic hydrogen production through feed replacement, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(19), 10028-10040, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.152>
- [22] L. Ge, J. Qi, B. Shao, Z. Ruan, Y. Ren, S. Sui and W. Song, Microbial hydrogen economy alleviates colitis by reprogramming colonocyte metabolism and reinforcing intestinal barrier, *Gut Microbes*, 14(1), 2013764, 2022. <https://doi.org/10.1080/19490976.2021.2013764>
- [23] A. Sikora, M. Błaszczak, M. Jurkowski and U. Zielenkiewicz, Lactic acid bacteria in hydrogen-producing consortia: on purpose or by coincidence? *INTECH open science open minds*, 488-514, 2013. <http://dx.doi.org/10.5772/50364>
- [24] R. C. da Silva Mazareli, A. C. Villa-Montoya, T. P. Delforno, V. B. Centurion, V. M. de Oliveira, E. L. Silva, and M. B. A. Varesche, Metagenomic analysis of autochthonous microbial biomass from banana waste: Screening design of factors that affect hydrogen production, *Biomass and bioenergy*, 138, 105573, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105573>
- [25] A. C. V. Montoya, R. C. da Silva Mazareli, T. P. Delforno, V. B. Centurion, V. M. de Oliveira, E. L. Silva, and M. B. A. Varesche, Optimization of key factors affecting hydrogen production from coffee waste using factorial design and metagenomic analysis of the microbial community, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4205-4222, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.062>
- [26] M. Pérez-Rangel, J. E. Barboza-Corona, M. Navarro-Díaz, A. E. Escalante and I. Valdez-Vazquez, The duo *Clostridium* and *Lactobacillus* linked to hydrogen production from a lignocellulosic substrate, *Water Science and Technology*, 83(12), 3033-304, 2021. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.186>
- [27] W. Cieciora, S. Borowski, A. Otlewska, Biohydrogen production from fruit and vegetable waste, sugar beet pulp and corn silage via dark fermentation, *Renew Energy* 153:1226–1237, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.085>
- [28] A. H. Salem, R. Brunstermann, T. Mietzel, Effect of pretreatment and hydraulic retention time on biohydrogen production from organic wastes, *Int Journal of Hydrogen Energy*, 1–10, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.114>





Reçine atıksuyu karakterizasyonu Resin wastewater characterization

Zeynep Özcan¹ , Gamze Sönmez² , Mustafa Işık^{3,*} ,

^{1,2,3} Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Öz

Endüstriyel atık suların neden olduğu su kirliliği problemleri günümüzde oldukça yaygındır. Bu çalışmada, halihazırda tehlikeli atık olarak bertarafı pahalı bir şekilde gerçekleştirilen reçine atık sularının tekno-ekonomik olarak arıtımına ışık tutacak karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel atık suların karakterizasyonuna esas olan klasik parametreler ile yapılan ölçüm sonuçları atık suyun üretim proseslerinden kaynaklanan yüksek derecede organik kirlilik içerdiğini (KOİ=19875 mg/L, TOK=6143 mg/L, BOİ₅=5879 mg/L) göstermiştir. Yapılan genel toksisite testleri atık suyun hacimsel olarak *Daphnia* sp. (24 saat) organizmaları dikkate alındığında tatlı sularda LC₅₀=%1.25, anaerobik ve aerobik karışık kültürler dikkate alındığında sırasıyla 24 saatlik IC₅₀=%16.1, ve 48 saatlik IC₅₀=%15.0 toksik ve inhibe edici seviyeler tespit edilmiştir. Halihazırda yakılarak çok yüksek maliyetle bertarafı yapılan bu atıksuyun, belli seviyelerde biyolojik olarak arıtımının mümkün, alıcı ortam deşarj standartlarını sağlayacak ölçüde arıtımının ise daha ileri teknolojilerle mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Arıtılabilirlik, Atıksu, Reçine, Maliyet, Toksisite.

1 Giriş

Endüstriyel gelişmeler ve bu gelişmelerin neden olduğu çevresel etkiler ülkemizde ve tüm dünyada bu konudaki endişelerin de artmasına neden olmaktadır. Sürdürülebilir çevresel teknolojilerin önem kazandığı günümüzde özellikle endüstriyel atıksuların etkin şekilde arıtımının yanında hem ilk yatırım hem de işletme giderleri açısından ekonomik olarak uygulanabilir en uygun arıtım tekniklerinin seçimi oldukça kompleks ve uzmanlık gerektiren bir işlemdir.

Evsel atıksuların aksine endüstriyel atıksuların arıtımı için karakterizasyon çalışmaları hedeflere uygun şekilde yapılmalıdır. Endüstriyel atıksuların karakterizasyonu ve arıtım teknolojileri ile ilgili literatür bilgileri mevcut olsa da aynı ürünün üretiminde bile üretim proseslerindeki farklılıklardan dolayı farklı yapıda atıksular oluşabilmektedir. Üretimi giderek artan ve buna bağlı olarak da farklı içerikli atıksuları ile dikkat çeken reçine şekiller ve atıksuları bu konuda verilebilecek en önemli örneklerden bir tanesidir.

Abstract

Water pollution problems caused by industrial wastewater are quite common today. In this study, characterization studies were carried out to shed light on the techno-economic treatment of resin wastewater, which is currently expensive to dispose of as hazardous waste. The measurement results with the classical parameters, which are the basis for the characterization of industrial wastewater, showed that the wastewater contains a high degree of organic pollution (COD=19875 mg/L, TOC=6143 mg/L, BOD₅=5879 mg/L) originating from the production processes. The general toxicity tests carried out show that *Daphnia* sp. with considering the organisms, the wastewater by volume LC₅₀=1,25% with 24 hour in fresh water, IC₅₀=16.1% with 24 hour, and IC₅₀=15,0% with 48 hour, respectively, when anaerobic and aerobic mixed cultures are taken into account, toxic and inhibitory levels were determined. It has been concluded that this wastewater, which is currently disposed of at a very high cost by incineration, can be biologically treated at certain levels, and that it can be treated with more advanced technologies to meet the receiving environment discharge standards.

Keywords: Resin, Cost, Toxicity, Treatability, Wastewater.

Reçine üretim atıksuları içerdikleri kimyasal ve biyolojik kirlilik parametreleri bakımından karakterize edebilmesi oldukça zor olan sulardır. Atıksuyun karakterizasyonu için atıksu analizinin yanısıra, prosesten çıkan ürün ve üretimde kullanılan yöntem ile ham maddelerde karakterizasyon çalışmasını etkilemektedir. Genel olarak bakıldığında yüksek organik madde içeriğine sahip toksik maddeler içeren bu tür atıksuların arıtılabilirliği ile ilgili fikir elde edebilmek için atıksuyun profilini en iyi şekilde ortaya koyacak karakterizasyon çalışmaları oldukça önemlidir[1, 2]

Reçine atıksularının karakterizasyonu ve arıtımı için literatüre bakıldığında farklı türdeki reçinelerin üretimi ve buna bağlı olarak değişik arıtım yöntemleri önerilmesine rağmen atıksuyun yapısal farklılıklarından dolayı spesifik bir arıtım işlemi bulunmamaktadır.

Yapılan bir çalışmada aminoplastik reçine üreten endüstrilerden gelen atık suların, yüksek seviyede organik madde ve nitrojen bileşikleri ile karakterize edildiği ifade edilmiştir. Genel olarak, organik madde esas olarak

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mustafaisik55@hotmail.com (M. Işık)

Geliş / Received: 19.08.2022 Kabul / Accepted: 09.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1164511

formaldehit ve azot bileşikleri olarak bulunmaktadır. Bu atıkların biyolojik arıtımı için birleşik bir karbon ve nitrojen giderimi sürecini gerektirmektedir. Bu biyolojik arıtma, genellikle denitrifikasyon için karbon kaynağı olarak kullanılabilen yüksek organik madde içeriğine sahip atık suları arıtmak için kullanılan bir ön denitrifikasyon sisteminde gerçekleştirilebilir. Söz konusu çalışma sonucunda atıksudaki 2087 ile 2200 mg/L arasında formaldehit konsantrasyonunun ortalama giderim verimi %99.9 olarak tespit edilmişken, formik asit için ortalama giderim verimi ise %99.7'dir [1]. Benzer bir çalışmada reçine üreten bir endüstriden gelen atık suların laboratuvar ölçeğinde bir ön denitrifikasyon sistemi (anoksik-aerobik) kullanılarak arıtılması da incelenmiştir. 0.7 ile 1.9 kg KOİ/m³.gün arasındaki organik yüklem oranlarında %70 ile 85 arasında KOİ giderme verimliliği elde edilmiştir [3].

Alkid reçinesi ise bir dibazik asit ve poliollerin transesterifikasyon yoğunlaştırma polimerizasyon reaksiyonu ile üretilen yağ bazlı boya formülasyonlarında kullanılan baskın bir bağlayıcıdır. Bu işlem, ftalik asit ve esterleri gibi inatçı bileşikler de dahil olmak üzere yüksek konsantrasyonlarda organik bileşikler içeren alkid reçineli atık su olarak bilinen önemli hacimlerde atık su üretir [4]. Bu reçineler, daha düşük maliyeti nedeniyle dekoratif boyama uygulamalarında diğer bağlayıcılara göre daha fazla kullanılır [5,6]. Yüksek konsantrasyonlarda organik bileşiklerin varlığı ve bunların inatçı doğası, özellikle biyolojik işlemlere dayalı geleneksel atık arıtma tesisleri kullanılarak alkid reçineli atık suların arıtılmasını zorlaştırır. Alkid reçine atık suyunun yeniden kullanılması için, uygun maliyetli teknolojilerin geliştirilerek organik bileşiklerin mineralizasyonu gerekir [4].

Biyolojik arıtım mümkün olduğunda kimyasal arıtım tekniklerinden daha uygun ve sürdürülebilir bir seçenek olduğu bilinmektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalar vardır. Ana bileşenini kondense reçine atıksularının oluşturduğu bir atıksuyunun arıtımı üç farklı aktif karbonla çalışılmıştır [6]. Çalışmada KOİ'si 8210 mg/L ve BOİ'si 3250 mg/L olan bir reçine üretiminden oluşan bir atıksuyunun arıtımında karbonize edilmiş hurma çekirdeğinden ve pirinç atıklarından üretilmiş aktif karbonlar ticari aktif karbonun adsorbsiyon yönteminin kullanımı ve karşılaştırılması çalışılmıştır. Çalışmada en iyi KOİ giderim yüzdesi pH=2 de 30 g/L ticari aktif karbonla %92.4 olarak bulunmuştur.

Reçine atıksularının biyolojik olarak arıtılabilirliğinin araştırıldığı diğer bir çalışmada ise, reçine üreten bir fabrikadan gelen ve dirençli bileşikler içeren atık suyun biyolojik olarak arıtılmasından çıkan atıksu, farklı koşullar altında ozonlanmıştır. Daha sonra, ozonlanmış atık suyun biyolojik olarak parçalanabilirliği, anoksik koşullar altında incelenmiştir. Ozonlanmış atık suyun biyolojik arıtımından sonra sırasıyla %27'den %97'ye ve %27'den %80'e kadar organik karbon ve nitrojen giderimi gözlemlenmiştir. Bu süreçte ozonlama adımının amacı, dirençli bileşiklerin biyolojik olarak parçalanabilirliğini arttırmak ve aynı zamanda ozonu israf etmektен kaçınmak için mineralizasyonlarının en aza indirmektir [7].

Bununla birlikte, biyolojik arıtmadan sonra, bu atıkların hala yüksek konsantrasyonda organik nitrojen ve çözünmüş

kimyasal oksijen ihtiyacı (çKOİ) içerdiği ve atıksu deşarj standardını karşılamak için daha fazla kimyasal arıtma ihtiyacının olduğu belirtilmiştir [2].

Hidroksil radikalının oluşumuna dayanan ileri oksidasyon prosesleri (İOP), çok çeşitli organik bileşikleri yok etme yetenekleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir. İOP reçine atıksularının arıtımı konusunda yapılmış çalışmalarda literatürde yer almaktadır. De Oliveira, vd. yaptıkları çalışmada, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK) ve fenolik bileşiklerin atık suların uzaklaştırılmasında, boya formülasyonlarında kullanılan alkidik reçinelerin üretimi sırasında Fenton ve foto-Fenton proseslerinin etkinliğini değerlendirmişlerdir [8]. En yüksek verimin alındığı sonuçlar, güneş ışığının kullanıldığı foto-Fenton prosesi ile elde edilmiştir. Foto Fenton prosesi ile % 99.5 KOİ ve % 99.0 TOK giderim verimi görülmüştür [8]. Benzer şekilde farklı İOP, alkid reçine atık suyunun mineralizasyonu için fizibilite açısından karşılaştırılmıştır. İncelenen ileri oksidasyon prosesleri arasında Fenton işlemi, kombine ozonlama (O₃) ve hidrojen peroksit (H₂O₂), elektro-oksidasyon (EO), ıslak hava oksidasyonu ve ultrasonik ses (US) kullanımı yer almaktadır. Çalışılan ileri oksidasyon prosesleri (İOP) ve bunların kombinasyonları arasında O₃ ve H₂O₂ kombinasyonu diğer prosesler (Fenton prosesi, EO ve birleşik EO ve O₃) de oluşması muhtemel atıksudaki ftalik asit ve ftalik asit esterleri ile Fe⁺²'nin oluşturacağı koyu renkli kompleks oluşum sorunları olmadığı için en umut verici olanı olarak belirlenmiştir [4].

Polimerik reçinelerle kirlenmiş atıksular ise, akrilik asitler ve bunların esterleri, vinil asetat ve stiren içerir. Bu tür bileşikler suyu kirletmekte insan sağlığı ve çevre için tehlikelidir [9]. Polimerik reçine atıksuyunda bulunan bileşiklerin (asetat, akrilik asit, butil akrilat, metil akrilat, stiren gibi) yukarı akışlı anaerobik çamur yatak reaktörde gideriminin araştırıldığı bir çalışmada, biri düşük oksijen içeren (0.6-1 mg/L) diğeri içermeyen iki paralel reaktörle çalışılmıştır. Oksijen içermeyen reaktörde reçine bileşiklerinden kaynaklanan 1800 mg/L'li KOİ'nin %75'ler mertebesinde giderimi sağlanamamıştır. Düşük oksijen içeren anaerobik reaktörde ise KOİ giderimi %73'ler seviyesinde sağlanırken bazı bileşiklerin de kısmi oksidasyonu sağlanabilmiştir. Bu çalışma ise anaerobik koşullarda parçalanamayan bazı reçine bileşiklerin aerobik koşullarda parçalanabildiğine işaret edilmiştir [9].

Klasik yaklaşım olarak, atıksu hacimlerinin az olduğu ve toksik bileşik içeriği yüksek olan atıksuların arıtımından ziyade yakılması tercih edilen bir yöntem olmuştur. Özellikle pestisit, herbisit ve klorlu bileşikler gibi toksik bileşikler içeren biyolojik olarak ve fiziksel/kimyasal metotlar ile ekonomik olarak giderilemeyen atıksuların arıtımında deşarj standartlarını karşılayabilmek için yakma yöntemi kullanılmaktadır. Klorlu organik bileşiklerin oksijen varlığında yanma sıcaklığı 980 -1500°C arasında değişmektedir. Sürekli sağlanan yüksek sıcaklıkla toksik parçalanma ürünlerinin önüne geçilirken, yakma fırınından çıkan gazlar genellikle bir gaz tutucu gerektiren HCl gazı içermektedir. Yakma sonucunda oluşan gazların arıtımı ve

üretilecek yakma artığı küllerin bertarafı ya da yeniden kullanımını gerektirmektedir [10].

Hali hazırda tehlikeli atık kabul edilip bertarafının yakılarak gerçekleştirildiği reçine üretimi yapılan bir fabrikanın atıksularının arıtılabilirliğinin araştırılması karakteristiğinin belirlenmesi ve literatürle karşılaştırılmasının yapıldığı bu çalışma ile etkin ve sürdürülebilir potansiyel bir arıtma sisteminin önerilmesi amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan atıksu

Bu çalışmada kullanılan atıksu, reçine üretimi yapan ve atıksularını tehlikeli atık bertaraf tesislerine bedeli karşılığında yakma yolu ile bertaraf eden bir fabrikadan alınmıştır. Bu tür reçine üretimi yapılan tesislerde atıksu esas olarak reçine elde edilirken yoğunlaşan su-reçine karışımı ve üretim yapılan reaktörlerin yıkanmasından kaynaklanmaktadır [6]. Atıksu kapalı 1 m³'lük ultraviyole ışınlar karşı stabilize edilmiş yüksek moleküler, yüksek yoğunluklu polietilenden üretilmiş plastik kap (IBC) içerisinde getirilmiş ve güneş ışınlarından etkilenmeyecek şekilde depo edilmiştir. Atıksu her kullanımdan önce karakterize edilmiştir.

2.2 Analiz yöntemleri ve kullanılan ekipman

Çalışmada kullanılan yöntem ve ekipman Tablo 1'de verilmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Atıksu karakterizasyonu

Atıksuyun çok toksik ve tehlikeli olabileceği düşünüldüğü için bina dışında güneş ışınlarından etkilenmeyecek şekilde tutulan atıksuyun her dönem mevsimsel değişim zamanlarında laboratuvar denemeleri için alınan örnekler analizlenmiş ve Tablo 3'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüleceği gibi çalışma süresince atıksuyun karakterizasyonunun da önemli bir değişiklik olmaması atıksuyun depolandığı ve

saklandığı biyotik ve abiyotik çevresel faktörlere karşı dirençli organikler içerdiğinin bir göstergesidir. Respirometrik OxiTop sistemi (WTW) [18] tarafından aşırı yüksek BOİ'li ve toksik madde içeren atıksuların BOİ'sinin ölçümüne yönelik verilen prosedüre göre atıksuyun BOİ değerleri hesaplanmıştır. Bu test yüksek BOİ'li atıksuların ölçüm aralığının, toksik atıksuların toksik eşğin altına düşünceye kadar seyreltilerek ölçümün yapılabilmesi esasına dayanır. Tekrarlı yapılan analizlerin bir setinde değişik seyrelme oranlarında elde edilen BOİ₅ okumaları ve hesaplaması Şekil 1'de gösterilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Atıksuyun değişik oranlarda aşılınmış seyreltme suyuna ilave edilmesiyle elde edilen örneklerde Şekil 1'de grafikte gösterilen BOİ₅ değerleri elde edilmiştir. Artan miktarlarda atıksuyun BOİ değerlerinin düzgün doğrusal olması beklenirken, atıksu toksik bileşenler içerdiğinde 4 ml/L ve 5 ml/L atıksu örneklerinde BOİ₅ değerlerinin düzgün doğrusal değişmediği gözlenmiştir (Şekil 1a). Dolayısıyla 3 ml/L ye kadar olan verilerin lineer regresyon analizinden (Şekil 1b) BOİ₅ hesaplanmıştır. BOİ₅ ve BOİ₇ ölçümlerinde atıksu örneklerdeki atıksu miktarı arttığında beklenen BOİ₅ değerlerinin elde edilememesi atıksuyun içinde mikroorganizmaların toksisiteye maruz kalıp inhibe olduğu anlamını taşımaktadır.

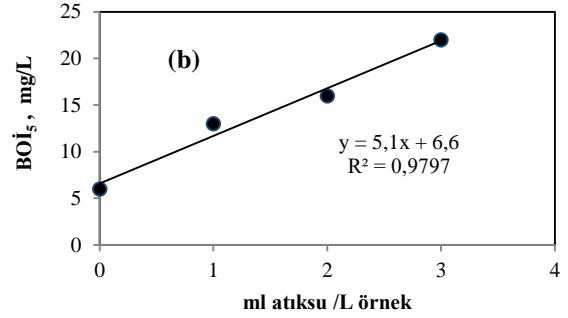
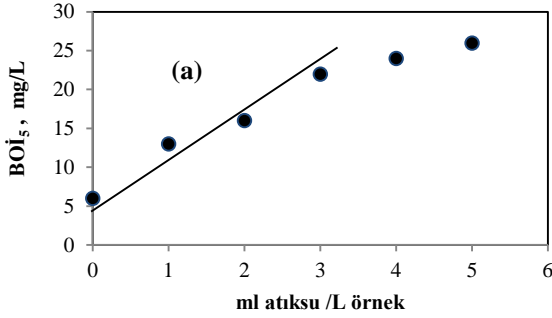
Atıksuyun organik madde içeriğinin yüksekliği dikkat çekmektedir. BOİ₅ değeri ölçümleri de yüksek olmasına rağmen BOİ₅/KOİ oranı 0.259 elde edilmiştir. Arıtılmamış atıksular için bu oran >0.5 veya daha büyük ise atık kolaylıkla biyolojik olarak arıtılabilir, oran <0.3 ise atıksu toksik bileşenler içeriyor ya da atığın biyolojik olarak parçalanması için mikroorganizmalara aklime edilmesi gerektiği ifade edilir [19]. Başka bir kaynakta BOİ₅/KOİ >0.6 ise atık biyolojik arıtıma oldukça uygun ve biyolojik arıtımla etkili bir şekilde arıtılabilir, oran 0.3-0.6 arasında ise biyolojik arıtma şartların kontrol edilmesi (aşı çamur ilavesi gibi) ile gerçekleştirilebilir, prosesin oldukça yavaş ve mikroorganizmaların aklime olması gerektiği, < 0.3 ise biyolojik arıtımın tek başına mümkün olmadığı anlamına gelmektedir [20].

Tablo 1. Karakterizasyonda kullanılan yöntemler ve ekipmanlar

Parametreler	Yöntem	Cihaz/ekipman
pH	SM 4500-H + B	Jenway3510
İletkenlik	SM 2510 B	Jenway4510
KOI	SM 5220 C	WTWCR4200 termoreaktör
Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ)	SM 5210 D	WTW inkubator WTW OxiTop IS 12
TOK, toplam azot (TN)	SM 5310 B	Shimadzu TOC-VCPN
Toplam fosfor (TP)	SM 4500-P B/D	Thermo Genesis UV/VIS Spektrofotometre
Askıda katı madde (AKM)	SM 2440 D	-
Florür, Klorür, Nitrit, Bromür, Nitrat, Sülfat, Fosfat	SM 4410 B	IC Dionex ICS-100
Ca, K, Na, Mg, Al	SM 3030 F EPA 200.7	ICP-OES Perkin Elmer, Optima 2100 DC
Aerobik toksisite	[11, 12]	Oxi top, WTW inkubator
Anaerobik toksisite	[13-16]	115 ml serum şişeleri, Zhicheng 111 D Çalkalayıcı
<i>Daphnia</i> sp. toksisite	[17]	100 ml beherler, 20°C laboratuvar ortamı

Tablo 2. BOİ₅ deneyinde elde edilen veriler ve atıksuyun BOİ₅ değeri

Örnek hacmi		BOİ (mg/L)				Örnek hesaplama	
mL/500 mL	ml/L	BOİ ₅ (ölçüm)	BOİ ₅ (düz)	BOİ ₇ (ölçüm)	BOİ ₇ (düz)	BOİ ₅ = $\frac{1000}{V_p} \cdot (Z_M - BW) + BW$	BOİ ₅
0 (kör)	0	6	6,6	7,0	7,5		
0.5	1.0	13	12	15	14		
1.0	2.0	16	17	18	20	V _p =Litred e örnek hacmi, mL/L	Z _M = Seyreltilmiş örneğin BOİ ₅ , mg/L
1.5	3.0	22	22	26	26		
2.0	4.0	24	27	27	32	BW= Kontrol (aşıl nmış seyreltme suyu), mg/L	
2.5	5.0	26	32	28	38		
			5107		6008		



Şekil 1. BOİ testinde farklı (0-5 ml atıksu/L örnek) seyreltmelerde elde edilen sonuçlar

Tablo 3. Reçine atıksuyunun kimyasal özellikleri

Parametreler	Değerler	Örnekleme sayısı (n)	Standart Sapma
pH	3.78	2	0.21
İletkenlik,	95.4	3	0.9
KOİ, mg/L	19875	2	177
BOİ ₅	5879	2	1092
BOİ ₅ /KOİ	0.30	2	0.050
TOK	6143	6	565
TP	6.77	2	6.38
AKM	2.67	3	1.01
Klorür	1.42	2	0.680
Nitrit	0.010	2	0.001
Bromür	0.789	2	1.029
Nitrat	0.259	2	0.011
Sülfat	0.006	2	0.002
Fosfat	0.492	1	-
Ca	2.57	1	-
K	0.561	1	-
Na	0.068	1	-
Al	0.063	1	-
As	0.002	1	-
Pb	0.010	1	-
Se	0.334	1	-

Bu oran atıksuların biyolojik parçalanabilirliğinin ölçümü için kullanılan birçok metot içerisinde en çok başvurulan ve kabul edilen yöntemlerden biridir [21, 22]. BOİ₇ ve BOİ₁₀ değerlerinin BOİ₅ değerleri ile kıyaslandığında yüksek çıkması atıksuyun içerisinde biyolojik olarak giderilebilecek yüksek oranda organik maddenin olduğunu, ancak mikroorganizmalar tarafından kullanımı için daha uzun sürelere ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Polyesterlere yağ asitlerinin ilavesi ile alkid reçine üretiminden oluşan benzer bir atıksuyun karakterizasyonunda pH=2.3, TOK=14500 mg/L, KOİ=39500 mg/L, BOİ₅/KOİ oranı ise 0,48 bulunmuştur [4]. Yine benzer bir atıksuyu karakterizasyon ve arıtılabilirlik çalışmasında pH=2.3, TOK=15304 mg/L, ve KOİ=45220

mg/L bulunmuştur [23]. Benzer sonuçlar [24] bu tür atıksuların içerisinde yüksek derişimlerde organik maddeler olduğunu ve hatırı sayılır oranda da biyolojik parçalanabilir organik madde içerdiğini göstermektedir.

3.2 Toksikite testleri

Çevre Kanunu ve Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği başta olmak üzere ülkemiz ve Dünyadaki Çevre mevzuatı toksik maddeleri ve bunları içeren atık/atıksuların alıcı ortama deşarjını yasaklamaktadır. İlgili deşarj standartları atıksuların içerisindeki spesifik kimyasalların derişimlerini ya da atıksuyun tamamının toksisitesinin belli düzeylerine sınırlandırma getirilerek uygulanmaktadır. Alıcı ortama deşarj yapılacağı için ulusal mevzuatımızda Balık Biyodenyi olarak ham ve arıtılmış atıksularının akut toksisitesi ölçümleri yapılarak atıksuların toksisitesi değerlendirilmektedir. Bu çalışmada ham ve arıtılmış atıksuların anaerobik toksisite testi ile atıksuyun anaerobik, aerobik respirometrik toksisite testi ile aerobik arıtımının ve *Daphnia* sp. toksisite testi ile atıksuyun tatlı su alıcı ortamdaki toksisitesinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Testlerde toksisite sonuçları genellikle gözlemlenen ya da ölçülen duruma göre eğer ölüm gözleniyorsa %50 ölüme neden olan derişime (50% lethal concentration,) LC₅₀, eğer toksisite ölümcül olmayan daha düşük bir etkiye neden oluyorsa %50 etki yapan derişim (50% effective concentration,) EC₅₀ ve inhibitör olduğu bilinen maddelerin %50 inhibisyon yapan derişimleri (50% inhibition concentration,) IC₅₀ olarak ifade edilmekte, bakteri, alg gibi organizmaların gelişim hızlarındaki azalmalar için genellikle kullanılmaktadır [25].

3.2.1 Anaerobik toksisite testi

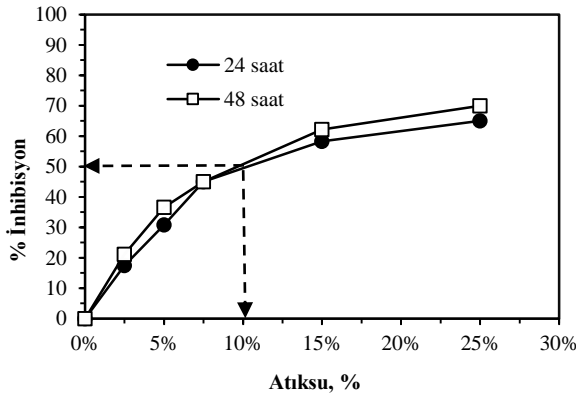
Literatürde kabul gören ve değişik araştırmacılar tarafından önerilen testlerin modifiye edilmesi ile test gerçekleştirilmiştir.

Aşı çamur Aksaray Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Süttaş Aksaray Entegre Tesislerinde biyogaz ve enerji üretiminin yapıldığı reaktörden temin edilmiştir. Testin esası anaerobik karışık kültür mikroorganizmaların farklı atıksu yüzdelerinde glikoz-KOİ'sinden 24 ve 48 saatlik kümülatif metan üretimlerinin kıyaslanmasına dayanmaktadır. 115 mL serum şişelerinde 75 mL test hacmi içerisinde test örneklerinin derişimi Tablo 4'te verilmektedir. Test şişelerine sırasıyla NaHCO₃, Glikoz KOİ ve Vanderbilt stok çözeltilerinden eklenmiş, seyreltme oranlarına göre atıksu ilave edildikten sonra saf su ile kalan hacim tamamlandıktan sonra en son aşı çamur ilave edilmiştir. Kapak kapatıldıktan sonra 2 dakika N₂ gazından geçirilmiş ve 24 saatlik ve 48 saatlik kümülatif metan gazları yer değiştirme [26] metodu ile metan gaz üretim hızına göre belli saat aralıklarında (8-12 saat) metan gazı ölçülmüştür.

Tablo 4. Anaerobik toksisite test bileşenleri

Bileşik	Derişimler, mg/L
Glikoz KOİ	4000
NaHCO ₃	5000
Anaerobik çamur	2000
Vanderbilt mineral ortam	NH ₄ Cl (400), MgSO ₄ . 7H ₂ O(400), KCl(400), Na ₂ S.9H ₂ O (300), (NH ₄) ₂ HPO ₄ (80), CaCl ₂ (30), FeCl ₂ .4H ₂ O(40), CoCl ₂ . 6H ₂ O(10), KI (10), (NaPO ₃) ₆ .Na ₂ O (10), Cysteine (10), AlCl ₃ (0.3), MnCl ₂ .4H ₂ O(10), CuCl ₂ (0.5), ZnCl ₂ (0.5), KH ₂ PO ₄ (0.5), NH ₄ VO ₃ (0.5), Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O, H ₃ BO ₃ (0.5), Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O(0.5), NiCl ₂ .6H ₂ O (0.5), Na ₂ WO ₂ .2H ₂ O (0.5), Na ₂ SeO ₃ .5H ₂ O (0.5)
Atıksu, %	0, 2.5, 5, 7.5, 15, 25

24 ve 48 saatlik sürelerde kümülatif metan gazı değerlerinde Şekil 2'de görüldüğü gibi lineer bir düşme eğilimi gözlemlenmiştir. Lineer metan gazı düşme eğilimi dikkate alındığında atıksu içermeyen kontrol örneği ile kıyaslandığında %50 metan oluşumunu azaltan atıksu yüzdesi (IC₅₀) değerleri 24 saatlik kümülatif metan üretimleri dikkate alındığında %16.1 ($y=242.15x+13.914$, $R^2=0.8234$), 48 saatlik metan gaz üretimleri dikkate alındığında %14.4 ($y=254.49x+15.819$, $R^2=0.8297$), olarak ölçülmüştür.



Şekil 2. Anaerobik toksisite test sonuçları

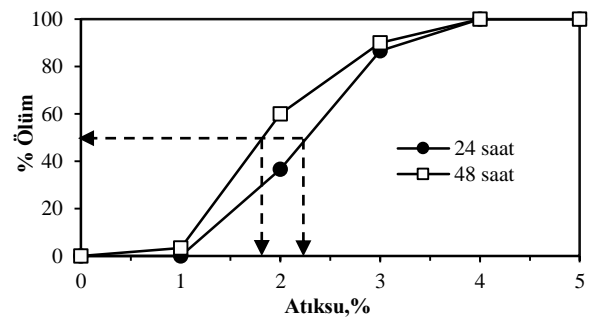
3.2.2 Daphnia sp test

Daphnia sp. çevresel şartlardan etkilendiği için test organizmalarının çoğaltılması ve testlerde sağlıklı ve standart bireyleri kullanılmalıdır. *Daphnia* testleri ilgili birbirlerine benzer şekilde çok farklı standart testler bulunmaktadır. *Daphniaların* çoğaltılması ve test şartlarında Tablo 5'teki çevresel şartların sağlanmasına dikkat edilmelidir.

Tablo 5. *Daphnia* sp çoğaltımı için çevresel şartlar

Çevresel Şartlar	Özellik
Sıcaklık	18-26°C arası sıcaklığı tercih ederler.
pH	Tavsiye edilen pH aralığı 7.0-8.6 arasındır. Geniş bir pH aralığında yaşayabilirler.
Çözünmüş Oksijen	>3 mg/L
Işık	538-1076 luks

Stok kültürlerin yetiştirildiği kaplar haftada bir temizlenmeli ve yeni besiyerle temizlenmelidir. Yenileme sırasında 30 tane yetişkin kalacak şekilde aşırı çoğalmayı önlemek için diğerleri atılır. 3 L'lik kap içerisinde 30 yetişkin *Daphnia*'dan haftada 300 adet genç *Daphnia* oluşabilmektedir. Yetişkin bir dişi, ölümüne kadar her 3-4 günde bir 100'e kadar yumurta üretir. Laboratuvarında 20 °C'de 3 aydan fazla yaşayabilir. *Daphnia* testinde 24 saatten küçük olanları seçilir. Testlerde yavru *Daphnia* üretimi için teste başlamadan önce embriyo taşıyan dişiler alınır ve 10 ml alg kültürü içeren 300 mL içerisine ilave edilir. Sonraki 24 saat içerisinde beherde bulunan genç üyeler kullanılır. Zor çevresel şartlarda gelişen ephippial ve yaşlı *Daphnia*lar kullanılmamalıdır. En az 10 genç *Daphnia* 5 ayrı toksik derişimli ya da seyrelmeli toksik atıksu örnekleri kullanılır. İki paralel 100 mL organizmaların çoğaldığı su ortamı ve % 0-5 atıksu hacmi ve 10 adet *Daphnia* sp. içeren test örnekleri aydınlık oda ışığı şartlarında ve 20±2°C sıcaklık şartlarında teste tabii tutulmuş, 24 ve 48 saatlik sürelerde hareketli olanlar sayılarak kıyaslama yapılarak Şekil 3'deki test sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar atıksuda %1.75'in üzerinde atıksu bulunduğunda tatlı sularda yaşayan *Daphnia* türü canlıların yarısının öldüğünü (LC₅₀=%1.75), süre 48 saate yükseldiğinde toksisitenin biraz daha arttığını (LC₅₀=%2.25) göstermektedir. Atıksuyun tatlı sulara doğrudan deşarjı tatlı su canlıları ve ekosistemi üzerinde katastrofik etkiler meydana getireceği çok açıktır.



Şekil 3. *Daphnia* sp test sonuçları

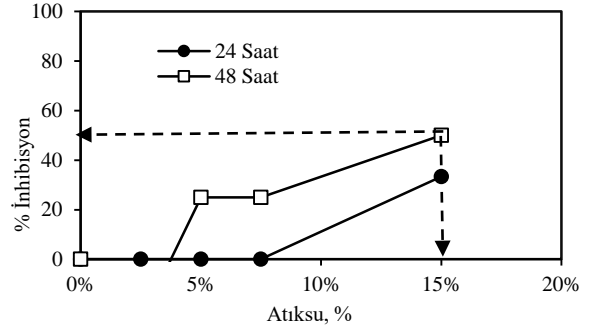
3.2.3 Aerobik respirometrik test

Respirometri aerobik koşullarda biyolojik oksijen tüketim hızının veya anaerobik koşullarda biyogaz üretiminin ölçülmesi ve yorumlanması için kullanılan bir terimdir. Ancak genellikle atıksu örnekleri ve aktif çamurlarda oksijen tüketim hızı ölçümleri için kullanılan bir terimdir [27]. Manometrik respirometre testi ile yüksek KOİ'li ve toksik içeriği olan atıksuların BOİ içerikleri ölçülebilmektedir [18]. 28 günlük ölçülen oksijen ihtiyacı teorik oksijen tüketimi aerobik biyolojik parçalanabilirlik için maksimum süre kabul edilir. Eğer bir maddenin 28 günlük süre içerisinde ilk 10 günlük süre içerisinde organik karbonunun %60'lık kısmı parçalanırsa bu madde kolay biyolojik parçalanabilir olarak sınıflandırılır. Lag fazından sonraki ilk 10 günlük süre dikkate alınacağı için Lag fazının bitimi organik karbonun %10'unun dönüştüğü an olarak kabul edilmektedir [12]. Bu yöntemle referans bir organik madde (sodyum asetat, sodyum benzoat, glikoz gibi) kullanılarak aerobik toksisite testleri yapılabilmektedir [28, 29]. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen prosedürlerden faydalanılarak aerobik bir toksisite testi modifiye edilerek uygulanmıştır. Testin genel esası tüm test şişlerinde referans madde olarak eşit miktarda glikoz-KOİ'sinin farklı yüzdelerde toksik madde içeren test şişlerinde 24 ve 48 saat içerisinde ölçülen BOİ değerlerinin toksik atıksu olmayan kontrol örneği ile kıyaslanmasına dayanmaktadır. 250 mL toplam sıvı hacimli test içerikleri Tablo 6'da verilmektedir. Atıksuyun içerisindeki dirençli (rekalsitrant) ve muhtemel toksik maddelerin çalışmalarımızda kullanılacak aerobik test reaktörlerinde parçalanabilirliği ve toksisitesini belirleyebilmek için BOİ testi ile aerobik toksisite değerlendirilmesi yapılmıştır. Aerobik toksisite de aşı materyali için çalışan bir aktif çamurdan 2 mL alınıp doğrudan test şişelerine ilave edilmiştir. Test sonuçları Şekil 4'te verilmektedir.

48 saatlik test sonucunda %15'lik seyrelme oranlarında %50 inhibisyon gözlemlenmiştir ($IC_{50}=\%15$). 24 saatlik test sonuçlarında daha düşük bir inhibisyon gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Aerobik toksisite test bileşenleri

Parametre	Stok	Açıklama
Glikoz KOİ	9.384 g $C_6H_{12}O_6/L$	5 mL (200 mg KOİ/L)
Aşı çamur Safsu	3 g/L faal aktif çamur	2 mL 242, 236, 230, 223, 211, 180 mL
pH=7.2 li fosfat	g/L olarak. KH_2PO_4 (8.5). K_2HPO_4 (21.75).	0.25 mL
tampon çözeltisi	$Na_2HPO_4 \cdot 7H_2O$ (33.4). NH_4Cl (1.7)	
Magnezyum sülfat çözeltisi	g/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (22.5)	0.25 mL
Kalsiyum klorür çözeltisi	g/L $CaCl_2$ (27.5). veya $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (36.4)	0.25 mL
Demir klorür çözeltisi	g/L $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (0.25)	0.25 mL
Atıksu. % 0.	Toksik atıksu	0, 6.25, 12.5, 18.75, 2.5, 5, 7.5, 15, 25



Şekil 4. Aerobik toksisite test sonuçları

Aerobik şartlarda toksik olmayan herhangi bir atıksu ile reçine atıksularının %10-15'lik seyrelme oranlarında hiçbir aktivite kaybı olmaksızın arıtım yapılabileceği sonucu çıkarılabilir. Muhtemeldir ki co metabolik yolla reçine atıksuyu içerisindeki zor ayrışabilir ya da normal yollarda biyolojik olarak parçalanmayan bileşikler giderilebilir. Atıksu önemli oranda uçucu bileşik içerdiği için gerçek atmosfere açık aerobik reaktörlerde daha reçine atıksuyunun yüksek organik madde giderim verimlerinde artırılacağı beklenmektedir. Co-metabolizmada ana karbon kaynağı ve iz element gereksinin bu tür tesislerde bulunan personelden kaynaklanan evsel atıksudan sağlanabilir.

4 Sonuçlar ve öneriler

Çalışma kapsamında atıksuyun karakterizasyonu yapılmış, literatürde bulunan benzer atıksularla karşılaştırma yapılmış ve uygun olabilecek arıtım işlem ve prosesleri en uygun olacak arıtım sistemini tespit etmek için önerilmiştir. Atıksu ile yapılan karakterizasyon çalışmalarının sonucunda şu sonuçlar çıkarılabilir.

Reçine atıksuyu yüksek miktarda organik madde içermektedir. Yapılan ilk değerlendirmeler ve analizlere göre atıksuyun içerisinde üretim prosesinden kaynaklandığı düşünülen farklı organik maddelerden oluşmaktadır. Organik maddelerin bir kısmı biyolojik olarak parçalanabilir, bir kısmı yavaş parçalanabilir bir kısmı da biyolojik olarak parçalanamaz ve inhibe edici/toksik özelliktedir.

Toksisite testleri sonucunda atıksuyun hem anaerobik, hem aerobik hem de tatlı su şartlarında yaşayan canlılar üzerinde toksik etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Tatlı su sitemlerinde yüksek toksisiteye (24 saatlik $LC_{50}=\%1.25$) sahip olduğundan atıksuyun arıtılmadan alıcı ortama verilmesi halinde ekolojik etkisinin fazla olacağı anlamına gelmektedir. Anaerobik ve aerobik arıtılabilirliğine ışık tutacak 24 saatlik toksisite testlerinde metan üretimi dikkate alınarak yapılan anaerobik toksisite testlerinde $IC_{50}=\%16.1$, BOİ testleri ile oksijen kullanımına dayalı yapılan 48 saatlik aerobik toksisite testlerinde şartlardaki $IC_{50} \%$ 15'ler düzeylerinde bulunmuştur. Bu sonuçlar belli oranlarda seyreltme yapılarak ya da başka atıksular ile (evsel atıksular) reçine atıksuyunun karıştırılarak arıtımının belli düzeylerde biyolojik arıtım yapılabileceğini göstermektedir.

Yakma ile atıksu bertarafının çok pahalı olduğu durumlarda evsel atıksuyunda olması durumunda bu tür atıksuların aerobik ya da anaerobik biyolojik arıtımı

alternatif yöntemlerden bir tanesi olarak düşünülmelidir. Deşarj standartlarının sağlanması gerekli olduğundan eğer biyolojik arıtım tek başına yeterli olmadığı durumlarda, ileri oksidasyon yöntemleri, adsorbsiyon gibi ileri arıtım yöntemleri kullanılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1]. M. Eiroa, A. Vilar, C. Kennes ve M. C. Veiga, Technical note Biological treatment of industrial wastewater containing formaldehyde and formic acid, *Water SA*, 32, 115-118, 2006. doi: [10.4314/wsa.v32i1.5232](https://doi.org/10.4314/wsa.v32i1.5232).
- [2]. S. R. Popuri, C.-Y. Chang ve J. Xu, A study on different addition approach of Fenton's reagent for DCOD removal from ABS wastewater, *Desalination*, 277, 141-146, 2011. DOI: [10.1016/j.desal.2011.04.017](https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.017)
- [3]. J. Garrido, R. Méndez ve J. Lema, Treatment of wastewaters from a formaldehyde-urea adhesives factory, *Water science and Technology*, 42, 293-300, 2000. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0527>
- [4]. S. B. Kausley, K. S. Desai, S. Shrivastava, P. R. Shah, B. R. Patil ve A. B. Pandit, Mineralization of alkyd resin wastewater: feasibility of different advanced oxidation processes, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6, 3690-3701, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.001>
- [5]. H. Aghaie, A. Ilkhani ve S. S. Choobeh, Utilization Soya Bean Fatty Acid for Synthesis of Alkyd Resin and Comparison of Properties with Other Vegetable Oils, *Journal of Nano Chemical Agriculture (JNCA)*, Islamic Azad University, Saveh Branch, 69-73, 2012.
- [6]. F. El-Dars, M. Bakr ve A. M. Gabre, Reduction of COD in resin production wastewater using three types of activated carbon, *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 1, 126-136, 2013. doi: [10.1080/19443994.2013.804456](https://doi.org/10.1080/19443994.2013.804456)
- [7]. M. Aparicio, M. Eiroa, C. Kennes ve M. C. Veiga, Combined post-ozonation and biological treatment of recalcitrant wastewater from a resin-producing factory, *Journal of Hazardous Materials*, 143, 285-290, 2007. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2006.09.025](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.025)
- [8]. I. S. de Oliveira, L. Viana, C. Verona, V. L. Fallavena, C. M. Azevedo ve M. Pires, Alkydic resin wastewaters treatment by fenton and photo-Fenton processes, *J Hazard Mater*, 146, 564-8, Jul 31 2007. doi: [10.1016/j.jhazmat.2007.04.057](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.057).
- [9]. U. Durán, O. Monroy, J. Gómez ve F. Ramírez, Biological wastewater treatment for removal of polymeric resins in UASB reactor: influence of oxygen, *Water science and technology*, 57, 1047-1052, 2008. DOI: [10.2166/wst.2008.058](https://doi.org/10.2166/wst.2008.058)
- [10]. V. V. Ranade ve V. M. Bhandari, Industrial wastewater treatment, recycling and reuse. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [11]. M. Işık, Nickel inhibition of calcium precipitation by ureolytic mixed microorganisms under batch conditions, *Separation and purification technology*, 62, 337-341, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.02.002>
- [12]. OECD 301F, Manometric Respirometry Test. Organisation for Economic Co-operation and Development Chemicals Testing-Guidelines. Adopted 17.07.1992, 1992.
- [13]. I. Angelidaki, M. Alves, D. Bolzonella, L. Borzacconi, L. Campos, A. Guwy, P. Jenicek, S. Kalyuzhnyi ve J. Van Lier, Anaerobic Biodegradation, Activity and Inhibition (ABAI) Task Group Meeting 9th to 10th october 2006, in Prague., 2007.
- [14]. M. Işık ve D. T. Sponza, A batch study for assessing the inhibition effect of Direct Yellow 12 in a mixed methanogenic culture, *Process Biochemistry*, 40, 1053-1062, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.03.011>
- [15]. W. Owen, D. Stuckey, J. Healy Jr, L. Young ve P. McCarty, Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity, *Water Research*, 13, 485-492, 1979. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90043-5)
- [16]. R. E. Speece, *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*, Nashville, Tennessee, USA, 1996.
- [17]. APHA/AWWA/WEF, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Rodger B. Baird, Andrew D. Eaton, Eugene W. Rice (Editors), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Edition, Washington, D.C., American Public Health Association (APHA). . 2017.
- [18]. WTW, Respirometric BOD5 determination of waste water polluted with organic or inorganic toxins or inhibitors, Application Report., vol. 42., 2010.
- [19]. Metcalf&Eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*, Fifth ed. McGraw-Hill Education, 2014.
- [20]. K. Z. Abdalla ve G. Hammam, Correlation between biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand for various wastewater treatment plants in Egypt to obtain the biodegradability indices, *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 13, 42-48, 2014.
- [21]. A. Amat, A. Arques, A. García-Ripoll, L. Santos-Juanes, R. Vicente, I. Oller, M. Maldonado ve S. Malato, A reliable monitoring of the biocompatibility of an effluent along an oxidative pre-treatment by sequential bioassays and chemical analyses, *Water research*, 43, 784-792, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.017>
- [22]. B. Zhang, D. Ning, Y. Yang, J. D. Van Nostrand, J. Zhou ve X. Wen, Biodegradability of wastewater determines microbial assembly mechanisms in full-scale wastewater treatment plants, *Water research*, 169, 115276, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115276>

- [23]. N. A. Gengec, E. Gengec, O. T. Can ve M. Kobya, Electrooxidation of Alkyd Resin Production Wastewater By Bore Doped Diamond Electrode, Academic Perspective Procedia, 1, 1026-1033, 2018. DOI: [10.33793/acperpro.01.01.168](https://doi.org/10.33793/acperpro.01.01.168)
- [24]. O. Tünay, D. Çakır ve I. Kabdaşlı, Characterization and treatability of alkyd resin production wastewater, Desalination and Water Treatment, 101, 151-156, 2018. DOI: [10.5004/dwt.2018.21761](https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21761)
- [25]. W. G. Landis, R. M. Sofield ve M.-H. Yu, Introduction to environmental toxicology: molecular substructures to ecological landscapes. CRC Press, 2017.
- [26]. S. S. Sağlam, Ö. S.Y. ve M. Işık, pesifik metanojenik aktivite testinin optimizasyonu (poster bildiri), in İTÜ 11. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, 11-13 Haziran 2008, İstanbul, 2008, pp. 485-490.
- [27]. K. Roppola, Environmental applications of manometric respirometric methods, 2009.
- [28]. M. Langone, G. Sabia, L. Petta, L. Zanetti, P. Leoni ve D. Basso, Evaluation of the aerobic biodegradability of process water produced by hydrothermal carbonization and inhibition effects on the heterotrophic biomass of an activated sludge system, Journal of Environmental Management, 299, 113561, 2021. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113561](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113561)
- [29]. WTW, Manometric respiration tests according to OECD 301F with the OxiTop® Control measuring system under GLP conditions, vol. 42, 2010. scale wastewater treatment plants, Water research, vol. 169, p. 115276, 2020.





Gri Kurt optimizasyon algoritması ile güç ve dağıtım türü transformatörlerin ağırlık optimizasyonu

Weight optimization of power and distribution type transformer by Gray Wolf optimization algorithm

Murat Tören^{1,*} , Hakkı Mollahasanoğlu² 

^{1,2} Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53100, Rize, Türkiye

Öz

Elektromanyetik alan yoluyla elektrik enerjisinin aktarılması prensibine göre çalışan transformatörler, yüksek verimliliğe sahip elektrik makineleridir. Transformatörün verimliliğini etkileyen ağırlık ve boyut parametreleri, transformatörlerin tasarımında önemlidir. Bu çalışmada, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtım aşamalarında aktif kullanılan ve farklı güç seviyelerine (50 kVA, 100 kVA ve 100 kVA) sahip transformatörlerin tasarımlarındaki ağırlık değerleri, sezgisel yöntem ile gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki güncel sezgisel yöntemlerden biri olan gri kurt algoritması kullanılarak, transformatör ağırlığına etki eden akım yoğunluğu (s) ve demir kesiti uygunluk faktörü (C) parametreleri optimize edilmektedir. Çalışma sonucunda, 50 kVA, 100 kVA ve 1000 kVA transformatörlerin ağırlıkları, sırasıyla, %31, %21 ve %9 oranında düşürülmektedir. Böylece dağıtım ve güç transformatörü türünde transformatör ağırlıklarının optimum değerlerle elde edilmesine yeni bir yaklaşım katılmakta ve ağırlıktan kaynaklı transformatör maliyetleri azaltılabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Ağırlık optimizasyonu, Gri Kurt algoritması, Transformatörler, Verimlilik

1 Giriş

Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında güç transformatörleri ile dağıtım transformatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin tüketicilere uygun formda aktarılması için, söz konusu transformatörler hayati bir öneme sahip olup, dolayısıyla da tasarımları oldukça önem arz etmektedir. Transformatör tasarımları, transformatörün tipine, yapısına, soğutma türüne ve yapısında kullanılan manyetik malzeme türüne göre değişiklik gösterebilmektedir [1]. Bu nedenle, yapılan çalışmalarda, transformatör tasarım parametreleri, optimum şekilde belirlenmeye çalışılarak, güç ve dağıtım transformatörlerinin verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, yapılan çalışmalarda, transformatör çekirdeğinin uygunluğu dikkate alınarak, transformatör tasarım parametreleri belirlenmiştir [2-3].

Transformatör ağırlığı, verimliliği ve maliyeti direkt olarak etkileyen parametrelere biridir. Bu nedenle,

Abstract

Transformers operating according to the principle of transferring electrical energy through the electromagnetic field are electrical machines with high efficiency. Weight and size parameters that affect the efficiency of the transformer are important in the design of transformers. In this study, the weight values in the designs of transformers with different power levels (50 kVA, 100 kVA and 100 kVA), which are actively used in the transmission and distribution stages of electrical energy, are realized by heuristic method. By using the gray wolf algorithm, which is one of the current heuristics in the literature, the parameters of current density (s) and iron cross section conformity factor (C) affecting the transformer weight are optimized. As a result of the study, the weights of 50 kVA, 100 kVA and 1000 kVA transformers are reduced by 31%, 21% and 9%, respectively. Thus, a new approach has been developed to optimize transformer weights in distribution and transmission transformer types and transformer costs due to weight can be reduced.

Keywords: Weight optimization, Gray Wolf algorithm, Transformers, Efficiency

transformatörlerin ağırlığını optimize etmek için de çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmada, 1600 kVA gücünde, kuru tip transformatörün çelik parçaları yeniden tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen tasarımda, transformatör üzerine etkileyen ağırlıklar simüle edilerek, transformatörün elektriksel değerleri optimize edilmiştir. Böylece transformatör ağırlık ve maliyetinin optimum olması amaçlanmıştır [4]. Ayrıca, farklı bir çalışmada, transformatör ağırlığını belirlemek için, bulanık tabanlı analiz yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan yöntemde, transformatörün; bakır, demir ve yağ ağırlığı dikkate alınmıştır [5]. Ancak son yıllarda, klasik yöntemlerin yanı sıra sezgisel optimizasyon algoritmaları da kullanılarak transformatör ağırlığını asgari seviyeye çekebilmek için çalışmalar yapılmaktadır.

Sezgisel optimizasyon algoritmaları, klasik yöntemlerdeki pratik uygulama alanı bulamama problemlerinden dolayı, doğadaki canlıların davranışlarından esinlenerek geliştirilmektedir. Bu algoritmaların etkin ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: murat.toren@erdogan.edu.tr (M. Tören)

Geliş / Received: 08.06.2022 Kabul / Accepted: 06.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1127837

esnek olması sayesinde, her türlü problemin çözümüne katkı sağlamak için uygulanabilmektedir [6]. Bu yöntemler, farklı mühendislik problemlerinin çözümünün [7] yanı sıra transformatörlerin ağırlık optimizasyonu için de kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda; tabu arama algoritması [8], ateş böceği algoritması [9] ve genetik algoritma [10-11] optimizasyon metotları kullanılarak, kuru tip transformatörün ağırlık optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bazı çalışmalarda ise transformatör optimizasyonu için farklı sezgisel optimizasyon algoritmaları kullanılarak, karşılaştırma yapılmıştır [12]. Referans verilen çalışmada, ağaç tohum algoritması, parçacık sürü optimizasyonu ve benzetimli tavlama yöntemleri kullanılarak, üç fazlı kuru tip transformatörün optimizasyonu gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, literatürde yeni tanıtılan istilacı ot optimizasyonu ve ateş böceği algoritmaları kullanılarak üç fazlı kuru tip transformatörün ağırlık ve maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yaygın kullanıma sahip, parçacık sürü optimizasyonu performansı ile karşılaştırılmıştır [13]. Tüm bu çalışmalara bakıldığında, transformatörler için farklı sezgisel algoritmalar kullanılarak maliyet ve ağırlık optimizasyonu yapıldığı görülmektedir. Hatta yaptığımız ön çalışmada, 50 kVA dağıtım transformatörü ile 1000 kVA güç transformatörünün ağırlık optimizasyonu, literatürde yaygın kullanıma sahip; karınca kolonisi, arı ve ateş böceği algoritmaları ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda ateş böceği algoritmasının diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir [14]. Ancak literatürde yeni tanıtılan gri kurt algoritmasının birçok pratik problemi çözmek için uygulandığı [15-16] ve tasarım/modelleme çalışmaları yapıldığı görülmektedir [17-18]. Hatta bazı elektrik makinaları uygulamalarında da gri kurt algoritması tercih edilmiş olup, yapılan çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı gri kurt algoritması ile gerçekleştirilmiştir [19]. Buna rağmen, yeni bir metot olan gri kurt algoritmasının transformatörlerin ağırlık optimizasyonunda kullanılmadığı görülmektedir.

Bu çalışmada, literatüre katkıda bulunmak amacıyla, farklı güç seviyelerine sahip transformatörlerin (50-100-1000 kVA) optimum ağırlığının belirlenmesi amacıyla, literatürde güncel kullanıma sahip olan gri kurt algoritması (GKA) kullanılmaktadır.

2 Materyal ve metot

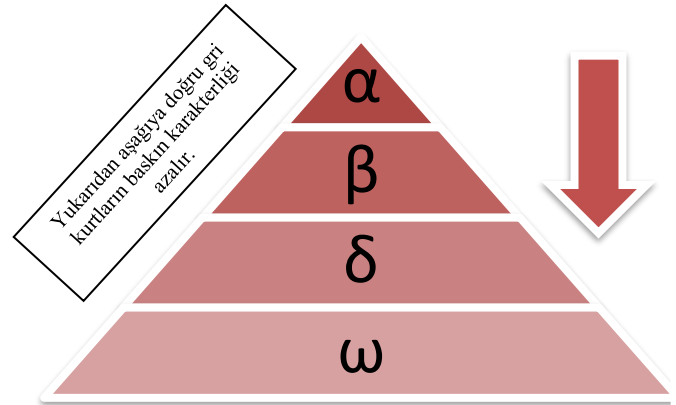
Bu çalışmada kullanılan farklı güç seviyesindeki transformatörlerin mevcut etiket ağırlığı, teorik veriler ve deneysel yaklaşımlarla güçlendirilmiş varsayımlardan elde edilen geleneksel hesaplama metodu ile belirlenmektedir. Hesaplama kullanılan ve değişken parametreler olan akım yoğunluğu (s) ve demir kesit (C) değerleri gri kurt algoritması ile optimize edilerek, en uygun transformatör ağırlık değerleri elde edilmektedir.

2.1 Gri kurt algoritması

Gri kurt algoritması, Mirjalili ve arkadaşları tarafından, gri kurtların liderlik hiyerarşisi ve avlanma sürecini dikkate alarak önerdiği, yeni bir sezgisel algoritmadır [20]. Bu algoritma, genetik algoritma, parçacık sürüsü optimizasyonu, ateş böceği algoritması gibi diğer yaygın

popülasyon tabanlı sezgisel algoritmalarından daha iyi yakınsama özelliklerine sahiptir. Ayrıca, Gri kurt algoritmasının optimizasyon sürecinde çalıştırılması basit ve uygulanması kolaydır.

Gri kurt algoritmasının uygulanması için kullanılan gri kurtların liderlik hiyerarşisini taklit etmek için dört farklı gri kurt grubu vardır. Şekil 1'de gösterilen liderlik hiyerarşisinde; ilk katman, alfa (α) olup, en güçlü ve en yetenekli olan baş kurdu temsil etmektedir. İkinci katmanda her alan beta (β) kurtlar, diğer alt düzey kurtları komuta edip, alfa kurtlar ile olan iletişimi sağlar. Optimizasyon algoritmasında, alfanın komutlarını güçlendirip alt düzey kurtlara iletip ve alfa kurda geri bildirimde bulunur. En alt katmanda ise omega kurtlar (ω) bulunur ve toplamın büyük bir kısmını kaplar ve esas olarak nüfusun iç ilişkilerini dengelemekten ve genç kurt nüfusunu korumak ve gözetlemekten sorumludur. Üçüncü tabakada yer alan kurtlar, diğer üç tabakada yer almayan ve alfa ile beta sınıfı kurtlara boyun eğmek zorunda olan ancak omega kurtlara hükmeden delta kurtlar (δ) olarak sınıflandırılmaktadır [21].



Şekil 1. Gri kurtların algoritması liderlik hiyerarşisi

Gri kurt algoritmasının uygulanması için kullanılan avlanma süreci ise avı izleme ve takip, çevreleme ve saldırma davranışları ile temsil edilmektedir. Gri kurt algoritmasında, en uygun çözüm alfa (α) olarak kabul edilirken, beta (β) ve delta (δ) sırasıyla en iyi ikinci ve üçüncü çözümler olarak varsayılmaktadır. Omega kurtlar (ω) ise bu üç kurdu takip etmektedir. Algoritmanın uygulanması için gri kurtlar avını takip edip, yerini belirler ve etrafını sarmaya başlar. Bu davranışı matematiksel olarak modellemek için Denklem 1 ve 2'den faydalanılır.

$$D_p = |CX_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD_p \quad (2)$$

Burada, t yineleme sayısı olup, $X(t)$ gri kurdu temsil etmektedir. X_p ise avın mevcut konumudur. Transformatör ağırlığını optimize etmek için kullanılan gri kurt algoritmasında, gri kurt, demir kesit uygunluk faktörü (C) ile avın konumu ise transformatör akım yoğunluk değeri (s) ile ilişkilendirilmektedir. Denklem 1 ve 2'de, A ve C ilgili

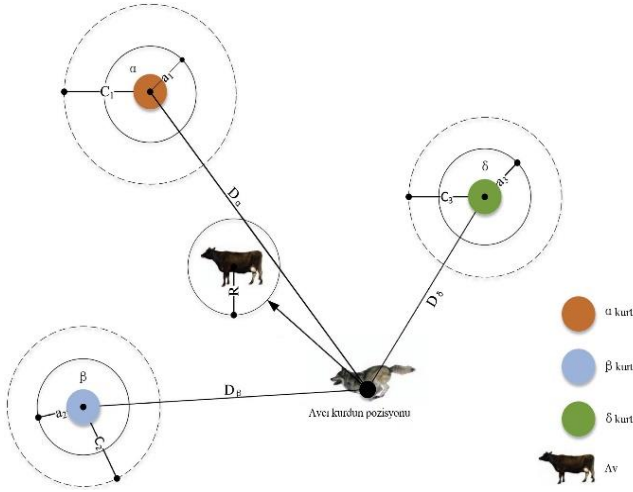
katsayılar olup, **Denklem 3** ve **4**'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$A = 2ar_1 - \alpha \quad (3)$$

$$C = 2r_2 \quad (4)$$

Burada, α iterasyon ilerledikçe, ikiden sıfıra doğru azalan katsayıyı ifade ederken r_1 ve r_2 ise sıfır ile bir arasında rastgele seçilen sayılardır.

Avını kuşatan gri kurtlar (α , β ve δ) daha sonra avını avlamaktadır. **Şekil 2**'de gri kurtların avlanma stratejisi verilmektedir.



Şekil 2. Gri kurtların avlanma stratejisi

Şekil 2'de verilen avlanma mekanizmasında gri kurtların pozisyonları **Denklem 5** ve **6** ile belirlenmektedir.

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 X_\alpha - X(t)| \\ D_\beta &= |C_2 X_\beta - X(t)| \\ D_\delta &= |C_3 X_\delta - X(t)| \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha(t) - A_1 D_\alpha \\ X_2 &= X_\beta(t) - A_2 D_\beta \\ X_3 &= X_\delta(t) - A_3 D_\delta \end{aligned} \quad (6)$$

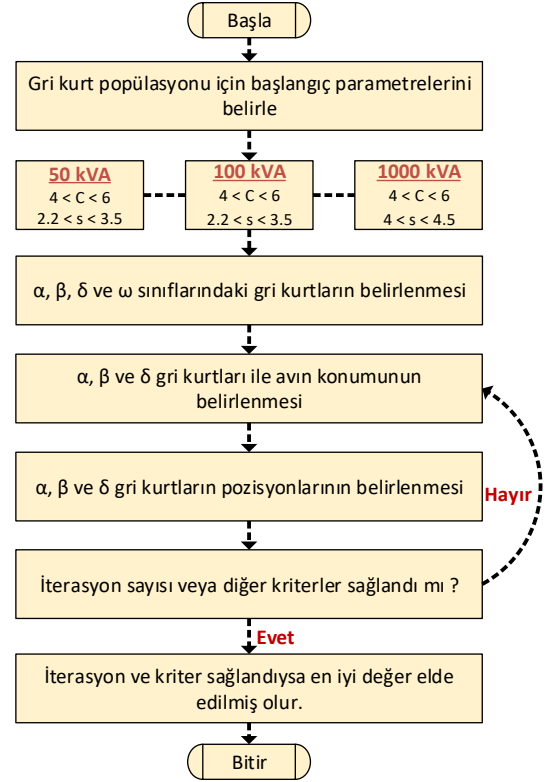
Bu denklemlerde, X_α, X_β ve X_δ gri kurtların pozisyonunu ifade etmektedir. Avlanma sonucunda, avın yeni konumu ise **Denklem 7**'de verilmektedir.

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (7)$$

Gri kurt algoritmasında, avın yeri belirlendikten sonra, avın hareketi durduktan sonra saldırı aşamasına geçilir. **Denklem 3**'te verilen A değeri, α iterasyon ilerledikçe, ikiden sıfıra doğru r rastgele değişkenlerine bağlı olarak azalır. Böylece A değeri, $[-2\alpha, 2\alpha]$ arasında değerler alır. A değerlerine bakıldığında, eğer A değeri birden büyükse, gri kurtlar daha uygun av aramaya başlar, eğer A değeri birden

küçükse, gri kurtlar asgari değerlere ulaşıncaya kadar ava saldırıya zorlanır [22].

Bu çalışmadaki farklı güç seviyesindeki transformatörlerin ağırlığını optimize etmek için kullanılan gri kurt algoritması blok diyagramı **Şekil 3**'te verilmektedir.



Şekil 3. Gri kurt algoritması akış şeması

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde farklı güç seviyesindeki transformatörlerin ağırlık hesabı yapılmaktadır. Farklı güç seviyesindeki transformatörlerin, geleneksel yöntemler ile elde edilen ağırlıkları gri kurt algoritması ile optimize edilmektedir.

3.1 Geleneksel yöntemler ile transformatör ağırlık hesabı

Transformatörlerin ağırlıklarının hesaplanmasında veriler ve ampirik yaklaşımlarla desteklenen varsayımlardan elde edilen geleneksel hesaplama yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan transformatörlerin ağırlıkları [23]'den faydalanılarak belirlenmiştir. Farklı güç seviyesindeki transformatörler için belirlenen ağırlık değerleri, gri kurt algoritması ile optimize edilerek, optimum transformatör ağırlıkları belirlenmektedir. Bir transformatörün demir ve bakır parçaları, bir transformatörün ağırlığını etkileyen iki temel parametredir. Toplam ağırlık (G_T), demir ağırlığı (G_{fe}) ile bakır ağırlığının (G_{cu}) toplamı olarak ifade edilmekte olup, **Denklem 8**'de verilmektedir.

$$G_T = G_{cu} + G_{fe} \quad (8)$$

Toplam bakır ağırlığı, birincil sargı (G_{cu1}) ile ikincil sargı ağırlığının (G_{cu2}) toplamıdır. Toplam demir ağırlığı ise transformatörün boyunduruk ağırlığı (G_{fej}) ve üçayak ağırlığının (G_{feb}) toplamı olarak ifade edilebilir. Bu değerler [Denklem 9-16](#)'da verilmiştir.

$$G_{cu} = G_{cu1} + G_{cu2} \quad (9)$$

$$G_{fe} = G_{feb} + G_{fej} \quad (10)$$

$$q_1 = \frac{I_1}{s} \quad (11)$$

$$q_2 = \frac{I_2}{s} \quad (12)$$

$$G_{cu1} = 3.10^{-5} \gamma_{cu} \omega_1 q_1 L_{m1} \quad (13)$$

$$G_{cu2} = 3.10^{-5} \gamma_{cu} \omega_2 q_2 L_{m2} \quad (14)$$

$$G_{feb} = 3.10^{-3} \gamma_{fe} q_{fe} L_s \quad (15)$$

$$G_{fej} = 3.10^{-3} \gamma_{fe} q_{fej} 2(2M + 0.8D) \quad (16)$$

Belirtilen eşitliklerde, ω_1 ve ω_2 sırasıyla birinci ve ikinci sargının sarım sayılarını, q_{fe} (cm^2) ve q_{fej} (cm^2) sırasıyla, transformatörün ayakları ile çekirdeğin alt-üst kısmı arasındaki demir kesiti parametrelerini ifade etmektedir. Bu parametreler, [Denklem 17-20](#)'de belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır. Ayrıca, q_1 ve q_2 sırasıyla birinci ve ikinci sargı kesitlerini, s akım yoğunluğunu, γ_{cu} bakır özgül ağırlığını, γ_{fe} demir özgül ağırlığını, L_{m1} ve L_{m2} ise sargıların ortalama uzunluklarını ifade etmektedir. Son olarak, transformatörün nüve çekirdeğini çevreleyen dairenin çapı D ile ifade edilmiştir.

$$q_{fe} = C \sqrt{\frac{10^3 S}{3f}} \quad (17)$$

$$q_{fej} = 1.1 q_{fe} \quad (18)$$

$$w_1 = \frac{U_1}{4.44 \sqrt{3} f \theta 10^{-8}} \quad (19)$$

$$w_2 = \frac{U_2}{4.44 \sqrt{3} f \theta 10^{-8}} \quad (20)$$

[Denklem 21](#)'de gösterildiği gibi, transformatörün birincil ve ikincil sargı ağırlığı ile boyunduruk ve bacak ağırlığının toplamı, transformatörün toplam ağırlığını vermektedir.

$$G_{Toplam} = G_{cu1} + G_{cu2} + G_{feb} + G_{fej} \quad (21)$$

Bu çalışmada kullanılan, 50 kVA, 100 kVA ve 1000 kVA yağlı tip transformatörlerin geleneksel yöntemle hesaplanan

ağırlıkları [Tablo 1](#)'de görüldüğü gibi sırasıyla 332.28 kg, 436.3 kg ve 1664 kg'dır.

Transformatör verimi ise çıkış gücünün giriş gücüne oranlanması ile [Denklem 22](#)'de belirtildiği gibi belirlenmektedir.

$$\text{Verim} = \frac{P_{giris}}{P_{çiktis}(P_{giris} + P_{kayıp})} \times 100 \quad (22)$$

Transformatördeki kayıplar ($P_{kayıp}$), demir kayıpları ve sargılardaki akım kaynaklı bakır kayıplarından oluşmaktadır.

Tablo 1. Farklı güç seviyesindeki transformatörlerin parametre değerleri

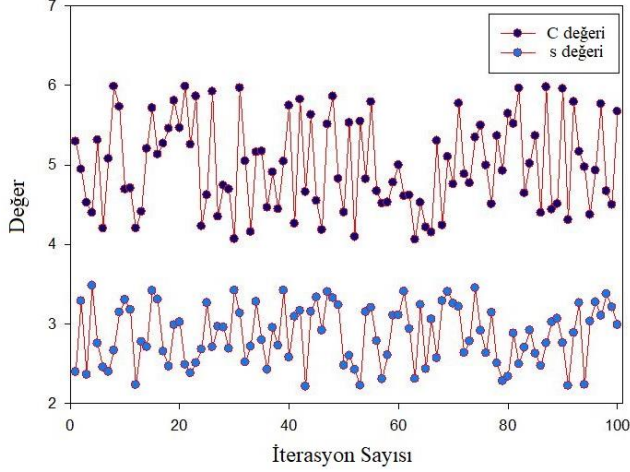
Parametre	Birim	50 kVA	100 kVA	1000 kVA
Demir kesit uygunluk değeri (C)	$cm^2 joule^{-1/2}$	4.6	5-6	4.6
Akım yoğunluk değeri (s)	A/mm^2	2.2	2.6	4-4.5
Birincil sargı dönüşü	turn	5798	2675	420
İkincil sargı dönüşü	turn	70	31	16
Birincil sargı ağırlığı	kg	68.2	63.1	198
İkincil sargı ağırlığı	kg	45.6	46.2	126
Transformatörün üçayaklı ağırlığı	kg	105.8	132.5	652
Transformatörün boyunduruk ağırlığı	kg	112.8	194.5	688
Transformatörün toplam ağırlığı	kg	332.28	436.3	1664
Verim	%	95	92	98.04

3.2 Gri kurt algoritması ile transformatör ağırlık hesabı

Bu çalışma ile farklı güç seviyelerindeki transformatörlerin ağırlığını optimize etmek için gri kurt algoritması, Python yazılımı kullanılarak uygulanmaktadır. Bu algoritma ile transformatörlerin demir parçası değişken parametreleri olan, akım yoğunluğu (s) ve kesit uyumluluk faktörü (C) kullanılmaktadır. 10000 iterasyon gerçekleştirilerek yapılan optimizasyon çalışmasında, s limit değerleri, 50 ve 100 kVA transformatörler için 2.2 ila 3.5 A/cm^2 ve C limit değerleri ise 4 – 6 $cm^2 joule^{-1/2}$ aralığında, 1000 kVA güç transformatörü için ise s değeri 4-4.5 A/cm^2 ve C değeri yine 4 – 6 $cm^2 joule^{-1/2}$ aralığında alınmaktadır. Algoritmanın iterasyonu tamamlama süresi ise kısa ve uygun bir süre olarak değerlendirilen, 20731 ms'dir. Sezgisel algoritmalar yinelemeli hesaplamalar yaparken belirli koşulların karşılanması gerekir. Bu nedenle transformatörlerden elde edilen verim değerinin % 90-99 arasında olması gerekmektedir. Yapılan çalışmada bu durumlara dikkat edilmiştir.

Gri kurt algoritması kullanılarak yapılan 50 kVA ve 100 kVA dağıtım tipi transformatörlerin ağırlık optimizasyonunda 100 gri kurt algoritmaya dahil edilmiş ve

verilen parametreler 10000 iterasyon ile kullanılmıştır. Dağıtım tipi transformatörlerin, gri kurt optimizasyonu sonucunda elde edilen akım yoğunluğu (s) ve kesit uyumluluk faktörü (C) değerlerinin iterasyon sayısına bağlı değişimi Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Dağıtım tipi transformatörlerin C ve s değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi

Tablo 2 ve 3'te ise 50 kVA ve 100 kVA dağıtım transformatörünün optimizasyon sonrasında elde edilen parametre değerleri verilmektedir.

Tablo 2. 50 kVA transformatörünün optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerleri

Parametre	Birim	Klasik	GKA
Demir kesit uygunluk değeri	$cm^2 joule^{-1/2}$	4.6	3.02
Akım yoğunluk değeri	A/mm^2	2.2	2.4
Birincil sargı dönüşü	turn	5798	3287
İkincil sargı dönüşü	turn	70	44
Birincil sargı ağırlığı	kg	68.2	47
İkincil sargı ağırlığı	kg	45.6	31.4
Transformatörün üçayaklı ağırlığı	kg	105.8	76.86
Transformatörün boyunduruk ağırlığı	kg	112.8	78.82
Transformatörün toplam ağırlığı	kg	332.28	229.47
Verim	%	95	95.1

Tablo 2'de, 50 kVA transformatörünün optimizasyon sonucu ağırlığının 332.28 değerinden 229.47 kg değerine düştüğü görülmektedir. Böylece transformatör ağırlığı %31 oranında azaltılmıştır. Literatüre bakıldığında, aynı güç seviyesine sahip transformatör için Ateş Böceği Algoritması ile yapılan ağırlık optimizasyonunda transformatör ağırlığı %11 oranında düşürülmüştür [9,24]. Söz konusu çalışma ile

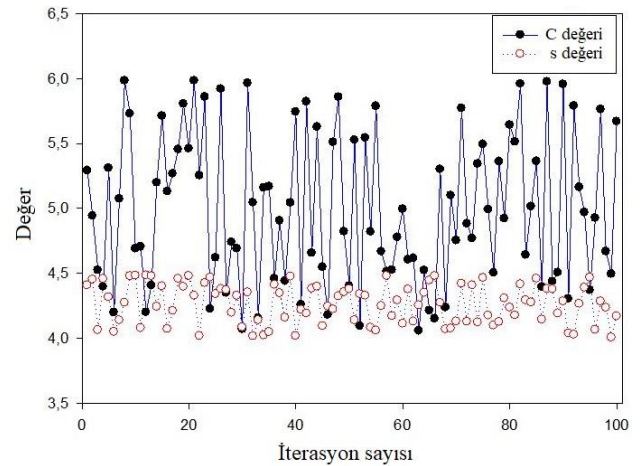
karşılaştırıldığında, gri kurt algoritmasının dağıtım türünde %31 oranları ile daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 3. 100 kVA transformatörünün optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerleri

Parametre	Birim	Klasik	GKA
Demir kesit uygunluk değeri (C)	$cm^2 joule^{-1/2}$	5-6	4.7
Akım yoğunluk değeri (s)	A/mm^2	2.6	2.7
Birincil sargı dönüşü	turn	2675	2060
İkincil sargı dönüşü	turn	31	24
Birincil sargı ağırlığı	kg	63.1	48.8
İkincil sargı ağırlığı	kg	46.2	36.1
Transformatörün üçayaklı ağırlığı	kg	132.5	101.8
Transformatörün boyunduruk ağırlığı	kg	194.5	151.6
Transformatörün toplam ağırlığı	kg	436.3	338.3
Verim	%	92	92.1

Tablo 3'te, 100 kVA transformatörünün, optimizasyon sonucu, ağırlığının 436.3 değerinden 338.3 kg değerine düştüğü görülmektedir. Böylece transformatör ağırlığı %22 oranında azaltılmıştır. Literatüre bakıldığında, aynı güç seviyesine sahip transformatör için İstilacı Ot Optimizasyonu ve Ateşböceği Algoritması ile yapılan çalışma [10,13] ile karşılaştırıldığında, hem güç değerleri hemde yapılan optimizasyon türünde gri kurt algoritmasının daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

1000 kVA güç transformatörünün ağırlık optimizasyonunda ise 100 gri kurt algoritmaya dahil edilmiş ve verilen parametreler 10000 iterasyon ile kullanılmıştır. 1000 kVA güç transformatörünün, gri kurt optimizasyonu sonucunda elde edilen akım yoğunluğu (s) ve kesit uyumluluk faktörü (C) değerlerinin iterasyon sayısına bağlı değişimi Şekil 5'te verilmektedir.



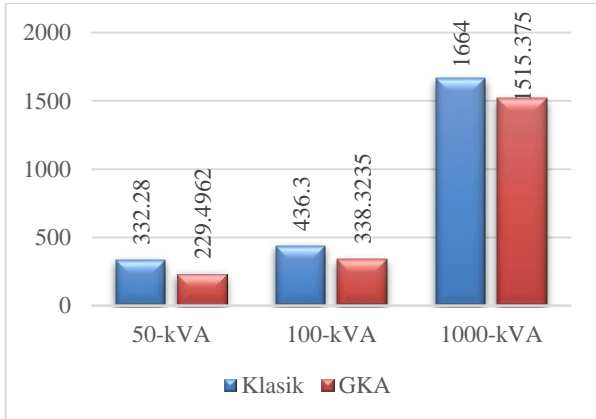
Şekil 5. 1000 kVA güç transformatörünün, C ve s değerlerinin iterasyon sayısına göre değişimi

Tablo 4'te ise 1000 kVA transformatörün optimizasyon sonrasında elde edilen parametre değerleri verilmektedir.

Tablo 4. 1000 kVA transformatörün optimizasyon sonucu elde edilen parametre değerleri

Parametre	Birim	Klasik	GKA
Demir kesit uygunluk değeri (C)	$cm^2 \cdot joule^{-1/2}$	4.6	4.2
Akım yoğunluk değeri (s)	A/mm^2	4-4.5	4.7
Birincil sargı dönüşü	turn	420	380
İkincil sargı dönüşü	turn	16	15
Birincil sargı ağırlığı	kg	198	181
İkincil sargı ağırlığı	kg	126	115
Transformatörün üçayaklı ağırlığı	kg	652	594
Transformatörün boyunduruk ağırlığı	kg	688	626
Transformatörün toplam ağırlığı	kg	1664	1515
Verim	%	98.04	98

Gri kurt algoritması ile elde edilen farklı güç seviyelerine sahip transformatörlerin ağırlık değerleri, klasik yöntem kullanılarak hesaplanan ağırlık değerleri ile kıyaslanarak, Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Optimizasyon sonucu farklı güç seviyesindeki transformatörlerin toplam ağırlık değerleri

Şekil 6 incelendiğinde, gri kurt algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda, 50 kVA, 100 kVA ve 1000 kVA transformatörlerin ağırlıkları, sırasıyla, %31, %22 ve %9 oranında azaltıldığı görülmektedir.

Şekil 6'da belirtilen transformatör ağırlıklarının maliyet yüzdeleri Tablo 5'te verilmektedir [25]. Transformatörün çekirdek ve sargı ağırlıkları, toplam transformatör ağırlığının, sırasıyla % 48.2 ve % 22'lik kısmını oluşturmaktadır.

Tablo 5. Dağıtım transformatörlerinin imalatında kullanılan malzemelerin maliyet yüzdeleri

Transformatör malzemesi	Maliyet (%)
Manyetik çelik	48.9±5.5
Sargılar (Bakır ve Alüminyum)	22±6
Yalıtım	14.1±5.5
Fabrikasyon parçaları	15±9
Toplam	100

Bu maliyet oranları dikkate alındığında, uluslararası standartlara uygun üretilen farklı güç seviyesindeki dağıtım transformatörlerinin, gri kurt algoritması kullanılarak elde edilen optimum ağırlıkları göre belirlenen güncel maliyetleri Tablo 6'daki gibi olmaktadır. Dağıtım transformatörlerinin birim ağırlık maliyeti 14.37 € olarak belirlenmektedir [26].

Tablo 6. Farklı güç seviyesindeki transformatörlerin üretim maliyetleri

Parametre	50 kVA		100 kVA		1000 kVA	
	Klasik	GKA	Klasik	GKA	Klasik	GKA
Toplam Transformatör Ağırlığı (kg)	332.28	229.4	436.3	338.3	1664	1515
Birim Ağırlık maliyeti (€)	14.37	14.37	14.37	14.37	14.37	14.37
Toplam ağırlık maliyeti (€)	4774	3296	6270	4861	23911	21770

Tablo 6 incelendiğinde, gri kurt algoritması kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda, 50, 100 ve 1000 kVA transformatörlerin ağırlık parametrelerinin sebep olduğu üretim maliyetleri de sırasıyla, %31, %22 ve %9 oranında azaltıldığı görülmektedir. Dağıtım türü transformatörlerin endüstride % 80-85 oranında sayıları olduğu gözletildiğinde ağırlıktaki bu oranda azalma maliyetlerde gözle görülür azalmayı sağlayabilecektir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında yaygın kullanıma sahip farklı güç seviyelerindeki transformatörlerin ağırlıklarının optimize edilebilirliği incelenmiştir. Güncel bir sezgisel metot olan gri kurt algoritması; dağıtım türü transformatör güçlerinden 50 kVA ile 100 kVA gücündeki transformatör ağırlığı için ve güç transformatörü olarak da 1000 kVA transformatöre uygulanmıştır. Optimizasyon sonucunda; 332.28 kg olan 50 kVA transformatörün ağırlığı, 229.49 kg, 436.3 olan 100 kVA transformatörün ağırlığı, 338.32 kg ve 1664 kg olan 1000 kVA güç transformatörün ağırlığı 1515.37 kg olarak optimize edilmiştir. Böylece, söz konusu transformatörlerin ağırlıkları sırasıyla, %31, %21 ve %9 oranında azaltılmıştır. Literatürde transformatör ağırlık optimizasyonu tek tür transformatör ve tek bir güç değeri üzerinden değerlendirilirken, bu çalışmada özgün olarak farklı tür ve farklı güç değerlerinde sezgisel algoritmanın nasıl etkinlik gösterdiği de belirlenmektedir. Ayrıca transformatör ağırlık optimizasyonu ile işletme maliyetinde de nasıl bir değişim

olacağı belirlenmektedir. 50 kVA transformatör için 1476 €, 100 kVA transformatör için 1351 € ve 1000 kVA güç transformatörü için ise 2141 € maliyet azalışı sağlanmaktadır. Bu çalışma ile elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kullanım sayısı olarak oransal çoğunluğa sahip güç ve dağıtım transformatör türleri için optimum ağırlık ve buna bağlı maliyet optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Gri kurt algoritması ile elde edilecek yeni tasarım parametreleri ile tasarlanan transformatörlerin işletme maliyetini azaltacağı, tasarım planlamalarında iyi sonuçlar elde edilebileceği gözetilerek kullanımının artıracığı ve farklı çalışma alanlarında da uygulanacağı değerlendirilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %1

Kaynaklar

- [1] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M.A. Tsili, and A. G. Kladas, Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation. IEEE transactions on magnetics, 45(3), 1720-1723, 2009. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2012795>.
- [2] M. I. Abdelwanis, A. Abaza, R. A. El-Sehiemy, M. N. Ibrahim and H. Rezk, Parameter Estimation of Electric Power Transformers Using Coyote Optimization Algorithm With Experimental Verification. IEEE Access, 8, 50036-50044, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978398>.
- [3] S. Bogarra, A. Font, I. Candela and J. Pedra, Parameter estimation of a transformer with saturation using inrush measurements, Electr. Power Syst. Res., 79(2), 417-425, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.08.009>.
- [4] I. Beyin, Kuru tip transformatörlerin çelik parçalarında şekil optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [5] H. Malik and R. K. Jarial, Fuzzy-Logic Applications in Cost Analysis of Transformer's Main Material Weight, 2011 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, pp. 386-389, Gwalior, India, 2011.
- [6] Ö. Sevim ve M. Sönmez, Geliştirilmiş yapay arı koloni algoritması ile kafes ve düzlemsel çelik yapıların optimum tasarımı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(2), 8-51, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.239368>.
- [7] H. Rezaei, O. Bozorg-Haddad and X. Chu, Grey wolf optimization (GWO) algorithm. In Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms, 81-91, 2018. <https://doi.org/10.35378/gujs.820885>
- [8] S. Tosun, A. Öztürk, H. Demir ve L. Kuru, Kuru tip transformatörün tabu arama algoritması yöntemi ile ağırlık optimizasyonu, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 1(1), 17-26, 2012.
- [9] T. Demirdelen, Kuru tip transformatör optimizasyonuna yeni bir yaklaşım: Ateş böceği algoritması, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1), 87-96, 2018, <https://doi.org/10.21605/cukurovau mmfd.420675>.
- [10] M. Çelebi, Genetik algoritma ile kuru bir trafonun ağırlık optimizasyonu ve sonlu elemanlar metodu ile analizi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2) , 30-36, 2009.
- [11] L. Yang, X. Liu, and J. Yang, A new compensation method for insulated core transformer power supply and its optimization using genetic algorithm, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip, 960, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163585>.
- [12] S. Kül, S. A. Celtek ve İ. İskender, Metaheuristic algorithms based approaches for efficiency analysis of three-phase dry-type transformers, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(4), 889-903, 2021. <https://doi.org/10.36306/konjes.946496>
- [13] I.Ö. Aksu and T. Demirdelen, A comprehensive study on dry type transformer design with swarm-based metaheuristic optimization methods for industrial applications. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 40(14), 1743-1752, 2018. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1486908>.
- [14] M. Tören and H. Mollahasanoglu, Comparison of Heuristic Approaches in Weight Optimization of Different Power Levels Transformers. IETE Journal of Research, 1-15. 2022. <https://doi.org/10.1080/03772063.2022.2098188>
- [15] J. Liu, X. Wei and H. Huang, "An Improved Grey Wolf Optimization Algorithm and its Application in Path Planning," in IEEE Access, 9, 121944-121956, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108973>.
- [16] J. Dhikary and S. Acharyya, Randomized Balanced Grey Wolf Optimizer (RBGWO) for solving real life optimization problems. Applied Soft Computing, 117, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108429>.
- [17] S. Arıkan ve F. Latifoğlu , "Gri Kurt Optimizasyon Algoritması ile Kosinüs Modüleli Süzgeç Bankası Tasarımı", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, no. 26, pp. 472-476, Jul. 2021, [doi:10.31590/ejosat.960637](https://doi.org/10.31590/ejosat.960637)
- [18] H. Ç. Kılınç and Y. Öztürk , "Hibrit Gri Kurt Optimizasyonu ile Kapılı Tekrarlayan Birim Modeli Kullanılarak Günlük Akım Tahmini", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, no. 35, pp. 259-267, May. 2022, [doi:10.31590/ejosat.1062777](https://doi.org/10.31590/ejosat.1062777)
- [19] M. Mutluer, Design Optimization of PM Synchronous Motor Using Gray Wolf Optimization Algorithm, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 24, 274-278, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.898907>.
- [20] H. Ç. Kılınç ve Y. Öztürk, Hibrit gri kurt optimizasyonu ile kapılı tekrarlayan birim modeli kullanılarak günlük akım tahmini, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 35, 259-267, 2022, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1062777>
- [21] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili and A. Lewis A, Grey wolf optimizer. Adv Eng Softw 69(3), 46-61, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3310-y>.
- [22] F. A. Şenel, A. S. Yüksel, F. Gökçe ve T. Yiğit , "Gri kurt optimizasyon algoritması ile iki boyutlu dizilim yazılımının geliştirilmesi", Balıkesir Üniversitesi Fen

- Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(2). 293-306, 2018.
<https://doi.org/10.25092/baunfbed.433321>.
- [23] T. Boduroglu, Elektrik Makinaları Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1994.
- [24] M. Akdağ ve M. Çelebi , "Ateş Böceği Algoritması ile Yağlı Tip Transformatörün Ağırlık Optimizasyonu", Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, vol. 13, no. 2, pp. 169-180, Jun. 2022, [doi:10.24012/dumf.1075008](https://doi.org/10.24012/dumf.1075008)
- [25] J. C. Olivares-Galvan and P.S. Georgilakis, "Core lamination selection for distribution transformers based on sensitivity analysis," *Electrical Engineering*, 95(1), 33-42, 2013.
- [26] A. Safigianni and V. Sarris, "Economical Estimation of the Maintenance of Distribution Transformers," *Proc. Eighth IASTED Int. Conf. Power Energy Syst. Eur.*, 23-25, 2008.





İzolesiz bir off-grid PV destekli elektrikli araç şarj istasyonunun şarj ünitesi tasarımı

Design of a non-isolated charging unit of an off-grid PV supported electric vehicle charging station

Mohamad Nedal Sahloul^{1,*}, Ahmet Deniz², Fatih Onur Hocaoglu³

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yenilenebilir Enerji Sistemleri ABD, Afyonkarahisar, Türkiye

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Çay Meslek Yüksekokulu, Afyonkarahisar, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Afyonkarahisar, Türkiye

Öz

Jeopolitik riskler ve buna bağlı olarak artan fosil yakıt maliyetleri nedeniyle, elektrikli araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması, şarj istasyonlarının artmasına, beraberinde elektrik şebekesi üzerindeki yükün artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple yeni şarj sistemlerinin tasarımlarının yapılması gerekli hale gelmektedir. Bu çalışmada, güneş enerjisi ile desteklenmiş bir elektrikli araç şarj sisteminde bulunan şarj ünitesinin Matlab/Simulink ortamında tasarımı yapılmıştır. Şarj ünitelerinde kullanılan izoleli (transformatörlü) DC-DC dönüştürücüler yerine, tasarlanan şarj ünitesinde izolesiz (güç elektronik devreli), çok katlı yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır. Böylece transformatörlerin kullanılmamasıyla birlikte; trafo kayıpları (transformatör bobinlerinde meydana gelecek ısı kayıpları) sıfırlanmış, kullanılan devrelerin boyutlarının azaltılması ve sistem maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan sisteme ait verilerin grafikleri verilerek yorumları yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik enerji, Güç elektroniği, Çok katlı yükseltici dönüştürücü, Elektrikli araç şarj istasyonu.

1 Giriş

Ulaşım sektörü, fosil yakıtların en fazla tüketildiği ve çevreye olumsuz etkileri olan sektörlerden biridir. Fosil yakıtların ömürlerinin giderek tükenmesi, jeopolitik nedenlerle petrol ürünlerinde ortaya çıkan fiyat artışları ve küresel ısınma sorunları gibi nedenlerle içten yanmalı motora sahip araçlardan elektrik motorlu araçlara geçiş büyük önem kazanmıştır. Ancak günümüzde üretim maliyeti, yüksek satış fiyatı, kısa menzil, uzun şarj süresi, şarj istasyonlarının konumu ve yetersiz altyapı gibi birçok faktörler elektrikli araçların yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır. Diğer taraftan elektrikli araç teknolojilerinin yaygınlaşması, beraberinde batarya teknolojileri ve şarj istasyonlarının teknolojilerinin de geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Batarya teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, yüksek kapasite ve enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon polimer pil

Abstract

Due to geopolitical risks and the consequent rising fossil fuel costs, the interest in electric vehicles is increasing. The widespread use of electric vehicles causes an increase in charging stations and an increase in the load on the electricity grid. For this reason, it becomes necessary to design new charging systems. In this study, the charging unit in an electric vehicle charging system supported by solar energy was designed in Matlab/Simulink environment. Instead of insulated (transformer) DC-DC converters used in charging units, non-isolated (power electronic circuit) multi-stage boost converters are used in the designed charging unit. Thus, if the transformers in not of use; transformer losses (heat losses that will occur in transformer coils) are zeroed, it is aimed to reduce the size of the circuits used and to reduce the system cost. The graphics of the data of the designed system were given and comments were made.

Keywords: Photovoltaic energy, Power electronic, Multi-phase boost converter, Electrical vehicle charging station.

hücrelerinin kullanımı elektrikli araçların kullanımının hızlanmasına neden olmuştur. Bununla beraber elektrikli araçların yayılmasına etki eden başka faktörler de vardır. Bunlara örnek, çok daha az hareketli parçaya sahip olmaları, bunun sonucunda da daha az arıza vermeleri ve arızaların teşhis ve onarımlarının daha hızlı ve kolay olması, daha az işçilik gerektirmeleri gibi birçok etken söylenebilir. Kerem vd. [1, 2] elektrikli araçların gelişimini etkileyen faktörlerin arasında önemli bir başka hususun da elektrikli araçların şarj problemleri olduğunu vurgulamıştır.

Elektrikli araç şarj sistemleri ile ilgili yapılan çalışmaları, bu çalışmada; elektrikli araç şarj teknikleri, dahili şarj ünitesi tasarımı, harici şarj ünitesi tasarımı ve fotovoltaik enerji ile beslenen şarj sistemlerinin tasarımı başlıkları altında örnekleriyle Bölüm 2'de toplanmıştır. Mevcut şarj sistemlerinin genel olarak sınıflandırılması, özellikleri ile birlikte sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca yenilenebilir enerji

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mohamad-nedal.sahloul@usr.aku.edu.tr (M. N. Sahloul)

Geliş / Received: 09.06.2022 Kabul / Accepted: 29.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1128466

kaynaklarından güneş enerjisi ile beslenen şarj sistemleri de incelenmiş, bu sistemlerde kullanılan devre çeşitleri ile mevcut kullanılan topolojilerden bazıları verilmiştir.

Bölüm 2’de yapılan daha önceki literatür çalışmalarının sınıflandırılmasına göre; bir harici şarj ünitesi, tek fazlı çok katlı yükseltici dönüştürücü kullanarak tasarlanması, Matlab-Simulink ortamında simülasyonu, elde edilen veriler ve grafikleri Bölüm 3’te verilmiştir. Bölüm 4’te ise sonuçlar yorumlanmıştır.

2 Elektrikli araç şarj istasyonları üzerine gerçekleştirilmiş olan çalışmalar

Elektrikli otomobillerin yaygınlaşmasını daha da hızlandırmak için; şarj istasyonlarının altyapısını iyileştirmeye, daha geniş alana yayılmasına ve daha verimli çalıştırmaya yönelik çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Bu çalışmalar hem konut sistemleri hem de ticari kamu şarj cihazları ile ilgilidir. Özellikle, hızlı şarj istasyonlarına talebin artması beklenmektedir, bu da tüketicileri uzun mesafelerde elektrikli araçları kullanmaya teşvik ederken elektrik şebekesine olan yükün etkisini gündeme getirecektir. Bu bölümde elektrikli araç şarj istasyonları üzerine literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar kategorize edilerek örneklenmiştir.

2.1 Elektrikli araç şarj teknikleri üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar

Elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılan bataryaların şarj sistemleri, çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır.

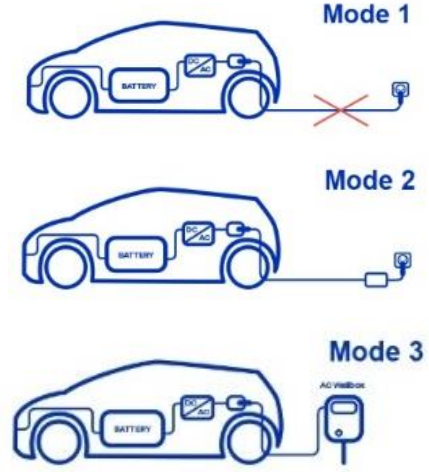
Şarj sistemleri kullanım yerlerine göre ev tipi şarj sistemleri ve ticari şarj istasyonları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Diğer taraftan şarj istasyonları, şarj ünitesinin konumuna göre sınıflandırıldığında ise dahili (araç içi) ve harici (araç dışı) şarj ünitesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu tür sınıflandırmada, şarj devrelerinin hız ve verimliliği, IEC 61851-1 Avrupa standartlarına göre belirlenmiştir. [2,3]

2.1.1 Dahili şarj ünitesi (On-Board Charging)

Dahili şarj sistemine sahip elektrikli araçlarda şarj ünitesi ile şebekeden gelen tek fazlı veya üç fazlı alternatif akımı doğrultarak enerjiyi araç bataryasına sabit akım şeklinde aktarılmakta ve şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan sınıflandırmaya göre dahili şarj sistemi, şarj hızına göre üç farklı şarj seviyesi (charging level) içerir, ve bu şarj seviyeleri Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 olarak adlandırılmaktadır ve Şekil 1’de bağlantı şekilleri, Tablo 1’de ise güç seviyeleri gösterilmektedir. [3-5]

Mod 1’de, elektrikli araç basit bir uzatma kablosu ve standart bir priz kullanılarak doğrudan bir AC prize bağlanarak şarj işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu seviyedeki yöntem yavaş şarj yöntemi olarak bilinmektedir. Mod 2’de ise, AC prizini araca bağlayan kablo üzerinde bulunan kontrol kutusu kullanılarak batarya şarj edilmektedir. Burada kontrol kutusunun amacı, araç bataryasına uygun akım ve gerilimi güvenli bir şekilde sağlamaktır. Şekil 2 ve 3’te, Mod 1 ve Mod 2’de kullanılan şarj sistemlerin blok diyagramları ve devre topolojileri gösterilmiştir.

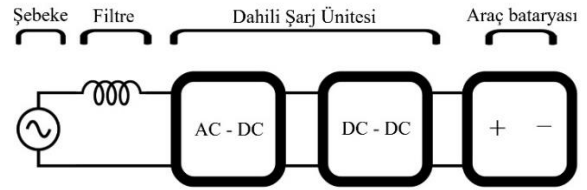
Mod 3’te kullanılan sistem, Mod 2’ye benzer, ancak kontrol kutusu, kablo üzerinde değil şebekeden enerjisini alan sabit bir modül haline gelmiştir.



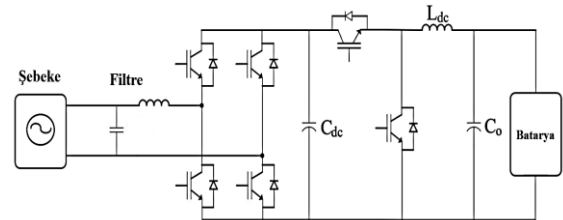
Şekil 1. Şarj modları.

Tablo 1. Elektrikli araçlar şarj seviyeleri. [6]

Şarj Seviyesi	Faz sayısı	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (KW)
Mod1	1 faz	120	12	1.44
Mod2	1 veya 3 faz	208/240	32	7.7
Mod3	3 faz	480	100	48



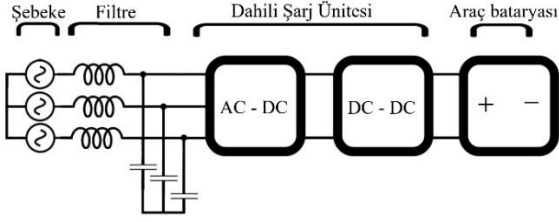
Şekil 2. Mod 1 ve Mod 2 blok diyagramı



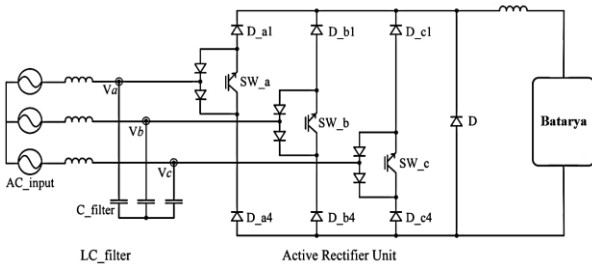
Şekil 3. Mod 1 ve Mod 2 devre topolojisi. [4]

Bu seviyede, elektrik şebekesine sürekli olarak bağlı bir güç kaynağı sistemi aracılığıyla aracın şarj edilmesi sağlanmaktadır. Araç üzerindeki şarj sisteminin blok

diyagramı Şekil 4'te ve şarj ünitesinin devre topolojisi Chae vd. [7] yaptıkları çalışmaya göre Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4. Mod 3 blok diyagramı



Şekil 5. Mod 3 devre topolojisi. [7]

2.1.2 Harici şarj ünitesi (Off-Board Charging)

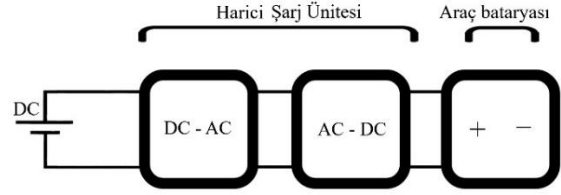
Harici şarj yöntemine dayanan araçlardaki şarj işlemi, yerleşik şarj cihazını atlayarak harici şarj ünitesinden doğrudan araç bataryasına sağlanan DC güç ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem DC şarj yöntemidir ve Mod 4 olarak tanımlanır.

DC ile şarj işlemi, AC 1. ve 2. seviyelerine kıyasla çok yüksek güç seviyeleri sağlayabilmektedir ve bu sayede araç bataryasının kapasitesinin 1/2'sinden fazlası 10 dakikadan daha kısa bir sürede şarj edebilmektedir. Genel olarak bu durumda kullanılan şarj ünitesinin yapısı, AC-DC doğrultucu ve DC-DC dönüştürücüden oluşmaktadır. AC-DC aşaması şebekeden gelen alternatif akımı doğrultma aşamasıdır, bu aşama için birkaç tip AC-DC doğrultucu kullanılabilir. Ardından farklı DC-DC dönüştürücü topolojileri kullanılır.

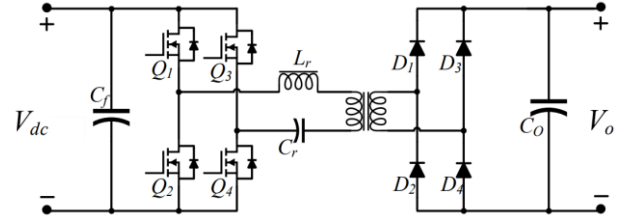
DC-DC dönüştürücüler topolojisi, farklı voltaj seviyeleri ihtiyacına ve kullanılan sistem tipine göre izoleli (yüksek frekans transformatorlü) ve izolesiz (güç elektronik devreli) olarak sınıflandırılır. İzoleli DC-DC dönüştürücüler; çift yönlü şarj istasyonu için Kondo vd. [8], Zhu vd. [9] çalışmalarında kullanmışlardır. Chakraborty vd. [10] ise yaptıkları çalışmalarında hem izoleli hem de izolesiz dönüştürücülere değinmiştir. İzoleli sistemlerde görüldüğü gibi akımı AC formuna dönüştürüp transformator yardımıyla istenilen gerilim seviyesine ayarlanıp, enerji daha sonra tekrar DC forma dönüştürülür. İzoleli sistemin devre topolojileri ve blok diyagramları sırasıyla, Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir.

İzoleli sistemlere örnek olarak Xiaodong ve Yi-Fan [11] çalışmalarında çift aktif köprü dönüştürücüsü (DAB) kullanmış ve bu sistemin topolojisi Şekil 8'de gösterilmiştir.

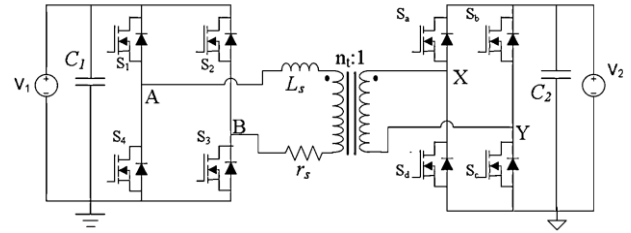
İzole olmayan dönüştürücülerde gerilim değerini yükseltme işlemi, transformator yerine güç elektroniği devreleri kullanılarak gerçekleştirir.



Şekil 6. Mod 4 blok diyagramı (izoleli DC-DC aşaması).



Şekil 7. İzoleli DC-DC dönüştürücü devresi. [10]



Şekil 8. Çift aktif izoleli dc-dc dönüştürücü. [11]

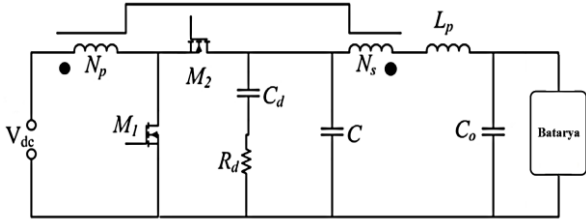
2.2 Fotovoltaik enerjisi ile beslenen şarj ünitesi

Şebekeden gelen enerji kullanılarak sistemlerin şarj edilmesi, özellikle yoğun talep döneminde elektrik şebekesine ek bir yük getirir. Elektrikli araçlarının yaygınlaşması şarj ünitelerinin sayıca artmasını beraberinde getirecek ve dolayısıyla artan tüketimi karşılayacak yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyacı da arttıracaktır. Elektrikli araç bataryalarını, Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak şarj etmek, bu olumsuz etkiyi azaltmak için uygun çözümlerden bir tanesidir.

Fotovoltaik (PV) modül fiyatlarının sürekli düşüş eğiliminde olması, güneş enerjisini bu amaç için iyi bir kaynak olarak karşımıza çıkarmaktadır. Güneş panelleri en yaygın yenilenebilir enerji kaynağı olup ve benzersiz özellikleri, çeşitlendirilmiş gelişimi ve sürekli ilerleyen teknolojisi sayesinde yaşamın enerji gerektiren birçok alanında kullanımları bulunmaktadır.

Güneş enerjisi sistemleri, iş yerlerinde ve otoparklarda elektrikli araçların şarj edilmesi için de ekonomik ve kullanışlı bir çözümdür. Ayrıca, güneş enerjisi ünitelerinin en iyi özelliklerinden birisi şebekeden bağımsız (Off-Grid) şarj istasyonları tasarlama olanağına imkan tanınmaktadır. Güneş panellerinden gelen enerjiyi depolamak ve yüke (araba bataryasına) aktarmak için DC-DC dönüştürme

teknikleri kullanılmaktadır. DC şarj cihazı, şarj edilmekte olan aracın bataryasına uygun olan terminal voltajı ve akımı sağlaması için kullanılmaktadır.



Şekil 9. Çift yönlü izole olmayan DC-DC güç elektronik dönüştürücüsü. [12]

Güneş enerji sistemlerinde kullanılan bazı çift yönlü dc-dc devreleri ve şarj modları Bhatti vd. [12] çalışmasında gösterilmiştir. Çift yönlü DC şarj cihazının en temel konfigürasyonu, iki çeyrek dc-dc dönüştürücüsüdür ve şarj sırasında gerilim düşürücü görevi, deşarj sırasında ise yükseltici görevi görür (Şekil 9). Aynı çalışmada, izoleli ve izolesiz DC-DC dönüştürücülerin kullanıldıkları yerlere göre tercih edilebileceğinden bahsedilmiştir. Hatta izolesiz dönüştürücülere yüksek verimli (%95'e varan), düşük maliyetli olan örneklerine de yer verilmiştir.

Tam güç kontrolünü sağlamak için çift yönlü devreler kullanılmaktadır. Ancak, aracın bataryasından gelen enerjinin şebekeye geri aktarılmasına gerek olmadığı zamanlarda (araçtan şebekeye durumu) bu yetenek gerekli değildir.

Bunun dışında, literatürde elektrikli aracın bataryasını şarj etmek için uygun şekilde kullanılabilecek çok sayıda DC-DC dönüştürücü geliştirilmiştir. [8,12-14]

3 Güneş enerjisi destekli şarj sistemi tasarımı

Bu çalışmada şebekeden bağımsız bir elektrikli araç şarj sisteminin PV ünitesinden gelen enerjiyi depolama bataryalarından araç bataryasına aktaran verimi yükselten bir şarj ünitesi tasarlanmıştır.

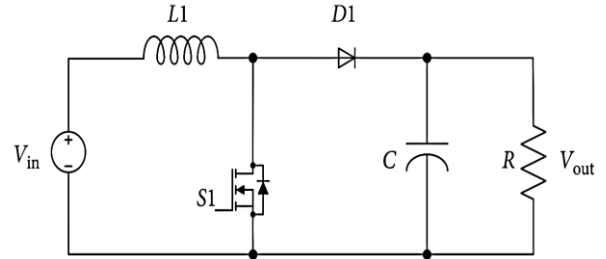
Tasarlanan sistemde, fotovoltaik enerjinin kesintili bir enerji kaynağı olması nedeniyle, güneş olmadığı zamanlarda enerji sağlamak için depolama bataryaları kullanılmaktadır.

Şekil 10'da verilen sistemde, depolama bataryalarından akımı çeken ve voltajı araç bataryasına uygun bir seviyeye yükselten, güç elektroniği devresi olan gerilim yükseltici (Boost) dönüştürücüsünün topolojilerinden bir tanesi, araç batarya şarj ünitesi olarak kullanılmıştır. Araç bataryasının şarj işlemine sağlanması gereken gerilim ve akım değerlerini belirtmesi ve yükseltici dönüştürücüsünün anahtarlama sinyalini üretmesi, sistemdeki kontrol devresi tarafından sağlanmaktadır.

3.1 Yükseltici dönüştürücü

Yükseltici (Boost) dönüştürücüsü güç elektroniğinin anahtarlama dönüştürücülerinden (SMPS) bir tanesidir. Çıkış voltajı her zaman giriş voltajından daha büyüktür. Regüle edilmiş DC güç kaynakları ve DC motorların rejeneratif frenlemesi yükseltici dönüştürücülerin kullanım alanlarındandır. [15,16]

Yükseltici dönüştürücünün ana topolojisi Şekil 11'de gösterilmiştir.

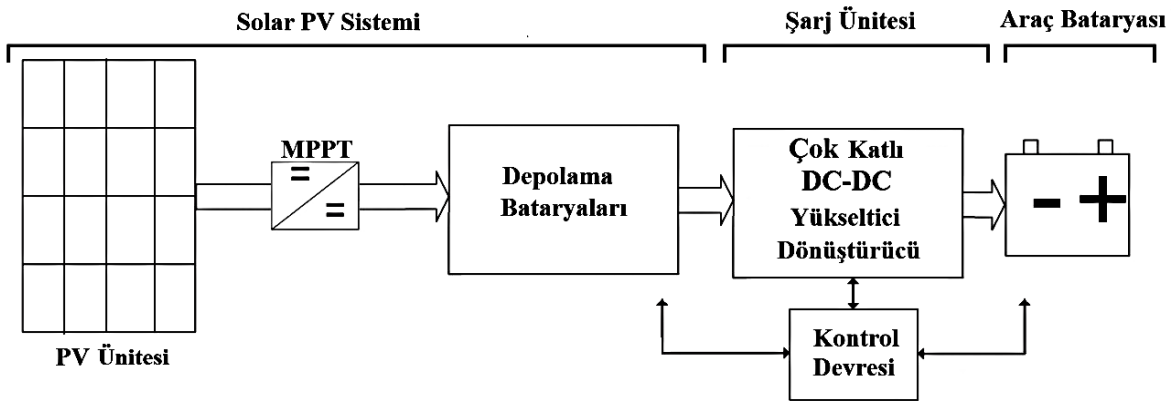


Şekil 11. Yükseltici dönüştürücünün devre şeması. [17]

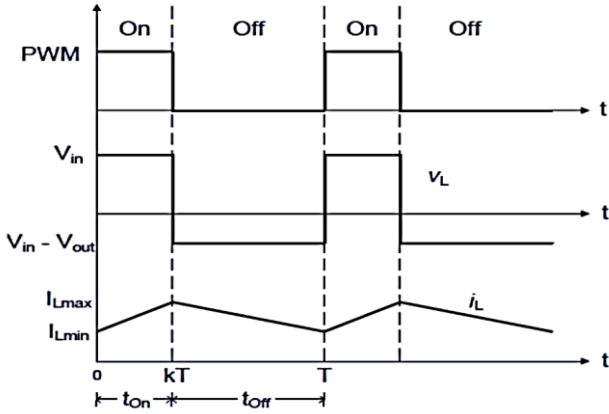
Devrenin çalışma prensibi, anahtar kapalıyken diyaot kesimde kalır, böylece çıkış katı izole edilir ve indüktörde enerji depolanır. Anahtar açıkken, çıkış tarafı, girişten yanı sıra indüktörden de enerji alır.

Giriş ve çıkış güç ifadelerinin tanımlanmasıyla, ortalama akım ve bobin akımları bulunabilir. Sürekli iletim durumu için kararlı durumda bobin akımı sürekli akar $I_L > 0$.

Bobin gerilim ve akımın dalga şekli anahtarlama sinyaline göre Şekil 12'de gösterilmektedir.



Şekil 10. Tasarlanan sistemin blok diyagramı.



Şekil 12. Bobin gerilim ve akımın dalga formu. [18]

Çıkış voltajı, sabit DC dalga formuna sahip giriş geriliminden daima daha büyüktür. Çıkış ve giriş gerilimlerin arasındaki transfer fonksiyonu Denklem (1)'de gösterilmiştir.

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (1)$$

Burada D, anahtarlama sinyalinin görev döngüsü (Duty cycle), 0 ile 1 arasında değer alır.

Dönüştürücü sürekli iletim durumunda çalışmasını sağlamak için dönüştürücüdeki bobinin akımı sıfıra düşmemesi şartıyla bobin indüktansının minimum değeri Denklem (2) ile hesaplanabilir.

$$L_{min} = \frac{V_o \times D \times (1-D)^2}{2 \times I_o \times f_{sw}} \quad (2)$$

Çıkış voltajındaki tepeden tepeye dalgalanma oranı ise Denklem (3) ile hesaplanabilir.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D \times I_o}{C \times V_o \times f_{sw}} \quad (3)$$

Çıkış gerilimindeki dalgalanma oranını azaltmak için çıkış kondansatörün kapasitans değeri uygun olarak seçilmelidir.

3.2 Çok katlı yükseltici dönüştürücü

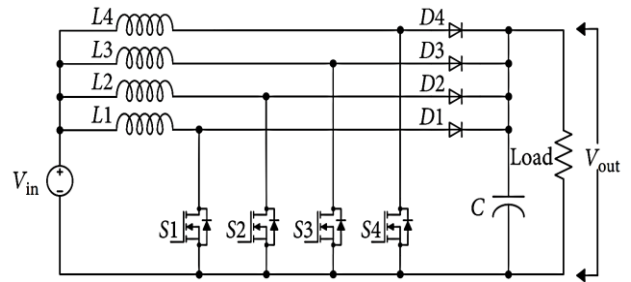
Araç bataryasını şarj etmek için tek katlı bir yükseltici dönüştürücü kullanılabilir. Ancak, araç bataryasına gerekli olan gücü sağlamak için yüksek akım çekilmesi gerekir. Bu durumda tek katlı bir yükseltici dönüştürücü devresindeki elemanlar akım taşıma kapasitesini aşabilir ve sistemin işleyişine olumsuz etkiler sebep olabilir. Aynı zamanda çıkış akım dalgalanmasının değişim aralığını daraltmak için, dönüştürücünün bobin boyutunun büyük olmasını gerektirir. Büyük bobin, sarım maliyetini ve sistemin boyutunu artırır.

Chakraborty vd. [10]'nin yaptıkları çalışmada bu problem vurgulanmıştır. Yükseltici dönüştürücü, yüksek akımdan etkilenen elektronik devre elemanlarını da içermektedir. Devrede kullanılan anahtarlama elemanı ve geçiş diyotunun akım taşıma kapasiteleri sınırlı olduğundan çok katlı dönüştürücü kullanımı problemin önüne geçmeyi sağlar.

Çok katlı yükseltici dönüştürücü, birden fazla aynı tip dönüştürücülerin paralel bağlanmasıyla oluşturulur ve anahtarlama sinyallerin aralarında $2\pi/n$ (n, dönüştürücünün kat sayısına karşılık gelir) faz farkı ile kaydırılarak katlara dağıtılır. Bu işlem sayesinde, akım ve gerilimdeki dalgalanmanın azalması, buna bağlı olarak giriş ve çıkıştaki kondansatörlerin kapasitesinde büyük değerlerin talebinin azalması, devreye girecek kat sayısının kontrol edilmesi, gibi faydalarla yüksek verimli ve daha hızlı tepki gösteren devre elde edilir. Çok katlı yükseltici dönüştürücünün çalışma prensibi Laoprom ve Tunyasirut [17], ve Jarabicová ve Kaščák [19] çalışmalarında açıklanmıştır.

Çalışmamızda tasarlanan sistemde, tek katlı yükseltici dönüştürücü yerine, çok katlı yükseltici dönüştürücü kullanarak, akımı katlara dağıtılması sağlanmaktadır. Önerilen sistemde kontrol sistemini basitleştirmek için akım ve gerilimde büyük dalgalanma olmaması halinde; anahtarlama elemanlarına tek bir anahtarlama sinyalinin verilmesi yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Böylece kullandığımız devre tek fazlı çok katlı yükseltici dönüştürücü olarak adlandırılabilir. Sistemde önerilen şarj ünitesinin devre şeması Şekil 13'te gösterilmektedir.

Sistemin performansını iyileştirmek ve daha düzgün yanıt alabilmek için PID Srilatha vd. [20], Chan vd. [21] ve Leite vd. [22] yaptıkları çalışmalarda PID birimi eklenmesini uygun görmüşlerdir.



Şekil 13. Çok katlı yükseltici devresi.[17]

3.3 Sistemin simülasyonu

Önerilen sistemin etkinliğini ve uygulanabilirliğini kontrol etmek için Matlab simülasyon programı kullanılmıştır.

Çalışmada tasarlanan çok katlı şarj devresinin; çalışma verimliliğini incelemek, akımın dönüştürücüdeki katlara dağıtılmasını tespit etmek için simülasyonu yapılmıştır.

Tasarlanan sistem; şarj edilecek olan 24 kWh kapasiteli elektrikli araç bataryası, önceden güneş panelleri tarafından şarj edilmiş olarak kabul edilen depolama bataryası ve araç bataryasına enerji aktarımından sorumlu olan şarj ünitesini içermektedir. Şarj ünitesinde bulunan elemanların akım taşıma kapasitesini aşmayacak bir şekilde dönüştürücü dört

kattan oluşturulmaktadır. Devrenin çalışma mekanizması kontrol devresi tarafından belirlenir. Kontrol devresi devreye girecek katların sayısını belirlemek ve mosfetlere sağlanan anahtarlama sinyalinin üretmekten sorumludur. Simülasyonda kontrol devresinin işlevini yapan MATLAB FONKSİYONU içinde kod olarak yazılmıştır. Yapılan simülasyon topolojisi Şekil 14'te gösterilmiştir

Sistemde kontrol devresi, kullanıcı tarafından girilen araç bataryasının nominal gerilimi ve depolama bataryasının gerilim değerlerini algılayıp üretilecek PWM sinyalinin görev döngüsünün değerini belirtir. Ayrıca, bataryanın nominal akım değerine göre yükseltici dönüştürücüdeki kullanılan devre elemanlarının akım taşıma kabiliyeti göz önüne alınarak, şarj ünitesinin içinde devreye girecek kat adedi belirtir. Bu işlem sayesinde kullanılmayan katlardaki elemanlarda harcanan enerji israfı ortadan kaldırılarak devrenin verimi artırılır.

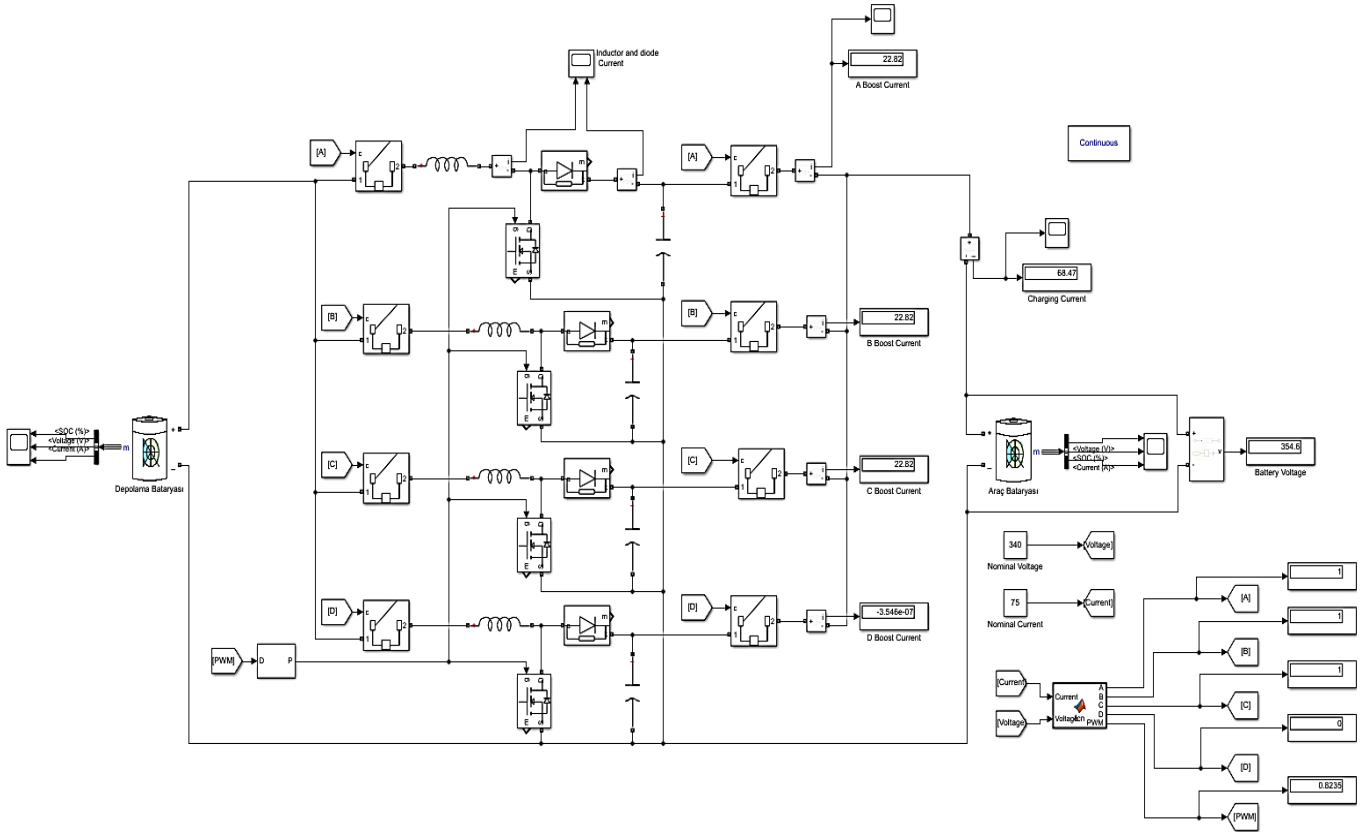
Yapılan denemede elektrikli aracın bataryası şarj durumunda olup başlangıçta şarj seviyesi (SOC) %40, depolama bataryası ise deşarj durumunda ve şarj seviyesi %80 olarak ayarlanmıştır. Kontrol devresinde, kullanıcı tarafından girilen nominal gerilim değerine göre 82,35% görev döngüsüne sahip anahtarlama sinyali üretilmiştir. Devreden geçen akımın değerine göre de devreye üç kat girmesi yeterli olduğunu karar verilmiştir. Alınan değerler, akımın katlar arasında eşit olarak bölündüğünü göstermektedir.

Elektrikli aracın bataryası ve depolama bataryalarının SOC, akım ve gerilim grafikleri sırasıyla Şekil 15 ve 16'da gösterilmektedir.

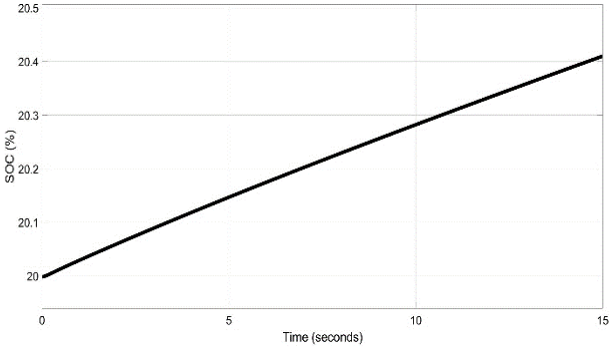
Elektrikli araç bataryasının ölçüm değerlerini gösteren Şekil 15 incelendiğinde, bataryanın lineer bir şekilde şarj olduğu, şarj işlemi gerçekleşirken gerilimde az bir dalgalanma gözlemlendiği ve akımın ise ilk şarj anında kararsız bir yapıda artış yaptığı ancak çok kısa bir süre içerisinde geri düşüp kararlı bir hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu artışın sebebi bataryanın şarj akımına tepkisinden kaynaklıdır. Şarj işlemi başladığında bataryanın direnç değeri düşük olmakta ancak akım geçtikten sonra direnç değeri yükselip akım kararlı hale gelmektedir.

Diğer taraftan depolama bataryasının şarj durumu, gerilimleri ve akımlarını gösteren Şekil 16 incelendiğinde ise, bataryanın lineer bir şekilde deşarj olduğu, gerilim ve akım değerlerinin ilk deşarj durumunda kararsız bir davranış sergilediği ancak kısa bir süre sonra kararlı bir şekilde deşarj işleminin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu şekilde araç bataryasına enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir. Dönüştürücüdeki katların bir tanesindeki bobin ve diyot elemanlarından geçen akımların zamana göre değişimleri ise Şekil 17'de sunulmuştur.

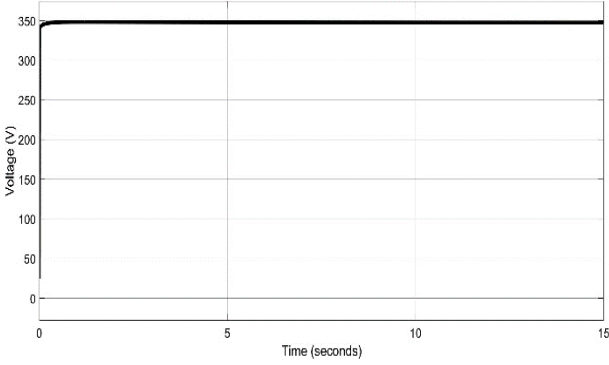
Şekil 17'de, mosfet iletim durumundayken, bobinden geçen akım yükselmekte olup enerji depolanır, bu durumda diyot kesim durumunda olup içinden akım geçmediği görülmektedir. Ancak mosfet kesim durumundayken, çıkışa verilmesi için enerjiyi serbest bırakan bobindeki akımda düşüş fark edilmekte ve akım diyottan geçmektedir.



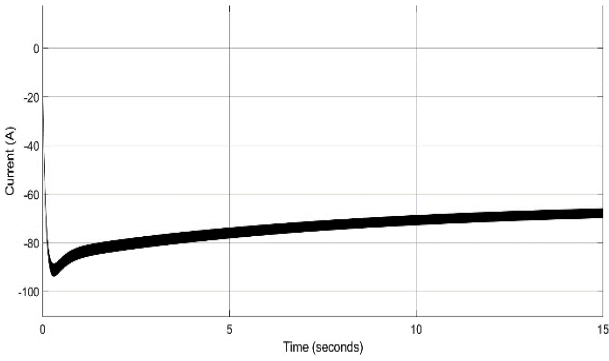
Şekil 14. Tasarlanan sistemin Matlab programında simülasyon topolojisi.



(a)

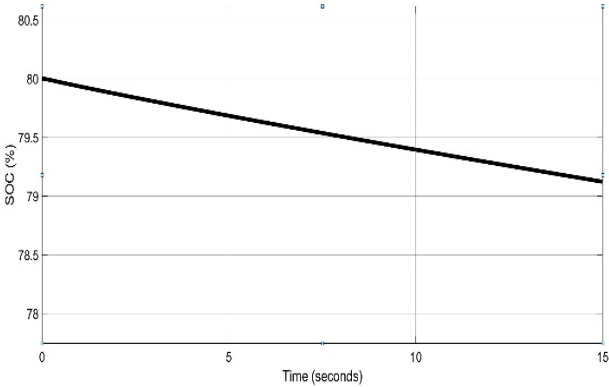


(b)

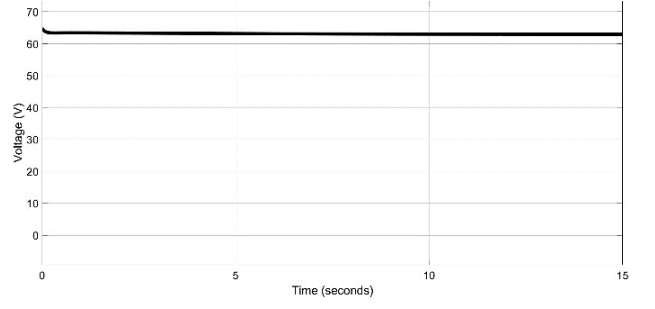


(c)

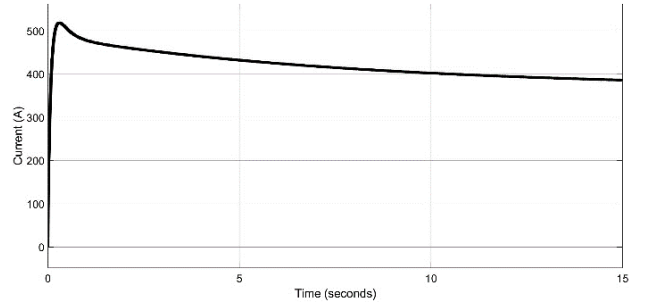
Şekil 15. Araç bataryasının parametreleri: (a) bataryanın şarj durumu, (b) bataryanın gerilimi (c) bataryanın çektiği akımın zamana göre değişimi



(a)

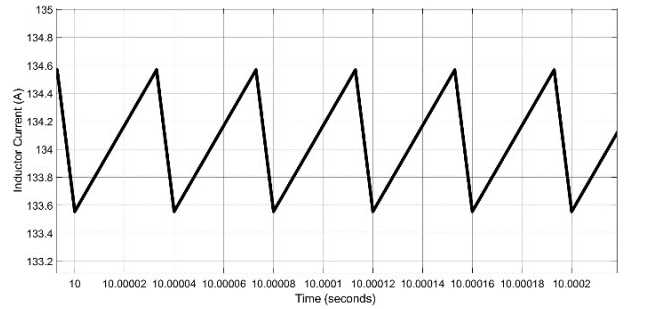


(b)

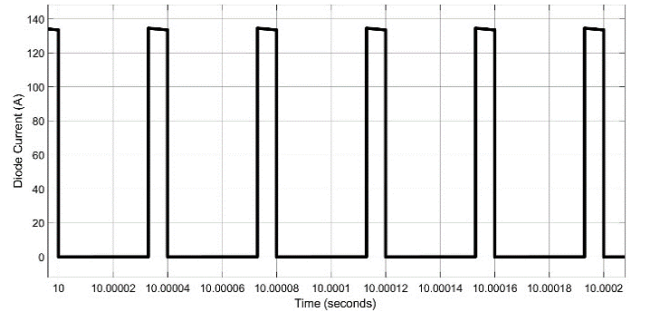


(c)

Şekil 16. Depolama bataryalarının parametreleri: (a) bataryanın şarj durumu, (b) bataryanın gerilimi (c) bataryanın sağladığı akımın zamana göre değişimi



(a)



(b)

Şekil 17. (a) Bobinin akımının ve (b) diyot akımının zamana göre değişimi.

4 Tartışma ve Sonuç

Simülasyonda elde edilen sonuçlar, tasarlanan tek fazlı çok katlı yükseltici dönüştürücünün kullanıldığı şarj ünitesinin,

enerjiyi aktarmak ve araç bataryasını şarj etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Tasarlanan şarj ünitesi, önceden yapılan çalışmalarda bulunan sistemlere ve şarj ünitelerine, enerji aktarımı ve şarj işleminin tamamlanması açısından benzer sonuçlar göstermektedir. Elde edilen grafiklerde (SOC, gerilim, akım) şarj ve deşarj esnasında kayda değer kararsız durumların meydana gelmediği anlaşılmaktadır.

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde güneş enerjisi destekli elektrikli araç şarj sistemlerinde çift yönlü dönüştürücüler kullanılmıştır. Bu çalışmada tek yönlü dönüştürücü kullanılmış olup, sistemin şebekeden bağımsız olmasından dolayı araçtan enerji çekilmesine ihtiyaç duyulmamıştır.

Tasarlanan tek fazlı çok katlı yükseltici dönüştürücü şarj devresinin en önemli özelliğinin, izoleli (transformatörlü) DC-DC dönüştürücüler yerine izolesi olmayan (güç elektroniği devrelerine dayanan) dönüştürücüler içermesi ve bu sayede büyük güçlerde bobinlerde meydana gelen ısı kayıplarının önlenmesi, kullanılan devrelerin boyutlarının azaltılması ve sistem maliyetinin düşük olması olarak sıralanabilir. Aynı anda izoleli (transformatörlü) DC-DC dönüştürücülerde yapılan enerji formunu (DC'den AC'ye ve AC'den DC'ye) çevime işlemi ve buna bağlı olarak köprülerdeki anahtar kayıpları da engellenmiştir. Aynı zamanda bu çalışmada çok katlı yükseltici dönüştürücünün çekilen akımın değerine göre devreye girecek kat sayısı belirleme özelliği sayesinde kullanılan katlardaki elemanlarda harcanan enerji israfı ortadan kaldırılarak devrenin verimi de artırılır.

Tasarlanan sistemin uygulaması, güneş enerjisi sistemlerinin yöresel şartlara göre boyutlandırılması ve uygulama esnasında performanslarının izlenmesi ileriki çalışmalar olarak planlanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] A. Kerem ve H. Gürbak, Fast Charging Station Technologies for Electric Vehicles. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C Tasarım ve Teknoloji 8 (3), 644-661, 2020. <https://doi.org/10.29109/gujsc.713085>.
- [2] A. Kerem, Elektrikli Araç Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 5 (1), 1-13, 2014. <https://dergipark.org.tr/pub/makufebed/issue/19419/206527>.
- [3] B. Jar, N. Watson and A. Miller, Rapid EV Chargers: Implementation of a Charger. EEA Conference & Exhibition, 22 - 24 June, Wellington, 2016. <https://www.researchgate.net/publication/319162700>.
- [4] E. İşen ve H. Tarlak, Electric Vehicles and Battery Charging Systems. Kırklareli University Journal of Engineering and Science 4-1, 124-141, 2018. <https://dergipark.org.tr/pub/klujes/issue/37436/398993>.
- [5] C. Dericioglu, E. Yirik, E. Unal, M. U. Cuma, B. Onur ve M. Tumay, A Review Of Charging Technologies For Commercial Electric Vehicles. International Journal of Advances on Automotive and Technology, 2 (1), 61-70, 2018. <http://dx.doi.org/10.15659/ijaat.18.01.892>.
- [6] F. Baronti, M. Y. Chow, C. Ma, H. Rahimi Eichi and R. Saletti, E-transportation: the role of embedded systems in electric energy transfer from grid to vehicle. EURASIP Journal on Embedded Systems December 2016. <http://dx.doi.org/10.1186/s13639-016-0032-z>.
- [7] B. Chae, T. Kang, T. Kang and Y. Suh, Reduced Current Distortion of Three-Phase Three-Switch Buck-Type Rectifier using Carrier Based PWM in EV Traction Battery Charging Systems. The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, 20 (4), 375-387, 2015. <https://doi.org/10.6113/TKPE.2015.20.4.375>.
- [8] R. Kondo, Y. Higaki and M. Yamada, Experimental Verification of Reducing Power Loss under Light Load Condition of a Bi-Directional Isolated DC/DC Converter for a Battery Charger Discharger of Electrical Vehicle. IEEE Journal of Industry Applications, 10 (3), 377-383, 2021. [doi:10.1541/ieejia.17000897](https://doi.org/10.1541/ieejia.17000897).
- [9] L. Zhu, H. Bai, A. Brown and L. Keuck, A Current-fed Three-port DC/DC Converter for Integration of On-board Charger and Auxiliary Power Module in Electric Vehicles. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 577-582, 2021. <https://doi.org/10.1109/APEC42165.2021.9487263>.
- [10] S. Chakraborty, H. N. Vu, M. M. Hasan, D. D. Tran, M. El Baghdadi and O. Hegazy, DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicles, Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Fast Charging Stations: State of the Art and Future Trends. MDPI Energies. 12 (8):1569, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/en12081569>.
- [11] L. Xiaodong and L. Yi-Fan, An Optimized Phase-Shift Modulation For Fast Transient Response in a Dual-Active-Bridge Converter. IEEE Transactions on Power Electronics, 29 (6), 2661-2665, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2013.2294714>.
- [12] A. R. Bhatti, Z. Salam, M. J. Abdul Aziz, K. P. Yee and R. H. Ashique, Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 34-47, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.091>.
- [13] T. Rampradesh, R. Lakshmi Priya and C. Christofer Asir Rajan, PV Powered Dc-Dc Boost Converter Charger For Electric Vehicles With 3 Different Voltage Levels. European Journal of Molecular & Clinical Medicine, 7(6), 2636-2642, 2020.
- [14] V. Kumar, V. R. Teja, M. Singh, and S. Mishra, PV Based Off-Grid Charging Station for Electric Vehicle. IFAC PapersOnLine, 52 (4), 276-281, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.211>.
- [15] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, Power Electronics: converters, applications, and designs. John Wiley & sons, INC., United States of America, 1995.

- [16] W. Xiao, *Power Electronics Step-by-Step: Design, Modeling, Simulation, and Control*. 1260456978, McGraw-Hill Education, New York, 2021.
- [17] I. Laoprom and S. Tunyasirut, Design of PI Controller for Voltage Controller of Four-Phase Interleaved Boost Converter Using Particle Swarm Optimization. *Journal of Control Science and Engineering*, 13, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9515160>.
- [18] A. Pradhan and B. Panda, A Simplified Design and Modeling of Boost Converter for Photovoltaic Sytem. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8 (1), 141–149, 2018. [doi:10.11591/ijece.v8i1.pp141-149](https://doi.org/10.11591/ijece.v8i1.pp141-149).
- [19] M. Jarabíková and S. Kaščák, The Parametric Simulation of the Interleaved Boost Converter for the Electric Transport Vehicle. *Transportation Research Procedia*, 40, 287-294, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.043>.
- [20] A. Srilatha, A. Pandian, and P. Srinivasa Varma, WITHDRAWN: Power factor correction controller with Buck Boost converter for fast charging of electrical vehicles. *Materials Today: Proceedings*, ISSN 2214-7853, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.097>.
- [21] K. F. Chan, C. S. Lam, W. L. Zeng, W. M. Zheng, S. W. Sin and M. C. Wong, Generalized Type III controller design interface for DC-DC converters. *TENCON 2015 IEEE Region 10 Conference*. <http://dx.doi.org/10.1109/TENCON.2015.7373052>.
- [22] R. S. Leite, J. L. Afonso and V. Monteiro, A Novel Multilevel Bidirectional Topology for On-Board EV Battery Chargers in Smart Grids. *Energies* 11 (12): 3453, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11123453>.





Design and fabrication of compact Wilkinson power divider on gallium nitride coplanar technology

Galyum nitrür koplanar dalga kılavuzu teknolojisinde kompakt Wilkinson güç bölücü tasarımı ve üretimi

Galip Orkun Arıcan^{1,*} 

¹ ASELSAN Inc., Communication and Information Technologies Division, 06200, Ankara Türkiye

Abstract

In this article, an ultra-compact monolithic microwave integrated Wilkinson power divider (WPD) was accomplished for X-band applications. So as to reduce the size of the design, the miniaturization technique was illustrated with the theoretical analysis. After the theoretical analysis, the layout of the design and electromagnetic simulation were performed. The proposed Wilkinson power divider was manufactured with utilizing gallium nitride integrated passive device technology. In the measurement results, it was seen that the input and output (I/O) reflection coefficients were better than -15 dB in the frequency bandwidth of 8-12 GHz. In addition, the transmission coefficient was measured less than -4 dB in the X-band (8-12 GHz). Moreover, the 15-dB fractional bandwidth is 40% and the isolation between the outputs are better than -15 dB. The size of the proposed Wilkinson power was reduced to the dimensions of $700 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ ($0.0023 \lambda_g \times 0.0023 \lambda_g$, where λ_g is the wavelength value at the center frequency (10 GHz)), as π -type miniaturization technique was employed with monolithic lumped components. Beside its miniaturized size, the proposed power divider exhibits broadband characteristics while having any degradation in the electrical performance.

Keywords: Wilkinson power divider, Coplanar waveguide, Integrated passive device, Compact

1 Introduction

Power dividers, that are widely utilized with great RF characteristics, are in high demand with the day by day improvements in modern communication systems, such as amplifiers, mixer, power sensors, phase detectors, antennas and many other applications [1, 2]. The Wilkinson power divider (WPD) is utilized to divide the received signal into two outputs with equal both phase and amplitude. WPD has the characteristic of having low insertion loss, high isolation and good matching [3]. In addition, the conventional WPD has a simple structure that can be constructed with two quarter wavelength ($\lambda/4$) transmission lines and an isolation resistor between the output ports [4]. Besides these

Öz

Bu makalede, ultra-kompakt mikrodalga tektaş Wilkinson güç bölücü entegre devre tasarımı X-bant uygulamaları için gerçekleştirilmiştir. Tasarımın boyutunun küçültülmesinde minyatürleştirme tekniği kullanılarak, teorik olarak hesaplamaları anlatılmıştır. Teorik analizlerin tamamlanmasından sonra, tasarımın serim tasarımı yapılarak elektromanyetik benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Önerilen devre tasarımı, galyum nitrür tümdevre pasif devre teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, giriş ve çıkış (I/O) yansıma katsayılarının 8-12 GHz frekans bandı içerisinde -15 dB'den daha iyi olduğu görülmüştür. Ek olarak, X-bantta (8-12 GHz) araya iletim katsayısının -4 dB'den düşük olarak ölçülmüştür. Ayrıca, elde edilen ölçüm sonuçlarına göre prototipin 15-dB bant genişliği %40 olarak hesaplanmıştır ve çalışma frekans bandı içerisinde çıkış portları arasındaki izolasyonun -15 dB'den daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, önerilen Wilkinson güç bölücü tasarımının boyutu, π -tipi minyatürleştirme tekniğinde tümdevre devre elemanları kullanılarak $700 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ ($0.0023 \lambda_g \times 0.0023 \lambda_g$, burada λ_g merkez frekanstaki (10 GHz) dalga boyu değeridir) boyutlarına kadar düşürülmüştür. Geliştirilen güç bölücünün ölçüm sonuçlarına göre, minyatür boyutuna rağmen, elektriksel performansında herhangi bir kötüleşme olmadan geniş bantlı bir karakteristik sergilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Wilkinson güç bölücü, Koplanar dalga kılavuzu, Pasif entegre aygıt, Kompakt

advantages, the conventional WPD can be notably large in size with the narrow frequency bandwidth in the lower frequency spectrum, especially below Ku-band. Due to this reason, development of the broadband miniaturized WPD has become a challenging topic, especially for low-cost and size-constrained system manufacture. In the literature, the inductive/capacitive loaded lumped elements, T- and π -type equivalent circuits, open circuit stubs, resonators, tapered transmission lines, high impedance and step impedance multilayer structures have been investigated for microstrip technology to overcome miniaturization issues [5-12]. In addition, these miniaturization techniques have been applied with utilizing multi-layer printed circuit board, low temperature co-fired ceramics (LTCC), III-V semiconductor

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: goarican@aselsan.com.tr (G.O. Arıcan)
Geliş / Received: 29.07.2022 Kabul / Accepted: 17.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1151080

integrated passive device (IPD) process [13-14]. Nevertheless, the WPD with coplanar waveguide (CPW) technology becomes a notable choice to microstrip WPD by dint of having low manufacturing complexity, no via holes and low-loss [15]. Moreover, broadband and low-dispersion characteristics can be accomplished with utilizing CPW rather than the microstrip technology [12]. Thus, CPW technology picks a great interest to enhance a low-cost compact WPD in behalf of the simple integration the electronic systems. On the other hand, wide-bandgap semiconductors, such as aluminium nitride (AlN), silicon carbide (SiC), gallium nitride (GaN), silica (SiO₂) and boron nitride (BN), become promising alloys for modern communication systems [16-17]. Furthermore, GaN is a glaring alloy for solid-state devices with high-speed data transmission, high-power handling capability and high thermal conductivity characteristics.

In this study, an ultra-compact coplanar-waveguide Wilkinson power divider was developed with utilizing gallium nitride integrated passive device manufacturing process for modern communication systems. In the proposed WPD, the lumped elements and π -type miniaturization technique was utilized to replace the $\lambda/4$ transmission lines with the spiral inductor between the shunt capacitors. The proposed miniaturization technique was analyzed theoretically and the theoretical results were verified with both electromagnetic (EM) simulations and on-wafer measurement. The proposed divider has a very compact size of $700 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ and it yields an 88% size reduction and covers all of the X-band (8-12 GHz).

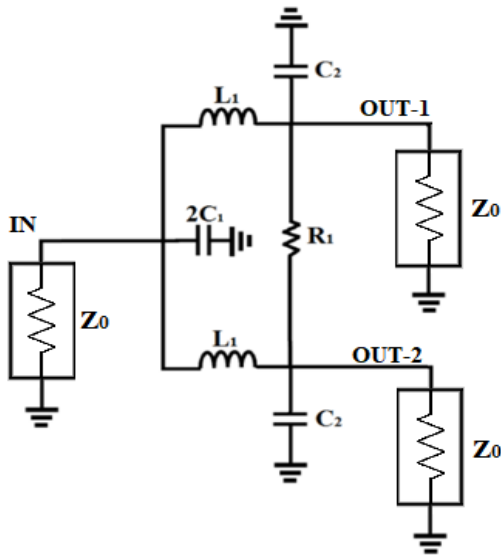


Figure 1. Equivalent circuit model of the proposed WPD

2 Material and method

2.1 Overview of the WPD

A conventional WPD is a symmetrical circuit that consists of two $\lambda/4$ transmission lines with the characteristic impedance of $\sqrt{2}Z_0$ where Z_0 is the characteristic impedance

[4]. So as to enhance the isolation between the output ports, an isolation resistor of $2Z_0$ was utilized between the outputs [4]. The WPD splits the instant signal into two output signals with equal phase and amplitude. However, the $\lambda/4$ transmission line consumes too much costly chip area in the low-end frequency spectrum. In order to minimize the occupied chip size, the lumped elements and miniaturization techniques needs to be applied. In the proposed WPD, $\lambda/4$ transmission lines were realized with π -type equivalent network that was established with the lumped components of spiral inductor between the metal insulator metal (MIM) capacitors. Figure 1 depicts the equivalent circuit model of the proposed WPD.

2.2 Design and analysis of the proposed WPD

In the proposed design, the π -type equivalent network topology with the lumped monolithic microwave components were utilized instead of $\lambda/4$ transmission line. In addition, the π -type equivalent network was constructed with utilizing a spiral inductor between the shunt capacitors. The values of the lumped components were calculated theoretically with utilizing [ABCD] parameters. Figure 2 depicts the equivalent circuit model of the transmission line.

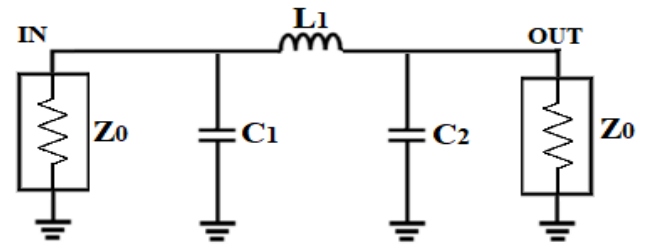


Figure 2. Equivalent circuit model of the transmission line

The [ABCD] parameters of the equivalent circuit model of the transmission line (M_E) can be expressed as the multiplication of the [ABCD] parameters of the lumped components.

$$M_E = M_{C1} M_{L1} M_{C2} \quad (1)$$

where M_{C1} is the shunt capacitor (C_1), M_{L1} is the series inductor (L_1) and the M_{C2} is the shunt capacitor (C_2). If the [ABCD] parameters of the lumped components are added in to the equation 1, the M_E can be expressed as given in the Equation (2).

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ jB_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 - jX_L B_2 & jX_L \\ j(B_1 + B_2) - jX_L B_1 B_2 & 1 - X_L B_1 \end{bmatrix}$$

where $B_1 = \omega C_1$; $B_2 = \omega C_2$ and $X_L = \omega L_1$. In addition, the transmission line (MTL) can be extended in the [ABCD] matrix as in the Equation (3).

$$M_{TL} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_c \sin \beta l \\ jY_c \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \quad (3)$$

In the Equation (3), Z_c and l denote the characteristic impedance and electrical length of the transmission line, respectively.

$$Z_c = \sqrt{2}Z_0 \quad (4)$$

$$\beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

If the matrices of M_E and M_{TL} are equal to each other and the Equations (4) and (5) are put into the Equation (3), the matrix can be solved as Equations (6-8):

$$C_1 = \frac{1}{\omega Z_c} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega Z_c} \quad (7)$$

$$L_1 = \frac{Z_c}{\omega} \quad (8)$$

$$R_1 = 2Z_0 \quad (9)$$

In the theoretical analysis of the equivalent circuit design, the lumped components can be calculated as C_1 and C_2 are 225 fF, L_1 is 1125 pH and R_1 is 100 Ω for the center frequency of 10 GHz.

3 Results and discussion

The layout of the proposed WPD was designed in the Advanced Design System (ADS) Momentum software which is a planar electromagnetic simulator. In addition, ADS Momentum employs method of moments (MoM) to solve the numerical electromagnetic field analysis. In the layout design, the inductors were realized with the spiral inductors and the capacitors were realized with MIM capacitor. Moreover, the input and output terminal were designed to be able to do on-wafer measurements. Hence, the ground planes were connected with each other utilizing underpass metallization and the signal cross over the underpass metal with air bridge structures. Furthermore, the isolation resistor was realized with NiCr metallization. The total dimension of the proposed WPD including RF pads are 700 μm x 700 μm which is $0.0023 \lambda_g$ x $0.0023 \lambda_g$, where λ_g is the wavelength value at the center frequency (10 GHz). Figure 3 depicts the layout of the proposed WPD and the dimensions of the proposed WPD is given in the Table 1.

Figure 4 depicts the current density distribution of the proposed WPD at 10 GHz. The current density distribution shows that the current density increases especially on the underpass metals inside the spiral inductors and on the air bridge structures.

The prototype of the proposed WPD was manufactured with utilizing Gallium Nitride (GaN) on Silicon Carbide (SiC) integrated passive device (IPD) process in Nanotechnology Research Center. GaN IPD process was preferred to manufacture the proposed WPD because of having high power handling capability and high thermal

conductivity. These advantages give GaN MMIC process to be utilized both in the high-frequency and high-power applications. In addition, GaN epitaxial layer was grown on a 300 μm SiC substrate with a dielectric constant of 9.8 at 300°K. Nickel Chrome (NiCr) resistor, which has 30 Ω /square sheet resistance (R_s), was realized with utilizing e-beam evaporating process. Moreover, the GaN IPD process has a contact resistance of a typically 0.25 Ω .mm in the transmission line measurement (TLM). In addition, GaN IPD process possess two (Au) metallization layers which are metal-1 and metal-2 with the thickness of 1 μm and 3 μm , respectively. Furthermore, metal insulator metal (MIM) capacitor is realized with utilizing a Silicon Nitride (Si_3N_4) passivation layer with 0.3 μm thickness between the two metal layers. The passivation layer has a dielectric constant of 6.8. Nevertheless, the air bridge structure is utilized for metal-2 layer to cross the metal-1 and NiCr resistor layers on the substrate. Figure 5 depicts the cross-section of the GaN CPW IPD technology.

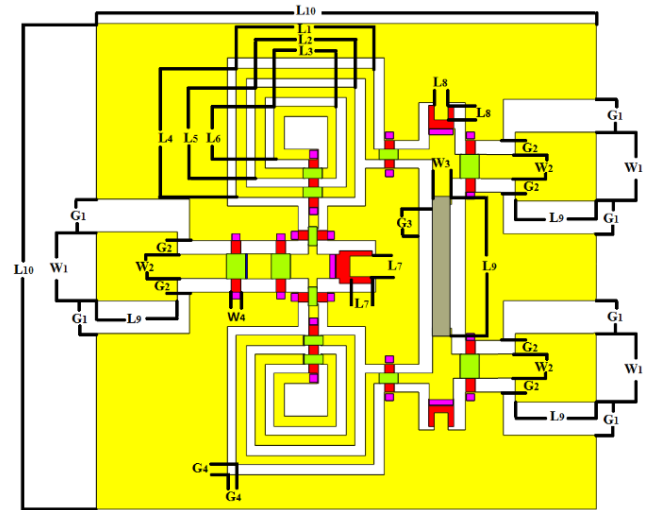


Figure 3. Layout of the proposed WPD (700 μm x 700 μm)

Table 1. The dimensions of the layout

Parameter	Value (μm)	Parameter	Value (μm)
L1	204	L6	78
L2	148	L7	32
L3	92	L8	16
L4	190	L9	206
L5	134	L10	700
W1	100	G1	52
W2	37	G2	19
W3	26	G3	23
W4	14	G4	14

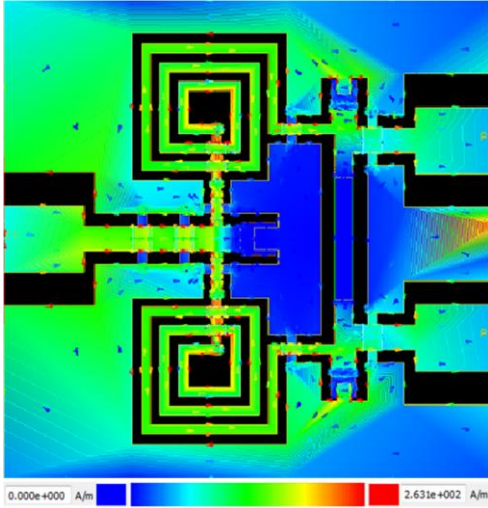


Figure 4. The current density of the proposed WPD (10 GHz)

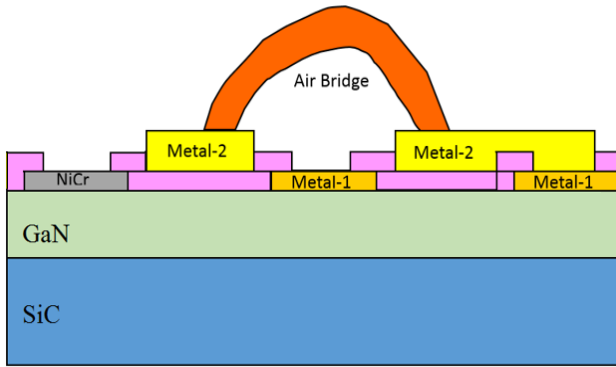


Figure 5. Cross-section of the GaN CPW IPD technology

The Agilent E8361C network analyzer, Cascade RF1 microwave probe station and GGB 40A-GS-150-P RF probes were utilized in the on-wafer prototype measurements. Before the on-wafer measurements, the short open load thru (SOLT) calibration was applied at the reference points. According to the bandwidth percentage Equation (10), the bandwidth was calculated as 40% for 15-dB I/O reflection coefficient. Moreover, f_0 denotes the center frequency and the f_1 and f_2 denotes the lower and upper frequency band, respectively. Furthermore, the frequency ration was calculated as 6, according to the Equation (11).

$$BW\% = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (10)$$

$$\kappa = \frac{f_2}{f_1} \quad (11)$$

The prototype was manufactured to verify the accuracy of the design with utilizing GaN CPW IPD technology. Figure 6 depicts the photography of the prototyped WPD.

In the S-parameter measurement, the input reflection coefficient (S_{11}) was lower than -15 dB, in the operating frequency bandwidth of 8-12 GHz. Figure 7 depicts the

simulated and measured reflection coefficient (S_{11}) of the proposed WPD.

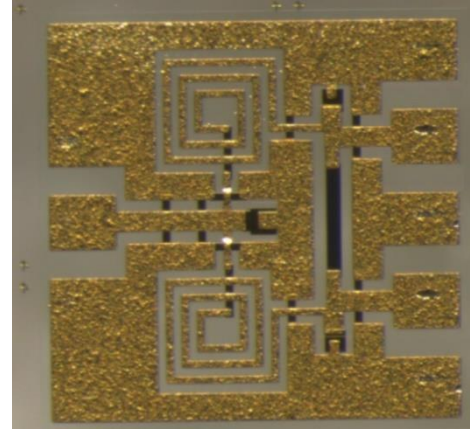


Figure 6. The photography of the prototyped WPD

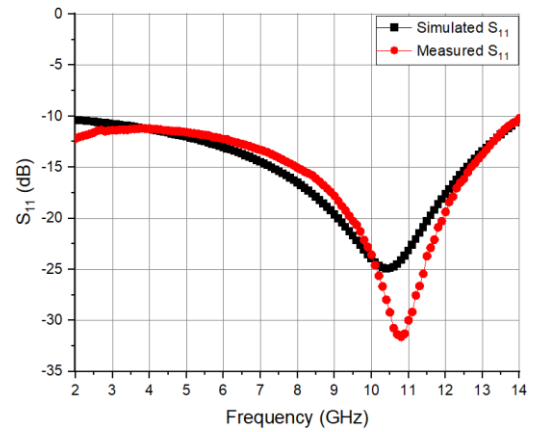


Figure 7. The simulated and measured S_{11} of the proposed WPD

In addition, the output reflection coefficients (S_{22} & S_{33}) were measured lower than -15 dB in the frequency bandwidth of 8-12 GHz. Figure 8 depicts the output reflection coefficients (S_{22} & S_{33}) of the proposed WPD.

Moreover, the transmission coefficient (S_{21}) was measured less than -4 dB in the frequency bandwidth of 8-12 GHz. Figure 9 depicts the simulated and measured transmission coefficients (S_{21} & S_{31}) of the proposed WPD.

The measured isolation was less than -15 dB in the operating frequency bandwidth of 8-12 GHz. Figure 10 depicts the simulated and measured isolation (S_{23}) between the outputs of the proposed WPD.

The phase inequality between the outputs was less than 1.1° the frequency bandwidths of 8-12 GHz. The simulated and measured phase inequality of the outputs were in good agreement with each other. The measured phase difference between the output ports was better than the simulation result in the frequency bandwidth of 3.5-10.5 GHz and lowest phase difference between the outputs was achieved at around 6 GHz. Moreover, the highest variation between measured and simulated phase difference was observed at around 6 GHz with phase difference of $\sim 0.7^\circ$. On the other hand, the variation between the measurement and simulation results

was occurred in a similar increasing trend with phase difference of $\sim 0.1^\circ$ at frequencies higher than 11 GHz. The slight difference between the measurement and simulation results would be caused by the manufacturing tolerances. Figure 11 depicts the simulated and measured phase inequality between the outputs of the proposed WPD.

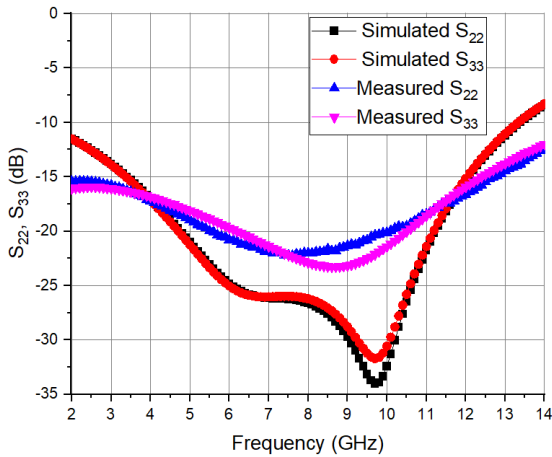


Figure 8. The simulated and measured S_{22} and S_{33} of the proposed WPD

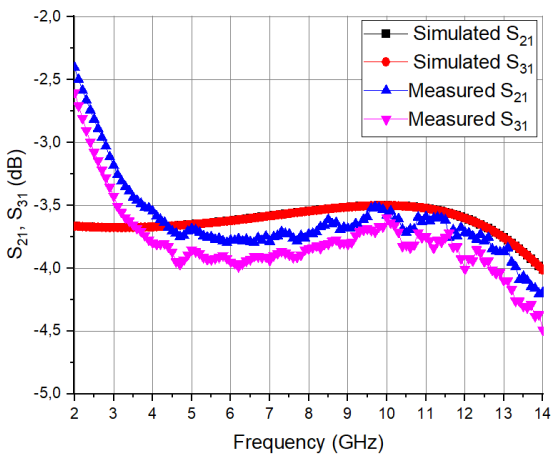


Figure 9. The simulated and measured S_{21} and S_{31} of the proposed WPD

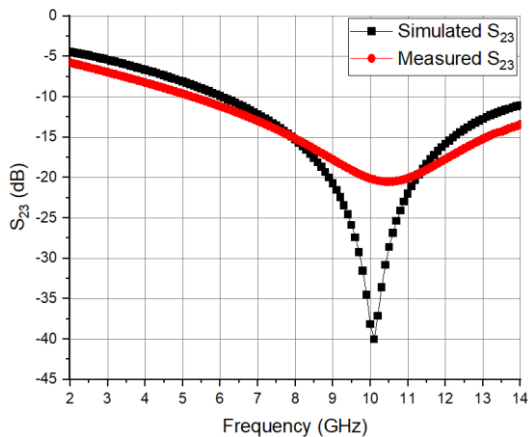


Figure 10. The simulated and measured isolation S_{23} between the outputs of the proposed WPD

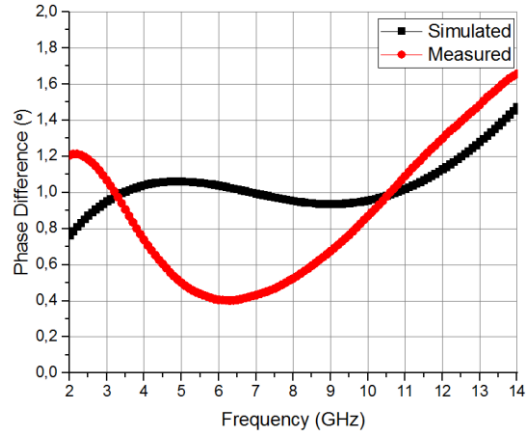


Figure 11. The simulated and measured phase inequality between the outputs

4 Conclusions

In this letter, an ultra-compact WPD was presented, which was developed by utilizing lumped components with coplanar waveguide integrated passive device process in the gallium nitride technology. In the proposed WPD design, the π -type miniaturization technique with lumped component was utilized to reduce the chip area. The arms of the proposed WPD, were constructed with MIM capacitors and spiral inductors. The proposed WPD has a total size of $700 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ which yields a size reduction of 88% with respect to the conventional WPD and the fractional bandwidth achieves 40%. The theoretical and experimental results were compatible with each other and the results show that the WPD can be significantly reduced with the miniaturization techniques without any electrical performance degradation. The measurement results show that the prototyped WPD has I/O reflection coefficients better than -15 dB with a transmission coefficient of -4 dB in the frequency range of 8-12 GHz. The proposed WPD can easily be integrated into the monolithic microwave integrated circuits and hybrid modules with its simple and low-cost structure for X-band applications.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] Y. Wang, X. Y. Zhang, F. X. Liu and J. C. Lee, A compact bandpass Wilkinson power divider with ultra-wide band harmonic suppression. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(10), 888-890, 2017. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2745484>.
- [2] F. Khajeh-Khalili, M. A. Honarvar, A. Dadgarpour, B. S. Virdee and T. A. Denidni, Compact tri-band Wilkinson power divider based on metamaterial structure for Bluetooth, WiMAX, and WLAN applications. *Journal of electromagnetic waves and applications*, 33(6), 707-721, 2019. <https://doi.org/10.1080/09205071.2019.1575287>.

- [3] A. M. Darwish, A. A. Ibrahim, J. X. Qiu, E. Viveiros, and H. Hung, A Broadband 1-to-n power divider/combiner with isolation and reflection cancellation. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(7), 2253-2263, 2015. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2431690>.
- [4] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. Wiley, New York (NY), 2012.
- [5] P. Rostami and S. Roshani, A miniaturized dual band Wilkinson power divider using capacitor loaded transmission lines. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 90, 63-68, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.04.014>.
- [6] C. H. Tseng and C. H. Wu, Compact planar Wilkinson power divider using π -equivalent shunt-stub-based artificial transmission lines. *Electronics Letters*, 46(19), 1327-1328, 2010. <https://doi.org/10.1049/el.2010.2194>.
- [7] S. Kaijun, Extremely compact ultra-wideband power divider using hybrid slotline/microstrip-line transition. *Electron Letters*, 51(24), 2014-2015, 2015. <https://doi.org/10.1049/el.2015.2924>.
- [8] C. L. Chang and C. H. Tseng, Compact Wilkinson power divider using two-section asymmetrical T-structures. *Electron Letters*, 49, 546-547, 2013. <https://doi.org/10.1049/el.2013.0366>.
- [9] Z. X. Du, X. Y. Zhang, K. X., Wang, H. L. Kao, X. L. Zhao and X. H. Li, Unequal Wilkinson power divider with reduced arm length for size miniaturization. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 6(2), 282-289, 2016. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2513763>.
- [10] R. Mirzavand, M. M. Honari, A. Abdipour, and G. Moradi, Compact microstrip Wilkinson power dividers with harmonic suppression and arbitrary power division ratios. *IEEE Transaction Microwave Theory Techniques*, 61, 61-68, 2013. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2226054>.
- [11] Z. Guo and Y. Yang, A novel compact Wilkinson power divider with controllable harmonic suppression and simple structure. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(5), 601-608, 2018. <http://doi.org/10.1080/09205071.2017.1400926>.
- [12] Q. Li, Y. Zhang and C. T. M. Wu, High-selectivity and miniaturized filtering Wilkinson power dividers integrated with multimode resonators. *IEEE Transaction of Components Packaging and Manufacturing Technology*, 7, 1990-1997, 2017. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2706958>.
- [13] J. Han and X. Liao, Miniaturization of a broadband power divider for X-band application based on GaAs technology. *Microwave Optical Technologies Letter*, 59(6), 1427-1431, 2017. <https://doi.org/10.1002/mop.30557>.
- [14] Y. Jiang, K. Hu, L. Feng, H. Zhang, Y. Shi, W. Tang, and X. Yu, Ultra wideband lumped Wilkinson power divider on gallium arsenide integrated passive device technology. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(12): e22898, 2021. <https://doi.org/10.1002/mmce.22898>.
- [15] T. Okan, A Wideband conductor backed coplanar waveguide fed implantable antenna operable in different tissues for biotelemetry applications. *Radioengineering*, 30(2), 335-431, 2021. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0335>.
- [16] J. V. Gaitonde and R. B. Lohani, Analysis of wide-bandgap material OPFET UV detectors for high dynamic range imaging and communication applications. *Communications and Network*, 11(4): 83-117, 2019. <https://doi.org/10.4236/cn.2019.114007>.
- [17] M. P. Mikhailova, K. D. Moiseev and Y. P. Yakovlev, Discovery of III-V semiconductors: physical properties and application. *Semiconductors*, 53(3), 273-290, 2019. <https://doi.org/10.1134/S1063782619030126>





X-Bant uydu uygulamaları için dielektrik ölçüm yaklaşımı tabanlı kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı

Dielectric measurement approach based compact U-slot patch antenna design for X-band satellite applications

Orçun Kiriş^{1,*} 

Colorado School of Mines, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80401, Golden, A.B.D.

Öz

Bu çalışmada, X bant uzay uygulamaları için Flame Retardant 4 (FR4) malzemesinin dielektrik ölçüm yaklaşımına dayalı kompakt bir U-Yarıklı yama anten tasarımı sunulmaktadır. Tasarım yöntemine uygun olarak, anten tasarımlarında kullanılacak HFSS tasarım aracına, FR4 malzemesinin dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak X-bantta ölçülen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri uygulanmıştır. Daha sonra, yaklaşımın anten tasarımları üzerindeki fonksiyonel performansı, literatürdeki standart bir anten tasarımının benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Doğrulan sonuçlar ışığında, önerilen tasarım yöntemi kullanılarak X-bant uzay uygulamaları için yanıl yan yarıklara sahip yeni bir U-Yarıklı yama anten tasarımı, bir besleme hattı ile sunulmaktadır. Sunulan kompakt anten tasarımı ile merkez frekansta (9,5 GHz) 1,77 dB kazanç ve 8,53 GHz'den 10,63 GHz'e kadar frekans bant genişliği sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: U-yarıklı, X-bant, FR4, Dielektrik karakterizasyonu

1 Giriş

Antenler, elektromanyetik enerjinin yayılımı vasıtasıyla verici ve alıcı ekipman arasındaki iletişimi kablolu şekilde gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış olan sistem elemanlarıdır. Yayılan elektromanyetik enerjinin frekansına uygun olarak tasarlanması gereken antenlerin, kullanıldıkları uygulamaya özgü olarak farklı tasarım kısıtları oluşabilmektedir. Modern uydu iletişimi teknolojileri özelinde, görev yüklerinin kısıtlı alan ve ağırlık gereksinimleri doğrultusunda küçük boyutlu, hafif, düşük maliyetli, yüksek kazançlı ve yüksek yönlü antenlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Mikroşerit yama antenler, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve sistem entegrasyon kolaylığı özelliklerinden dolayı günümüz teknolojisinde oldukça yaygın bir uygulama alanına sahiptir [1, 2]. Ayrıca, stabil empedans karakteristikleri, farklı tiplerdeki besleme yapılarına uygunlukları, düşük çapraz polarizasyon özellikleri, yama antenleri oldukça popüler hale getirmektedir.

Abstract

In this study, a compact U-slot patch antenna design based on dielectric measurement approach of Flame Retardant 4 (FR4) material is presented for X band space applications. In accordance with the design method, the measured frequency dependent dielectric constant and tangent loss values of the FR4 material at X-band using the waveguide method is applied to the HFSS design tool to be used in antenna designs. Then, the functional performance of the design method on antennas is verified by comparing the simulation and measurement results of a conventional antenna design in the literature. In the light of the verified results, a new U-slot patch antenna design with lateral side slots for X-band space applications is presented with a feed line by using the proposed design method. The presented compact antenna design provides 1.77 dB gain at the center frequency (9.5 GHz) and the frequency bandwidth from 8.53 GHz to 10.63 GHz.

Keywords: U-slot, X-band, FR4, Dielectric characterization

Diğer yandan, mikroşerit yama antenler karakteristik olarak dar bant genişliğine sahiptir ve performansları büyük ölçüde kullanılan alttaş materyalinin kalınlığına, homojenliğine, dielektrik sabitine (ϵ_r) ve tanjant kaybı ($\tan\delta$) değerine bağlıdır. Üstelik bu değerler frekansa bağlı olarak değiştiği için, farklı tasarım frekanslarında anten performansının doğru ve hassas şekilde belirlenmesi oldukça güçleşmektedir. Bazı alttaş üreticileri belirli frekans bantlarında bu değerleri bir veri seti olarak sunmaktadır. Fakat, özellikle alttaş materyallerinin yüksek frekanslardaki elektriksel özellikleri hakkındaki bilgiler oldukça kısıtlıdır. Bu durum, yüksek frekans uygulamalarında tasarım doğruluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır.

Mikroşerit yama antenlerin operasyonel frekans bant genişliği üzerine literatürde birçok karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde, X-bantta tasarlanmış bir mikroşerit yama antenin farklı alttaş kalınlıklarındaki frekans bant genişliği performansı incelenmiş ve nispeten kalın alttaşların daha iyi bant genişliği performansına sahip

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: orcunkiris@hotmail.com (O. Kiriş)

Geliş / Received: 25.10.2022 Kabul / Accepted: 03.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1194496

olduğu gözlemlenmiştir [3]. Bir diğer çalışmada ise, birbirinden farklı dielektrik sabitlerine sahip olan alttaşların anten bant genişliği üzerine etkisi araştırılmıştır [4]. Elde edilen sonuçlar, düşük dielektrik sabiti ve düşük tanjant kaybı değerlerine sahip alttaşların, görece daha yüksek değerlere sahip olanlara göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmalarda kullanılan tam-dalga elektromanyetik alan benzetim programları, yüksek frekans yapılarının tasarımında yaygın olarak kullanılan araçlardır. Bu benzetim ve analiz programları, maliyetli ve uzun süreli üretim aşamalarından önce minimum çabayla birçok sayıda performans optimizasyonu işlemine olanak sağladıkları için verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır. Fakat, piyasada çok sayıda ticari alttaş çeşidinin bulunması ve bu ürünlerin her birinin frekansa bağlı elektriksel özellikleri hakkındaki bilgilerin sınırlı olması nedeniyle, benzetim programlarının kullanıcılarına her tasarım frekansında yüksek doğrulukla ve gerçeğe yakın sonuçlar vermesi oldukça güçleşmektedir.

FR4, radyo frekansı ve mikrodalga yapılarında kullanılan en popüler ticari alttaş malzemelerinden biridir ve dünya genelinde çok sayıda farklı üretici tarafından üretilmektedir. Fakat, piyasaya sunulan FR4'lere ait elektriksel özellik değerlerinin farklı üreticilerin veri sayfalarında birbirinden farklı değerlere sahip olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, üreticilerin veri sayfalarında sunulan değerlerin frekansa göre değişimi hakkında çok sınırlı düzeyde bilgi verildiği gözlenmektedir. Diğer yandan, literatürde de FR4'ün dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerlerinin frekansa ve üreticiye bağlı olarak değişimler gösterdiği bilinmektedir [5]. Bu eksikliği gidermek için FR4 malzemesi üzerine birçok elektriksel karakterizasyon çalışması yayınlanmış olsa dahi, üreticiden üreticiye farklılık gösteren elektriksel özellik bilgileri, yayınlanan sonuçların pratikte tasarımcılar tarafından doğrudan kullanıma uygun değildir [6-8].

X-bant frekansları, iletilmesi hedeflenen sinyalin hava koşullarının zayıflatıcı etkisine karşı dirençli olmasının önem arz ettiği uydu iletişimi için en yaygın kullanılan haberleşme frekans bandıdır. X-bant frekansları, Ku veya Ka gibi diğer yüksek frekans bantlarına kıyaslandığında link kopmalarına daha dayanıklı bir iletim imkânı sağlamaktadır [9]. Dalga kılavuzu ile dielektrik ölçüm yöntemi [10], X-bant frekanslarında yapılacak benzetim ve analiz işlemlerinde, gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edebilmek için önerilen dielektrik ölçüm tabanlı tasarım yaklaşımı için iyi bir adaydır. Dalga kılavuzu ile frekansa bağlı olarak değişken değerlere sahip olabilen malzemelerin dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri yüksek hassasiyetle elde edilebilir. Elde edilen veri seti kullanılan tam-dalga benzetim programına girdi olarak eklenerek, tasarım sonuçlarının üretilip ölçülen yapıların performansına daha yakın olması sağlanabilir. Sunulan bu iyileştirilmiş tasarım metodu, operasyonel çalışma frekanslarında FR4 malzemenin ölçülen frekans bağımlı dielektrik özelliklerinin kullanımına dayanmaktadır. Ayrıca önerilen tasarım yaklaşımının performansı, FR4 materyalini alttaş olarak kullanan bir mikroşerit hat yapısının standart benzetim ve ölçüm sonuçları ile iyileştirilmiş tasarım yaklaşımı ile elde edilmiş sonuçların kıyaslanmasıyla doğrulanmıştır [11].

Özellikle düşük boyutları ve hafif olmaları sebebiyle, boyut ve ağırlık kısıtlamalarına tabii olan uydu sistemlerinde kritik öneme sahip olan mikroşerit yama antenler, düzlemsel yapıları sayesinde uzay araçlarının aerodinamik yapısı ile de oldukça uyumludur [12-15]. Her ne kadar uydu iletişimde dar frekans bant genişliği arzu edilen bir özellik olmasa da çoklu rezonans tasarım teknikleri ile yama antenler uydu uygulamaları için kullanışlı olabilmektedir. Çoklu rezonans yöntemi ile tasarlanmış, C ve X bantlarında yedi farklı dar operasyonel frekans bandını aynı anda kapsayan çok bantlı bir yama anteni [16]'de sunulmuştur. Bir başka çalışmada, dikdörtgen şekilli bir yama anten yapısı ile S ve X bandını kapsayan bir çoklu-bant uygulaması gerçekleştirilmiştir [17]. Uydu haberleşmesi üzerine gerçekleştirilen geniş bantlı bir X bant uygulamasında ise, 8.0-11.1 GHz frekanslarını kapsayan geniş bir Çatal-Şekilli mikroşerit yama anteni sunulmuştur [18]. Ayrıca, C-bant uydu uygulamalarında kullanılmak üzere, geniş yarıklı bir anten tasarımı çalışması [19]'da paylaşılmıştır. Diğer bir uydu haberleşmesine yönelik uygulamada ise, K ve Ku frekans bantlarında operasyonel olan bir X-Şekilli mikroşerit yama anten çalışması sunulmuştur [20]. Fakat bu antenler, çoğunlukla operasyonel tasarım frekanslarında bir dalga boyuna yakın boyutlara sahiptir ve uydu uygulamaları için kritik öneme sahip olan, daha düşük boyutlu ve daha hafif mikroşerit yama anten ihtiyaçları güncelliğini korumaktadır.

Mikroşerit yama antenlere U-şekilli bir yarık eklenmesi, dar bantlı bir prob beslemeli mikroşerit yama anteninin frekans bant genişliğini önemli ölçüde artırmaktadır [21]. Artan frekans bant genişliği, temelde yama antenin doğal rezonans frekansının ve üzerindeki U-şekilli yarık yapısından oluşan rezonansın birbirine yakın frekanslarda oluşacak şekilde ayarlanmasından kaynaklanmaktadır. Yapılan çalışmalar, düşük dielektrik sabitine sahip alttaş üzerindeki U-Yarıklı yamalarının frekans bant genişliğinin %30 civarında artışa olanak sağlayabildiğini göstermektedir [22]. Ayrıca, elde edilen operasyonel bant genişliğindeki artış oranının kullanılan alttaş malzemesinin dielektrik sabiti ile ters orantılı olduğu anlaşılmaktadır [23-25].

Bu çalışmada, dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak ölçülen FR4 alttaş malzemesinin frekansa göre değişen dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerleri kullanılarak, X-bant uydu uygulamalarında kullanılmak üzere, yan yarıklarla desteklenmiş bir U-Yarıklı yama anten tasarımı sunulmaktadır. Öncelikle, bu çalışmada kullanılan dielektrik ölçümü tabanlı iyileştirilmiş tasarım yönteminin performansını gözlemlemek adına, literatürde standart tasarım yöntemi ile tasarlanmış ve üretilmiş bir anten çalışması önerilen iyileştirilmiş tasarım yöntemi ile tekrar edilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları, referans çalışmada da paylaşılan benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak, kullanılan iyileştirilmiş tasarım yönteminin pratik ölçüm sonuçlarına klasik yöntemlere göre daha yakın sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Daha sonra aynı tasarım yöntemi kullanılarak, X-bant uydu uygulamaları için, prob beslemeli kompakt bir U-Yarıklı mikroşerit yama anten tasarımı sunulmuştur. Önerilen anten tasarımı, düşük boyutlu ve hafif yapısının yanı sıra, 8.53-10.63 GHz aralığında yaklaşık %22'lik bir frekans bant genişliği sunmaktadır.

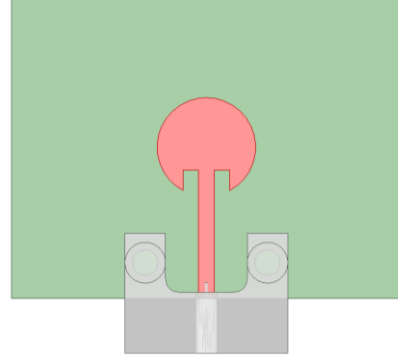
2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılmış olan alttaş materyali, radyo frekansı ve mikrodalga yapılarında kullanılan en popüler ticari ürünlerden biri olan FR4 materyalidir. FR4 uygun fiyatı, prototipleme cihazlarında kolay işlenebilir olması ve yaygın üretici ağı sayesinde kolay erişilebilir olmasından dolayı tasarımcıların ilgisini çekmektedir. Fakat, bu üretici çeşitliliği beraberinde üretim kaynaklı hassasiyet kabiliyetlerinin değişmesinden dolayı materyalin elektriksel özelliklerinde farklılıklara yol açmaktadır. Ayrıca, farklı frekanslarda farklı değerler alan materyalin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerinin, üreticilerin veri sayfalarında geniş bir frekans aralığında sunulması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu durum yüksek frekans uygulamalarında kullanılan tam-dalga elektromanyetik tasarım programlarında elde edilen analiz sonuçları ile üretilen yapının ölçüm sonuçları arasında ciddi farklara sebep olmaktadır. Özellikle analiz edilen rezonans frekansı, karakteristik hat empedansı ve işlevsel performans sonuçları, ölçülen değerlerle öngörülemeyen farklılıklar göstermektedir. Bu bağlamda, tasarım frekanslarında kullanılan materyal özelliklerinin hassas şekilde belirlenmiş olduğu, iyileştirilmiş tasarım metotlarının geliştirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Üretim aşamasında kullanılması planlanan alttaş materyalinin, dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı değerlerinin ve bu değerlerin X-bant frekanslarında gösterdiği değişimin, yapının tasarım aşamasında bilinebilmesi için kullanılan yöntemlerden biri de dalga kılavuzu yöntemidir. Bu yöntemde, pratikte kullanılacak olan alttaş materyalinden küçük bir parça alınarak, X-bant frekanslarında çalışmaya uygun olan bir WR90 dalga kılavuzu içerisine yerleştirilir ve S-parametre ölçümleri gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçlar, dalga kılavuzunun içi boşaltılıp tekrarlanarak, ölçülen alttaş materyalinin elektriksel özellikleri havanın elektriksel özellikleri referans alınarak belirlenir. Belirlenen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri, tasarımda kullanılacak olan tam-dalga tasarım programına girdi olarak uygulanarak, henüz tasarım aşamasında pratikte elde edilmesi muhtemel sonuçlara yakın benzetim sonuçları elde etmek mümkün olmaktadır. Böylelikle, hassas ayarlama için üretilmek zorunda kalınan prototip sayısı ciddi şekilde azaltılmış olur. Bu tasarım metodunun sunulduğu [11]'de, FR4 materyali 8.5-11.5 GHz frekans bandında dalga kılavuzu yöntemi ile ölçülerek dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri yayınlanmıştır. Ayrıca sunulan frekansa bağlı elektriksel özellikler, bu değerler ile gerçekleştirilen bir mikroşerit iletim hattı tasarımına ait benzetim sonuçlarının, üretilmiş yapının ölçüm sonuçları ile kıyaslanması ile doğrulanmıştır.

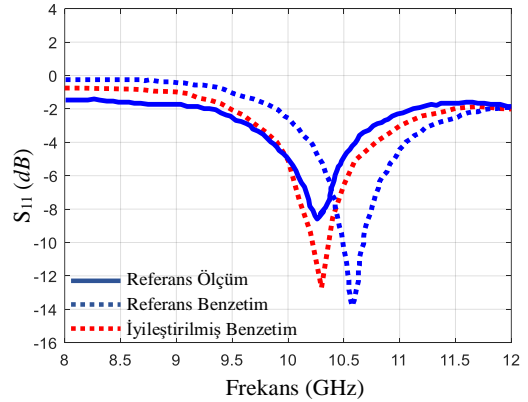
Çalışmanın bu aşamasında, dielektrik ölçümüne dayanan iyileştirilmiş tasarım metodunun anten tasarımları üzerindeki performansı analiz edilmiştir. Bu amaçla, literatürde FR4 alttaş materyali üzerine standart yöntem ile tasarlanan bir X-bant dairesel mikroşerit anten referans olarak kullanılmıştır [26]. Benzetim ve ölçüm sonuçları yayınlanmış bu anten yapısı, önerilen iyileştirilmiş tasarım yöntemi ile tekrar tasarlanmıştır. Yapılan tasarım çalışmasında, [11]'de FR4 materyali için sunulan 8.5-11.5

GHz aralığındaki frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri ANSYS-HFSS (High Frequency Structure Simulator) programına girdi olarak uygulanmıştır. Önerilen iyileştirilmiş tasarım metodu kullanılarak tasarlanan yapı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. İyileştirilmiş tasarım metodu ile yeniden tasarlanan dairesel mikroşerit anten yapısı

Kullanılan iyileştirilmiş tasarım metodunun performansını olabildiğince hassas şekilde analiz edebilmek için, tasarlanan ve üretilen antenler arasındaki yapısal farkların en aza indirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, referans alınan anten üretiminin ölçüm işlemlerinde kullanılmış olan konektör yapılarına alternatif bir ölçüm konektörü benzetim ortamında modellenmiş ve yapıya eklenmiştir. Böylelikle, ölçüm konektörünün sonuçlara olası etkileri de uygulanan iyileştirilmiş tasarım metodu ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına dahil edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, referans alınan çalışmada sunulan grafik üzerinden alınan benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalı yansımaya katsayısı (S_{11}) sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yansımaya katsayısı sonuçlarının karşılaştırması

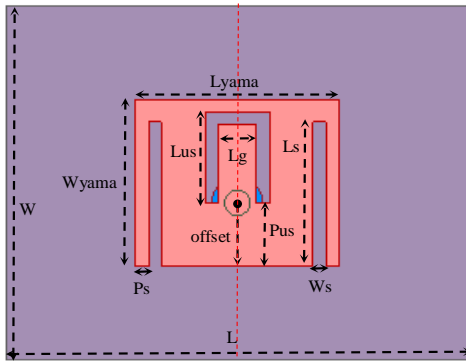
Karşılaştırmalı sonuçlara göre, standart benzetim yönteminde dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı tüm frekanslarda sabit kabul edildiğinden ($\epsilon_r=4.4$, $\tan\delta=0.02$), ölçüm ve önerilen yöntem sonuçları arasında standart yöntem sonuçlarından daha iyi bir uyum vardır. Özellikle, Şekil 2'deki rezonans frekansları göz önünde bulundurulduğunda, önerilen yaklaşımın tasarım doğruluğu

üzerinde sağladığı iyileştirme, ölçüm sonucuyla arasındaki uyumdan açıkça görülebilir. Bu benzerlik ayrıca, dielektrik ölçümüne dayalı benzetim metodunun anten yapılarının tasarımında oldukça kullanışlı olduğunu da göstermektedir.

3 Kompakt U-yarıklı yama anten tasarımı

X-bant uydu uygulamalarında kullanılmak amacıyla tasarlanan kompakt mikroşerit anten yapısı, temelde yama anten ve besleme yapısı olmak üzere iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. Tasarımın yama ve besleme yapıları iki ayrı 1.6 mm kalınlıkta, 0.035 mm bakır kalınlığına sahip FR4 alttaş materyali üzerine gerçekleştirilmiştir. Tasarım programı olarak, ANSYS-HFSS tam-dalga elektromanyetik alan benzetim programı kullanılmıştır. Tasarımda kullanılan FR4 alttaşlara ait dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri için, [11]'de FR4 materyali için sunulan 8.5-11.5 GHz aralığındaki frekansa bağlı data seti benzetim programına uygulanmıştır.

Tasarlanan prob beslemeli mikroşerit yama anten geometrisi ve tasarım parametreleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Turuncu renkli kısım iletken bakır yüzeyi, eflatun renkli kısım ise kullanılan FR4 alttaş malzemesinin dielektrik kısmını temsil etmektedir. Prob beslemesi, yapının merkez noktasından belirli bir miktar uzakta konumlandırılmıştır. Yapıdaki tüm yarıkların genişlikleri eşit olup, tasarım kırmızı kesikli çizgiler doğrultusunda simetriktir. Önerilen kompakt yama anten tasarımı, her iki yanından kenar bütünlük ek yarıklarla desteklemiş bir merkezi U-şekilli yarı yapısından oluşmaktadır. Böylelikle, doğası gereği dar-bantlı olan dikdörtgen mikroşerit yama antenin doğal rezonans frekansı ile yarı yapının rezonans frekansları yaklaştırılarak, tasarımın operasyonel frekans bant genişliği artırılmıştır.

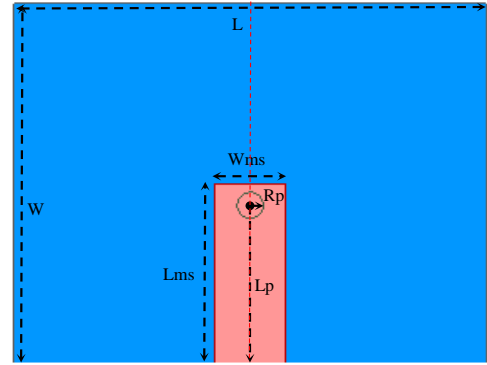


Şekil 3. Tasarlanan U-yarıklı yama anten yapısı

Kullanılan alttaş materyallerinin üst yüzeylerinde yama anten yapısı ve mikroşerit besleme hattı bulunurken, alt yüzeyleri tamamıyla bakır kaplı durumdadır. Bakır kaplı alt yüzeylerin sırt sırta birleştirilmesi ile yama anten ve besleme yapıları bütünlüştürülmüştür. Besleme yapısı ile yama yapısı arasındaki elektriksel iletimin sağlanması amacı ile kullanılan alttaşlara 2 mm çapında açılmış eş konumlu birer delik bulunmaktadır. Bu bütünlüştürülmüş delik yapısı içinden, bir ucu mikroşerit besleme hattına ve diğer ucu yama anten yapısına temas eden iletken bir prob geçirilerek elektriksel iletim sağlanmıştır. Kullanılan iletken prob çapı,

yapıların toprak yüzeyinin içinden de geçen iletim deliğinin çapının yarısı kadar seçilerek kısa devre akımı oluşma ihtimali en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

Antenin besleme yapısı, bir mikroşerit iletim hattı ve bu hattın ucuna dikey olarak yerleştirilmiş bir iletken prob yapısından oluşmaktadır. Tasarlanan mikroşerit besleme hattı geometrisi ve tasarım parametreleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Turuncu renkli kısım iletken bakır yüzeyi, mavi renkli kısım ise dielektrik kısmı temsil etmektedir. Mikroşerit hattın karakteristik empedansı, yama anten kısmı ile bütünlüştürülmüş hali üzerinden optimize edilerek 50 Ω değerini sağlayacak boyutlara ulaşılmıştır.



Şekil 4. Tasarlanan mikroşerit besleme hattı yapısı

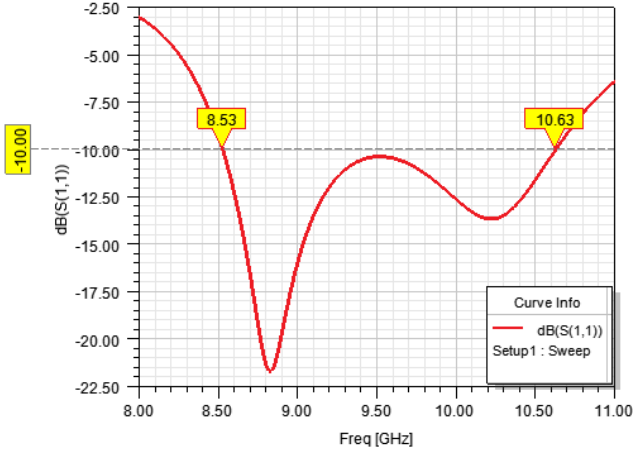
Tasarlanan prob beslemeli yama antenin bir mikroşerit iletim hattı ile sunulması, sunulan antenin dizi anten elemanı olarak kullanılması durumunda besleme ağı oluşturulmasına uygunluğunu artırmaktadır. Ayrıca sunulan anten yapısında, yama antenin bakır kaplı toprak yüzeyi ile besleme yapısının bakır kaplı olan toprak yüzeyinin birleştirilmesi ile yama antenin yayılım performansının, mikroşerit besleme hattının yayılımından etkilenmesi ihtimali en aza indirgenmiştir. Tasarlanan yama anten ve besleme hattı yapısına ait tasarım parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım parametre değerleri

Parametre	Değer (mm)
W	14
L	18
Wyama	6.6
Lyama	7.9
Lus	3.6
Lg	1.5
Ls	5.7
Ps	0.5
Pus	2.5
Ws	0.5
offset	2.5
Wms	2.73
Lms	7
Rp	1
Lp	6.2

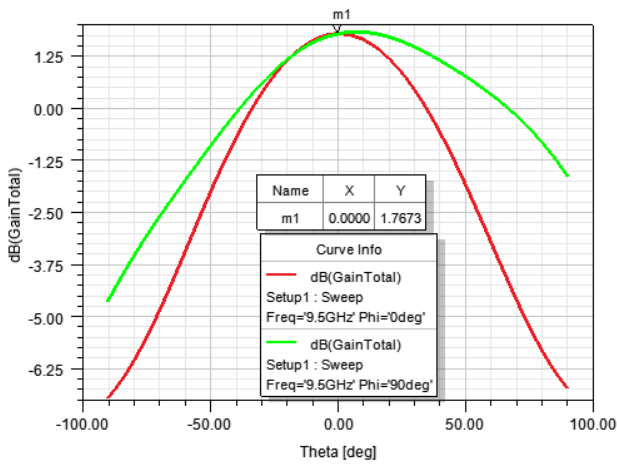
4 Benzetim sonuçları

Kullanılan dielektrik materyalin fiziki ölçüm sonuçlarına dayanan iyileştirilmiş tasarım metodu ile tasarlanan U-yarıklı yama anten yapısı, ANSYS-HFSS programı ile tam dalga elektromanyetik alan benzetim işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5'te benzetim işleminden elde edilen yansıma katsayısı grafiği sunulmuştur.



Şekil 5. Tasarlanan antenin yansıma katsayısı grafiği

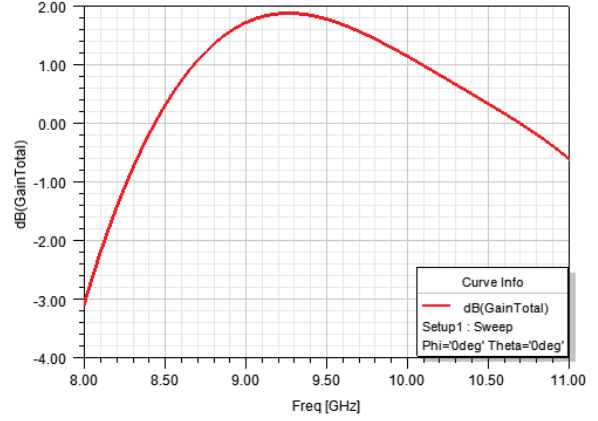
Elde edilen yansıma katsayısı sonuçları değerlendirildiğinde, tasarımın -10 dB referans değeri altında, 8.53-10.63 GHz aralığında 2.1 GHz kadar bir frekans bant genişliğine sahip olduğu gözlenmektedir. Operasyonel frekans olarak 9.5 GHz merkez kabul edildiğinde, elde edilen bant genişliğinin yaklaşık %22 olduğu anlaşılmaktadır. Belirlenen merkez frekansta anten tasarımının açısız değişime karşılık kazanç ışınım örüntüsü Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasarlanan antenin 9.5 GHz merkez frekansındaki kazanç ışınım örüntüsü

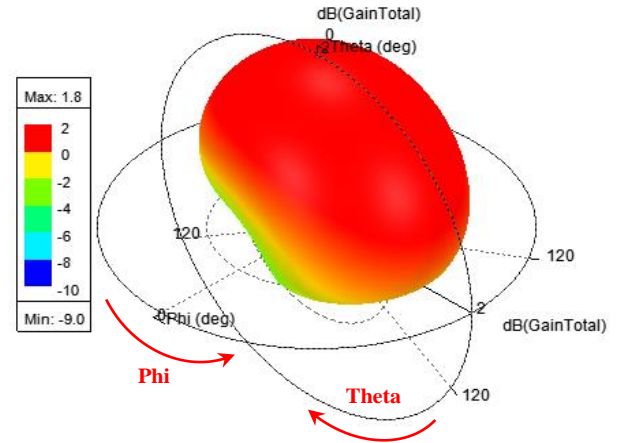
Birbirine dik iki ayrı düzlemde sunulan kazanç ışınım örüntü grafiği incelendiğinde, tasarlanan antenin nişan hattı (boresight) ekseninde yaklaşık 1.77 dB anten kazancına sahip olduğu ve tatmin edici bir yarı güç hüzmeye genişliğine sahip olduğu gözlenmektedir.

Şekil 7'de tasarlanan antenin frekans değişimine karşılık nişan hattı doğrultusundaki kazanç grafiği verilmiştir. Sunulan anten tasarımının 8.53-10.63 GHz aralığındaki operasyonel frekans bandında, anten tasarımının sağladığı en düşük kazanç değeri 0.11 dB ve en yüksek kazanç değeri 1.87 dB olarak gözlenmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan antenin frekansa göre kazanç grafiği

Tasarlanan antenin tüm ışınım açılarındaki kazanç ışınım performansının incelenmesi adına, merkez frekanstaki 3-boyutlu kazanç ışınım örüntüsü Şekil 8'de sunulmuştur. Elde edilen örüntü incelendiğinde, anten tasarımının geniş bir açısız genişlikte oldukça homojen bir kazanç örüntüsü sağladığı görülmektedir.



Şekil 8. Tasarlanan antenin 9.5 GHz merkez frekansındaki 3-boyutlu kazanç ışınım örüntüsü

Benzetim sonuçları ile operasyonel performansı gözlemlenen anten tasarımı kompakt yapısıyla da ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada sunulan kompakt U-Yarıklı yama anten tasarımının literatürdeki benzer frekans bandında operasyonel olan mikroşerit antenler ile boyutsal olarak karşılaştırması Tablo 2'de gösterilmiştir. Karşılaştırmalı tablo incelendiğinde, önerilen anten tasarımının benzer uygulama alanına sahip en yakın alternatifi ile arasında genişlikte %22, uzunlukta %25 ve toplam hacim olarak %40 oranında daha düşük boyutlu bir anten tasarımı olduğu gözlenmektedir.

Tablo 2. Önerilen anten tasarımının boyutsal olarak benzer frekanstaki alternatif çalışmalarla kıyaslanması

Referans	Frekans bandı (GHz)	Bant genişliği @ Rezonans frekansı	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Yükseklik (mm)
[16]	C & X-Bant	%5.66 @ 9.55 GHz	35.5	55	2.5
[17]	S & X-Bant	~ %1.13 @ 8.9 GHz	17.79	21.96	1.588
[18]	X-Bant	%30.93 @ 9.7 GHz	18	24	1.57
Önerilen çalışma	X-Bant	%22.11 @ 9.5 GHz	14	18	1.6

5 Sonuç

Bu çalışmada, FR4 malzemesinin dielektrik ölçüm yaklaşımı ile iyileştirilmiş bir anten tasarım metodu kullanılarak, X bant uzay uygulamaları için kompakt bir U-Yarıklı yama anten tasarımı önerilmiştir. Tasarımda kullanılan ANSYS-HFSS tam-dalga elektromanyetik benzetim programına, FR4 malzemesinin dalga kılavuzu yöntemi kullanılarak X-bantta ölçülen frekansa bağlı dielektrik sabiti ve tanjant kaybı değerleri uygulanmıştır. İyileştirilmiş bu tasarım metodunun anten tasarımları üzerindeki performansı, literatürdeki standart bir anten tasarımının benzetim ve ölçüm sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Doğrulan bu tasarım yöntemi kullanılarak X-bant uzay uygulamaları için yanıl yan yarıklarla desteklenmiş bir U-Yarıklı yama anten tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarım, yapının dizi elemanı olarak kullanılabilmesini kolaylaştıran bir mikrodalga besleme hattı ile birlikte sunulmuştur. Sunulan anten tasarımı, merkez operasyonel frekansta 1.77 dB kazanç ve %22 frekans bant genişliği sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen tasarım literatürde benzer frekans bantları için tasarlanmış alternatifleri ile boyutsal olarak kıyaslanarak, boyut ve ağırlık kısıtlamalarına tabii olan uydu uygulamaları için kullanışlı bir mikroşerit anten tasarımı olduğu gösterilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] C. A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design. Wiley, 2016.
- [2] Ramesh Garg, Prakash Bhartia, Microstrip antenna design handbook. Artech house, 2001.
- [3] S. Fatima Farida, et al., Effect of substrate thickness and permittivity on the characteristics of rectangular microstrip antenna. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, pp. 598-599, Washington, DC, USA, 1998.
- [4] M. Y. I. M. Inam, Analysis of Design Optimization of Bandwidth and Loss Performance of Reflectarray Antennas Based on Material Properties. Modern Applied Science, 4, 28-35, 2010. <https://doi.org/10.5539/mas.v4n1p28>.
- [5] J. R. Aguilar, M. Beadle, P. T. Thompson, and M. W. Shelley, The microwave and RF characteristics of FR4 substrates. IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology, pp. 2/1-2/6, London, UK, 1998.
- [6] E. L. Holzman, Wideband measurement of the dielectric constant of an FR4 substrate using a parallel-coupled microstrip resonator. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54, pp. 3127-3130, 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.877061>.
- [7] G. C. Hock, C. K. Chakrabarty, Emilliano and M. H. Badian, Dielectric verification of FR4 substrate using microstrip bandstop resonator and CAE tool. IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC), pp. 894-898, Kuala Lumpur, 2009.
- [8] P. S. Bansode, K. Makhija, S. A. Gangal and R. C. Aiyer, Nondestructive measurement of dielectric constant using a 2.4 GHz microstrip patch antenna. 2nd International Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS), pp. 219-223, Pune, 2015.
- [9] W. L. Pritchard, Satellite communication-an overview of the problems and programs. Proceedings of the IEEE, 65, 294-307, 1977. <https://doi.org/10.1109/PROC.1977.10483>.
- [10] J. Baker-Jarvis, Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, Technical Report 1341, 1995.
- [11] O. Kiriş, F. Ozturk and M. Gokten, A Dielectric Measurement-Based Design Approach for X-Band Applications on FR4 Substrate. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, pp. 783-784, Montreal, QC, Canada, 2020.
- [12] W. Imbraile, S. Gao, and L. Boccia, Space Antenna Handbook. Wiley, Hoboken, 2012.
- [13] Kraus, J. D. and R. J. Marhefka, Antennas: For all Applications. McGraw-Hill, 2002.
- [14] M. Ayad, M. Benziane, K. Saoudi, A. Arabi, M. Rezki and S. Medjedoub, Conception and study of a patch antenna for VSAT application. 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), pp. 433-437, Sétif, Algeria, 2022.
- [15] S. B. Sharma, A. Ugle and K. Parikh, A Novel U-slot Aperture Coupled Annular-Ring Microstrip Patch Antenna for Multiband GNSS Applications. 14th

- European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-3, Copenhagen, Denmark, 2020.
- [16] N. Prema, "Design of multiband microstrip patch antenna for C and X band," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127, pp. 8812-8818, 2016.
- [17] A. K. Sidhu and J. S. Sivia, Microstrip Rectangular Patch Antenna for S and X band applications. International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), pp. 248-251, Chennai, India, 2016.
- [18] M. N. Rahman, M. T. Islam, N. Misran and M. Samsuzzaman, A tuning fork-shaped microstrip patch antenna for X-band satellite and radar applications. 6th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), pp. 1-2, Langkawi, Malaysia, 2017.
- [19] M. S. Ellis, Z. Zhao, J. Wu, X. Ding, Z. Nie, and Q.-H. Liu, A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64, 1552-1555, 2016. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2526076>.
- [20] M. Samsuzzaman, M. Islam, N. Misran, and M. M. Ali, Dual band X shape microstrip patch antenna for satellite applications. *Procedia Technology*, 11, 1223-1228, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.317>.
- [21] T. Huynh and K. F. Lee, Single-layer single-patch wideband microstrip antenna. *Electronics Letters*, 31, 1310-1312, 1995. <https://doi.org/10.1049/el:19950950>.
- [22] K. F. Lee, K. M. Luk, K. F. Tong, S. M. Shum, T. Huynh and R. Q. Lee, Experimental and simulation studies of the coaxially fed U-slot rectangular patch antenna. *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 144, 354-358, 1997. <https://doi.org/10.1049/ip-map:19971334>.
- [23] K. F. Lee, S. L. S. Yang and A. Kishk, The versatile U-slot patch antenna. 3rd European Conference on Antennas and Propagation, pp. 3312-3314, Berlin, Germany, 2009.
- [24] M. Clenet and L. Shafai, Multiple resonances and polarisation of U slot patch antenna. *Electronics Letters*, 35, 101-103, 1999. <https://doi.org/10.1049/el:19990087>.
- [25] K.-F. Tong, K.-M. Luk, K.F. Lee and R.Q. Lee, A broad-band U-slot rectangular patch antenna on a microwave substrate. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48, 954-960, 2000. <https://doi.org/10.1109/8.865229>.
- [26] A. A. Qureshi, M. U. Afzal, T. Tauqeer and M. A. Tarar, Performance analysis of FR-4 substrate for high frequency microstrip antennas. *China-Japan Joint Microwave Conference*, pp. 1-4, Hangzhou, China, 2011.





Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS ASM'nin MUS tabanlı hız-algılayıcısız öngörülü moment kontrolü

Rıdvan Demir^{1,*} , Recep Yıldız² , Murat Barut³ 

¹ Kayseri University, Electrical Electronic Engineering Department, 38280, Kayseri, Türkiye

^{2,3} Niğde Ömer Halisdemir University, Electrical Electronic Engineering Department, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

In this study, an induction motor (IM) drive based on speed-sensorless predictive torque control (PTC) is designed to perform the high-performance control of the IMs by utilizing the least mean square (LMS) algorithm for the adaptation mechanism of the model reference adaptive system (MRAS). Here, the MRAS with LMS adaptation is based on the stator currents ($i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$) of the IM. Moreover, the rotor fluxes ($\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$) are obtained by the current model, which requires the rotor mechanical speed (ω_m) along with $i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$. In contrast to the other MRAS based studies using proportional-integral (PI) in the adaptation mechanisms to estimate state or parameter, it is possible to determine the states and/or parameters as weight coefficients in the MRAS with LMS adaptation which are calculated and updated in each iteration. Here, ω_m value is estimated and updated in each iteration as weight coefficient. Furthermore, the MRAS with LMS adaptation is compared to the MRAS using conventional PI in simulations. The simulation results clearly visualize both the estimation performance of stator current based MRAS using LMS adaptation and the effectiveness of the proposed PTC based IM drive.

Keywords: Speed-sensorless IM control, PTC, LMS algorithm, MRAS

1 Introduction

Due to the devastating effects of climate change, CO₂ emissions have attracted the attention of people all over the world. Thus, instead of using fossil fuels in vehicles, the electrical vehicles have been becoming more and more popular these days, which points out the importance of electrical motors and their control strategies. Induction motor (IM) is one of the used electric motors in electrical vehicles and industry. Some of the reasons for the use of IMs can be given as low maintenance requirement, cost, simplicity, and ability to work in harsh environments. Considering the high performance control applications of the IMs, different methods are used in the current literature such as field oriented control (FOC) [1], direct torque control (DTC) [2, 3], and model predictive control (MPC) [4, 5]. In the literature, there are some studies emphasizing the superiorities of the FOC over the DTC or vice versa [6, 7]. Here, MPC is rather new comparing to the other methods in the IM control applications. In the literature, one of the most

Öz

Bu çalışmada, asenkron motorların (ASM'lerin) yüksek başarılı kontrolünü gerçekleştirmek için uyarlama mekanizmasında en küçük ortalama kareler (EKOK) algoritmasını kullanan modele uyarlamalı sisteme (MUS'a) dayanan hız-algılayıcısız öngörülü moment kontrol (ÖMK) tabanlı ASM sürücüsü tasarlanmıştır. Burada, EKOK uyarlamalı MUS ASM'nin stator akımları ($i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$) tabanlıdır. Rotor akıları ($\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$), rotor mekanik hızı (ω_m) ile birlikte $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$ gerektiren akım model kullanılarak elde edilmiştir. Uyarlama mekanizmasında oransal-integral kullanan MUS tabanlı çalışmaların aksine, EKOK uyarlamalı MUS'da durum ve/veya parametreler her iterasyonda hesaplanan ve güncellenen ağırlık katsayıları olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada ω_m her iterasyonda ağırlık katsayısı olarak kestirilir ve güncellenir. Ayrıca, EKOK uyarlamalı MUS geleneksel oransal-integrali kullanan MUS ile benzetim ortamında karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları EKOK uyarlamalı kullanılan stator akımları tabanlı MUS'un kestirim başarımını ve önerilen ÖMK tabanlı ASM sürücüsünün etkinliğini açıkça göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Hız-algılayıcısız ASM kontrolü, MÖK, EKOK algoritması, MUS

preferred MPC strategies for the control of IMs is the predictive torque control (PTC) [8]. In the PTC strategy, the electromagnetic torque and stator flux are controlled by the proper selection of the voltage vector, which determines the inverter switching states [9]. By determining the proper voltage vector, the reference flux and electromagnetic torque values are tracked by PTC [9]. By the minimization of the cost function, which is defined by the control objectives in PTC, the optimal voltage vector is selected. Here in PTC, new control constraints and objectives can be added to the cost function [4]. Although there is no need for inner current control loops, there is only one PI controller for the outer speed control loop in PTC [8]. As addressed by Rodriguez et al. [4], by considering the computational optimization, the parameter sensitivity, the weight factor adjustment, and the switching frequency limitation, more efficient PTC strategies can be developed. Thus, there are some studies for the enhancement of PTC strategies by reducing switching frequency [9], minimizing power loss [10], optimizing or

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr (R. Demir)

Geliş / Received: 22.11.2022 Kabul / Accepted: 26.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1208031

eliminating weight factor [11, 12], and increasing robustness against the parameter variations [13].

Along with the advantages of the IMs, their highly nonlinear models and parameter variations make the high performance control applications challenging. Here, the parameter variations address the frequency and temperature based resistance variations and flux level based inductance variations. Control performance of the IM drives is related to the correct values of the states and thus parameters. In order to obtain the correct values of the control objectives, model based methods are used in the literature such as model reference adaptive system (MRAS) [14], full order observers [15], sliding mode observer (SMO) [16], and nonlinear Kalman filters [17].

Considering these methods, MRAS based methods stand especially out due to simplicity and computational load when considering a simple microprocessor application. Looking at the MRAS based studies in the literature, Schauder [18] presents rotor mechanical speed (ω_m) estimation by using the voltage and current model of the IM in the reference and adaptive model of the flux based MRAS, respectively. Vasic et al. [19] use the flux based MRAS for parallel estimation of the stator resistance (R_s) and ω_m . In Gayathri et al. [20], the rotor resistance (R_r) estimation is performed by using the rotor flux based MRAS. In Mapelli et al. [21], the reactive power and motor torque based two different MRAS algorithms are implemented and compared. Demir and Barut [22] present an active power based MRAS algorithm using the least mean square (LMS) method in the adaptation mechanism to estimate R_s along with the other estimated states and parameters by an extended Kalman filter. Teja et al. [23] introduce an X based MRAS for R_s estimation when ω_m is measured. In Teja et al. [23], X represents a stator voltage and current based fictitious quantity. In Basak et al. [24], an active power and Y based MRAS algorithm is performed for R_s estimation, and X based MRAS algorithm is used for the ω_m estimation. As X in Teja et al. [23], Y represents a fictitious quantity in [24]. Orłowska-Kowalska and Dybkowski [25] present a MRAS algorithm based on stator current to estimate ω_m . In Bednarz and Dybkowski [14], a MRAS algorithm based on reactive and active power is performed to estimate R_s and R_r . The rotor time constant (T_r) is estimated by MRAS using least square method [1].

The main contribution of this study is to perform the speed-sensorless PTC based IM drive by using the stator currents based MRAS. Here, the LMS is utilized in the adaptation mechanism of the MRAS to perform ω_m estimation. The estimated ω_m is fed back to both PTC and the current model of the IM used to obtain the rotor fluxes ($\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$). $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ are used in both PTC to obtain stationary axis components of stator fluxes ($\varphi_{s\alpha}$ and $\varphi_{s\beta}$) and adaptive model to obtain stator currents ($i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$). Instead of using the proportional-integral (PI) controller adaptation in MRAS, the LMS algorithm provides the opportunity to determine states and/or parameters as weight coefficient to calculate and update in each iteration, which can be classified as another contribution of this study. By using LMS adaptation in MRAS, the PI controller need for the conventional MRAS is eliminated. Therefore, there is no

need to design PI controller and determine its coefficients, which is a time consuming process. Furthermore, in order to show the effectiveness of the MRAS with LMS adaptation, it is compared with the MRAS using conventional PI in the same scenario in simulations. The comparison results are presented both graphically and numerically.

This paper is composed of six sections. The related literature review and contribution of this study is given in Section I. The dynamic model of the IMs is given in Section II. The details of the stator current based MRAS algorithm and LMS adaptation based speed estimation are presented in Section III. Section IV and Section V present the details of proposed PTC based IM drive and the simulation results, respectively. Finally, the conclusion is clarified in Section VI.

2 Dynamic model of the IM

The dynamic model of the IM based on rotor flux can be divided into two subsystems: the electrical and mechanical. The electrical subsystem can be described by fourth-order mathematical equations as follows:

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} \varphi_{r\alpha} \quad (1)$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{s\beta} - \frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} \varphi_{r\alpha} \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{r\alpha} - p_p \omega_m \varphi_{r\beta} \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} + p_p \omega_m \varphi_{r\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{r\beta} \quad (4)$$

As for the mechanical subsystem, it is defined by a mathematical equation derived from the equation of motion as follows:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3 p_p L_m}{2 J_T L_r} (\varphi_{r\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{B_T}{J_T} \omega_m - \frac{t_L}{J_T} \quad (5)$$

where $\alpha\beta$ – represents stator stationary axis; $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$, and $i_{s\beta}$ are the $\alpha\beta$ – axis components for stator voltages and currents; $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ are the $\alpha\beta$ – axis components for rotor fluxes; ω_m is rotor mechanical speed; R_r and R_s are rotor and stator resistances, respectively; L_r and L_s are rotor and stator leakage inductances, respectively; L_m is magnetizing inductance; $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$ is stator transient inductance; p_p is number of pole pairs; J_T and B_T are the total inertia of system and viscous friction coefficient, respectively [26].

In this study, so as to perform the estimation of $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, and ω_m , the electrical subsystem equations given in Equation (1)-(4) are used in the MRAS algorithm. Here, (3) and (4) represent the current model of the IM.

3 Stator current based MRAS

The flowchart for the conventional stator current based

MRAS algorithm using PI controller and MRAS algorithm using LMS adaptation are shown in Figure 1 [25] and Figure 2. In this MRAS estimators, while the measured $i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$ are outputs of the reference model, the adaptive model outputs are obtained by Equations (6) and (7). $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ required for Equations (6) and (7) are provided by Equations (8) and (9), which are the current model. Here, Equations (6)-(9) are obtained by discretizing Equations (1)-(4) with forward Euler approximation.

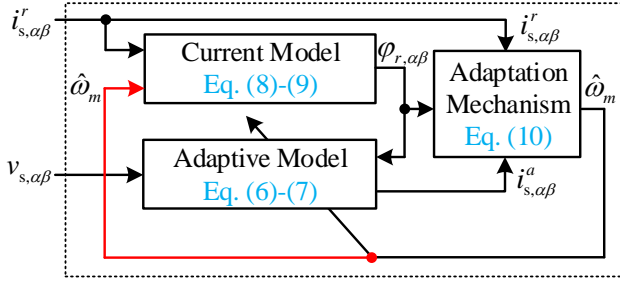


Figure 1. The stator current based MRAS using conventional PI [25].

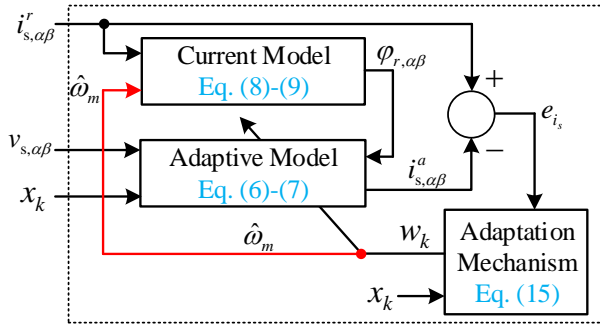


Figure 2. The stator current based MRAS with LMS adaptation

$$i_{s\alpha,k+1}^a = \left(1 - T \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right)\right) i_{s\alpha,k} + \frac{T}{L_\sigma} v_{s\alpha,k} + \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \varphi_{r\alpha,k} + \frac{L_m p_p \omega_{m,k} T}{L_\sigma L_r} \varphi_{r\beta,k} \quad (6)$$

$$i_{s\beta,k+1}^a = \left(1 - T \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right)\right) i_{s\beta,k} + \frac{T}{L_\sigma} v_{s\beta,k} - \frac{L_m p_p \omega_{m,k} T}{L_\sigma L_r} \varphi_{r\alpha,k} + \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \varphi_{r\beta,k} \quad (7)$$

$$\varphi_{r\alpha,k+1} = \frac{R_r L_m T}{L_r} i_{s\alpha,k} + \left(1 - \frac{R_r T}{L_r}\right) \varphi_{r\alpha,k} - T p_p \omega_{m,k} \varphi_{r\beta,k} \quad (8)$$

$$\varphi_{r\beta,k+1} = \frac{R_r L_m T}{L_r} i_{s\beta,k} + T p_p \omega_{m,k} \varphi_{r\alpha,k} + \left(1 - \frac{R_r T}{L_r}\right) \varphi_{r\beta,k} \quad (9)$$

In order to perform speed estimation in MRAS algorithm using conventional PI adaptation, Equations (6)-(9) and measured stator currents are used in Equation (10).

$$\omega_m^{PI} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left((i_{s\alpha}^r - i_{s\alpha}^a) \varphi_{r\beta} - (i_{s\beta}^r - i_{s\beta}^a) \varphi_{r\alpha}\right) \quad (10)$$

For the MRAS estimator with LMS adaptation, the weight vector (\mathbf{w}_k) and the input matrix (\mathbf{x}_k) of the adaptive model given in Equations (6) and (7) are defined as follows:

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - T \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) \\ \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \\ \frac{T L_m p_p \omega_{m,k}}{L_\sigma L_r} \\ \frac{T}{L_\sigma} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} i_{s\alpha,k} & i_{s\beta,k} \\ \varphi_{r\alpha,k} & \varphi_{r\beta,k} \\ \varphi_{r\beta,k} & \varphi_{r\alpha,k} \\ v_{s\alpha,k} & v_{s\beta,k} \end{bmatrix} \quad (12)$$

where other coefficients except for ω_m in \mathbf{w}_k are constant. Using Equations (11) and (12), the adaptive model outputs can be rewritten as follows:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha,k+1}^a \\ i_{s\beta,k+1}^a \\ i_{s,k}^a \end{bmatrix} = \mathbf{x}_k^T \mathbf{w}_k \quad (13)$$

The difference between the reference model outputs (measured $i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$) and the adaptive model outputs, namely errors, are defined by Equation (14).

$$\mathbf{e}_{i_{s,k}} = \mathbf{i}_{s,k}^r - \mathbf{i}_{s,k}^a \quad (14)$$

In the LMS algorithm, \mathbf{w}_k is updated by using the $\mathbf{e}_{i_{s,k}}$ and \mathbf{x}_k according to Equation (15).

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu \mathbf{x}_k \mathbf{e}_{i_{s,k}} \quad (15)$$

where μ is called the step size controlling stability and the convergence rate of the LMS algorithm. So as to guarantee the stability of the LMS algorithm, μ must theoretically be selected as in Equation (16) [22, 27].

$$0 < \mu < 2/\lambda_{max} \quad (16)$$

In Equation (16), λ_{max} represents the greatest eigenvalue of the correlation matrix $\mathbf{R} = \mathbf{E}\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T\}$ [27].

4 PTC based IM drive

In this paper, to perform the speed-sensorless control of the IM, the PTC drive system is chosen due to its advantages.

As can be seen from the IM drive block diagram in Figure 3, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$ and ω_m are required for the PTC algorithm. The required $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, and ω_m values are obtained by using the stator current based MRAS structure, which utilizes the current model of the IM to perform $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ estimations. By estimating $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ with the help of the current model, the estimated $\varphi_{s\alpha}$ and $\varphi_{s\beta}$ are obtained for the PTC algorithm as in Equation (19) [8].

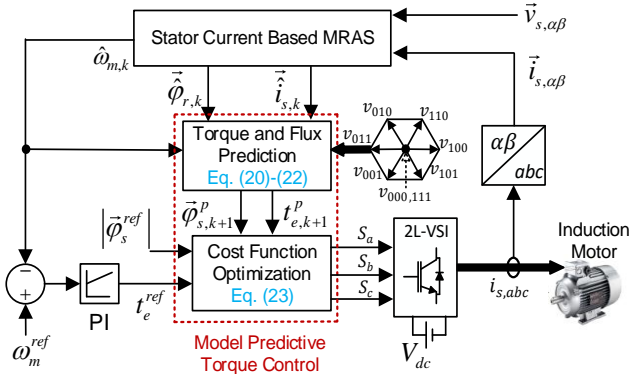


Figure 3. MRAS based speed-sensorless IM drive based on PTC

In the IM drive, the inverter is the two-level voltage source inverter (2L-VSI). The eight inverter switching vectors are also presented in Figure 3. Furthermore, the 2L-VSI voltage source inverter topology and the switching vectors are presented in Figure 4. In Figure 4, S_a , S_b , and S_c are the switching states associated with each phase, and V_{dc} represents the DC link voltage of the inverter. Moreover, if $S_x = 1$, S_x represents the ON state and \bar{S}_x represents the OFF state, $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ [13]. Here, the inverter switching state (\vec{S}) and the inverter output voltage (\vec{v}_s) are presented in Equations (17) and (18), respectively:

$$\vec{S} = \frac{2}{3}(S_a + \bar{a}S_b + \bar{a}^2S_c) \quad (17)$$

$$\vec{v}_s = V_{dc}\vec{S} \quad (18)$$

where $\bar{a} \triangleq e^{j2\pi/3}$ and V_{dc} represents the inverter DC link voltage as in Figure 3.

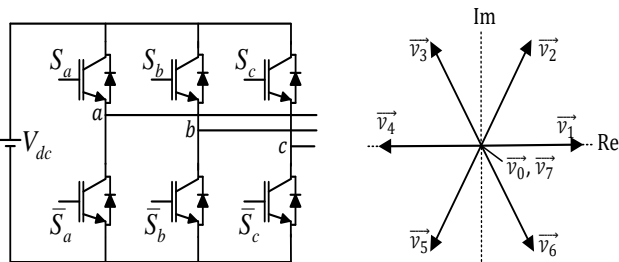


Figure 4. 2L-VSI topology and the possible eight voltage vectors.

In order to obtain the estimated stator flux vector ($\vec{\varphi}_{s,k}$) required for the PTC, the estimated stator current vector ($\vec{i}_{s,k}$) and the estimated rotor flux vector ($\vec{\varphi}_{r,k}$) are used in each iteration. $\vec{\varphi}_{s,k}$ is obtained as in Equation (19) [4, 8, 28].

$$\vec{\varphi}_{s,k} = \frac{L_m}{L_r} \vec{\varphi}_{r,k} + L_\sigma \vec{i}_{s,k} \quad (19)$$

In order to perform the PTC algorithm, the predicted stator voltage vector ($\vec{\varphi}_{s,k+1}^p$), the predicted stator current vector ($\vec{i}_{s,k+1}^p$), and the predicted electromagnetic torque vector ($t_{e,k+1}^p$) are required. For this purpose, $\vec{\varphi}_{s,k+1}^p$ value at the time $k+1$ is obtained by using the voltage model of the IM for each voltage vector as in Equation (20). The expressions for the $\vec{i}_{s,k+1}^p$ and $t_{e,k+1}^p$ are given in Equations (21) and (22) at the time $k+1$ [8, 28, 29].

$$\vec{\varphi}_{s,k+1}^{p(j)} = \vec{\varphi}_{s,k} + T(\vec{v}_{s,k}^{p(j)} - R_s \vec{i}_{s,k}), j \in \{0, 1, \dots, 7\} \quad (20)$$

$$\vec{i}_{s,k+1}^{p(j)} = \frac{T}{T+T_\sigma} \left(\frac{1}{R_\sigma} \left(\frac{k_r}{T_r} - k_r j \hat{\omega}_r \right) \vec{\varphi}_{r,k} + \vec{v}_{s,k}^{p(j)} \right) + \left(1 + \frac{T}{T_\sigma} \right) \vec{i}_{s,k}, j \in \{0, 1, \dots, 7\} \quad (21)$$

$$t_{e,k+1}^{p(j)} = \frac{3}{2} p_p \Im \{ (\vec{i}_{s,k+1}^{p(j)}) (\vec{\varphi}_{s,k+1}^{p(j)})^* \}, j \in \{0, 1, \dots, 7\} \quad (22)$$

where $T_\sigma = L_\sigma/R_\sigma$, $T_r = L_r/R_r$, $R_\sigma = R_s + k_r^2 R_r$, $\hat{\omega}_r = p_p \hat{\omega}_m$, and $k_r = L_m/L_r$.

The presented predicted values ($\vec{\varphi}_{s,k+1}^{p(j)}$ and $t_{e,k+1}^{p(j)}$) are used in a predefined cost function. In order to obtain the optimal switching vectors, predicted values calculated for all switching vector are applied to cost function. Therefore, the voltage vector minimizing the cost function given in Equation (23) is chosen as optimal switching vector.

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ \left| t_e^* - t_{e,k+h}^{p(j)} \right| + \gamma \left| \left| \vec{\varphi}_s^* \right| - \left| \vec{\varphi}_{s,k+h}^{p(j)} \right| \right| + I_{m,k+h} \right\} \quad (23)$$

Here in Equation (23), γ is the weighting factor determining the relative effect of the stator flux on the cost function, N is the prediction horizon ($N = 1$ in this paper), I_m refers to the overcurrent protection, which is given in Equation (24) [4, 8, 28].

$$I_{m,k+h} = \begin{cases} 0, & \text{if } |\vec{i}_{s,k+1}^p| \leq i_{s,max} \\ \infty, & \text{if } |\vec{i}_{s,k+1}^p| > i_{s,max} \end{cases} \quad (24)$$

5 Simulations

In order to test the robustness and performance of the proposed speed-sensorless drive in simulations, the block diagram given in Figure 3 is designed and implemented in Matlab/Simulink. As stated before, a PI controller whose

coefficient is chosen by using trial-and-error method is used in the outer speed control loop of the IM drive. A three phase squirrel-cage IM, whose rated parameters and values are presented in Table 1, is used in Figure 3. In simulations; sampling time (T) is determined as $25\mu s$; weighting factor (γ) in cost function is determined as 50; step size (μ) of the LMS algorithm is chosen as 0.5.

Table 1. Rated values and parameters for IM used in simulations.

P [kW]	V [V]	I [A]	f [Hz]
3	380	6.9	50
n_{mn} [r/min]	t_L [N.m]	p_p	R_s [Ω]
1430	20	2	2.283
R_r [Ω]	L_s [H]	L_r [H]	L_m [H]
2.133	0.2311	0.2311	0.22

In simulation studies, a scenario including rated speed for both directions of operation, low speed operation, and zero speed operation of the IM is designed. Moreover, t_L applied to the IM is changed both in linear and step-like manner to examine the robustness of the proposed IM drive against different types of t_L changes. The applied stator flux amplitude reference ($|\varphi_s|^{ref}$), the rotor mechanical speed reference (n_m^{ref}) for the IM drive, and the applied t_L for IM are presented in Figure 5 for the challenging scenario.

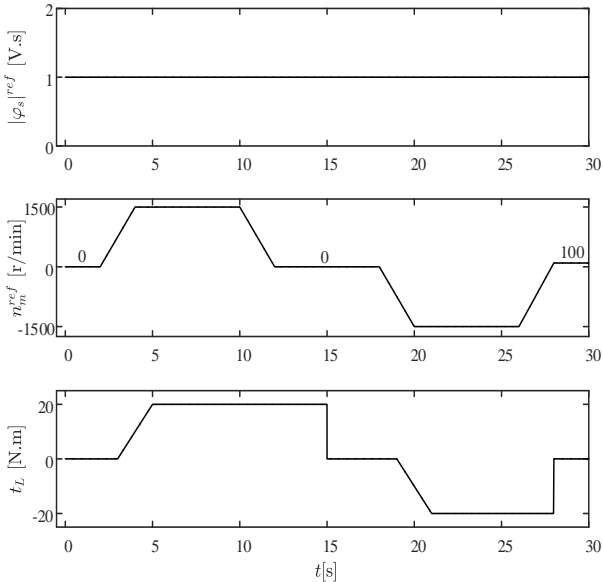


Figure 5. The applied $|\varphi_s|^{ref}$ and n_m^{ref} values for the IM drive together with the applied t_L to the IM.

The estimation results obtained by stator current based MRAS with LMS adaptation and the control performance for the proposed speed-sensorless PTC based IM drive is presented in Figure 6. The associating estimation errors of the MRAS with LMS adaptation are given in Figure 7. Here

in Figures 6 and 7, the measured values are represented by “ \cdot ”, the estimated values are represented by “ $\hat{\cdot}$ ”, and associating estimation errors determined by the difference between the estimated and measured values are represented by “ $e_{(*)}$ ”.

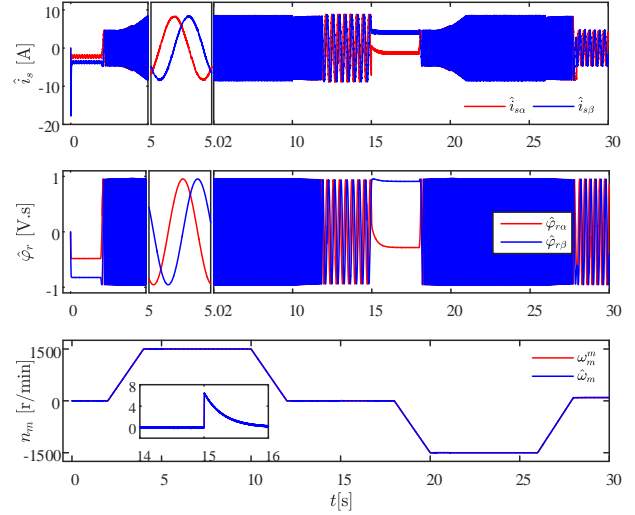


Figure 6. Corresponding estimations results for MRAS with LMS adaptation and the tracking results for the proposed IM drive.

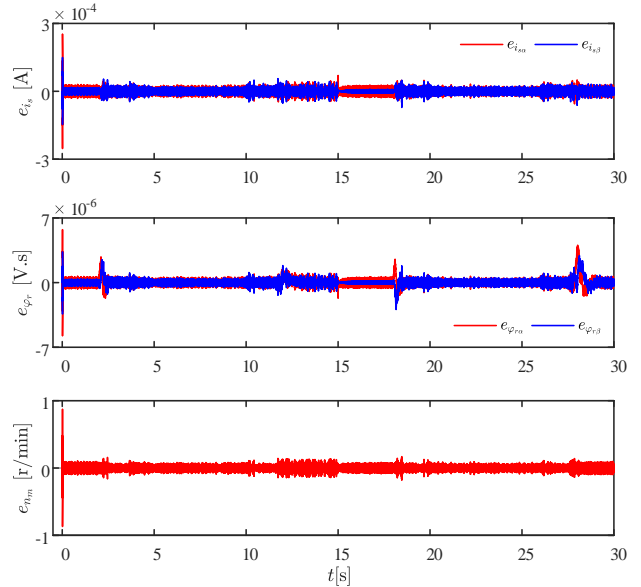


Figure 7. Estimation errors for the MRAS with LMS adaptation.

In order to show the performance of the proposed IM drive, the MRAS with LMS adaptation is compared to the MRAS using traditional PI adaptation for the scenario given in Figure 5. The estimation results and errors associating with MRAS using PI adaptation are presented in Figures 8 and 9, respectively.

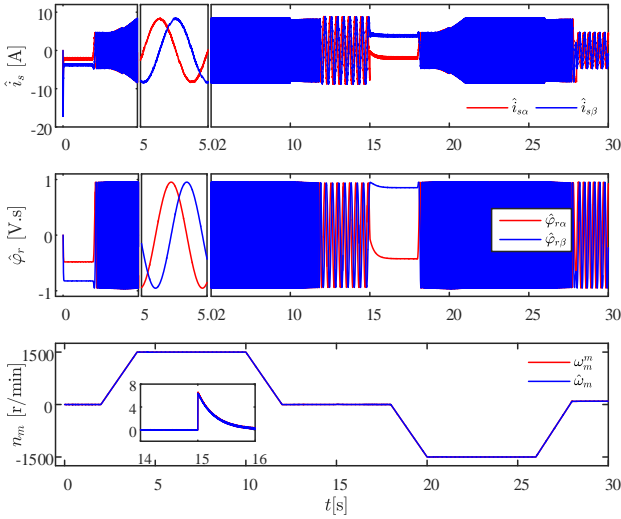


Figure 8. Corresponding estimations results for MRAS using conventional PI adaptation and the tracking results for the IM drive.

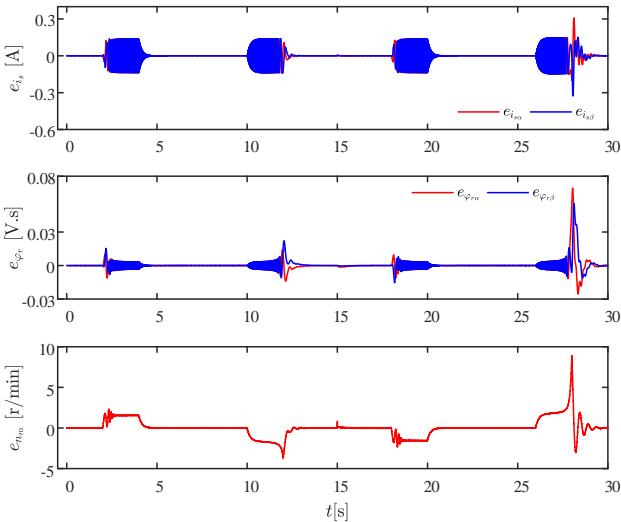


Figure 9. Estimation errors for the MRAS using conventional PI adaptation.

In the performance tests given in Figures 5-9, the high performance control of the IM is executed for a wide speed range with t_L changes. Considering the simulation results in Figures 6-9 for the proposed IM drive, the following detailed remarks can be deduced.

- Considering the comparison results given in Figures 6-9 for MRAS with LMS adaptation and MRAS using conventional PI, it can be seen that the MRAS estimator using LMS adaptation presents better estimation performance compared to the MRAS using conventional PI. This can be verified by considering the estimation errors presented in Figures 7 and 9.
- Although the proposed PTC based IM drive is tested under a wide speed range operation scenario, highly promising control and estimation performances are achieved for the proposed PTC based IM drive and MRAS with LMS adaptation.

- The zero speed and zero load torque condition called DC condition is tested in the scenario. It is clear from the Figures 6 and 7 that the proposed PTC based IM drive easily handles this challenging condition.
- As can be seen from Figure 5, there are linear and step-like t_L changes in the performance test. Due to the high estimation and control performance of the proposed PTC based IM drive system, it can be expressed that the proposed drive is robust against t_L variations as in Figures 6 and 7.

In order to demonstrate the comparison results of MRAS estimators numerically, the mean square errors (MSEs) related to the MRAS estimations are presented in Tables 2 and 3 for MRAS with LMS and MRAS using conventional PI, respectively.

Table 2. MSEs related to the estimations for MRAS with LMS adaptation (for Figure 7).

$e_{i_{s\alpha}}$ [A]	$e_{i_{s\beta}}$ [A]	$e_{\varphi_{r\alpha}}$ [V.s]	$e_{\varphi_{r\beta}}$ [V.s]
8.640×10^{-11}	5.463×10^{-11}	1.535×10^{-13}	1.013×10^{-13}
e_{n_m} [r/min]			
9.980×10^{-4}			

Table 3. MSEs related to the estimations for MRAS with conventional PI adaptation (for Figure 9).

$e_{i_{s\alpha}}$ [A]	$e_{i_{s\beta}}$ [A]	$e_{\varphi_{r\alpha}}$ [V.s]	$e_{\varphi_{r\beta}}$ [V.s]
2.760×10^{-3}	2.688×10^{-3}	2.787×10^{-5}	2.341×10^{-5}
e_{n_m} [r/min]			
1.084			

The presented MSE values in Tables 2 and 3 for MRAS estimators verify that the MRAS with LMS adaptation has better estimation performance than the MRAS using conventional PI. In this study, the step size for the MRAS with LMS adaptation and PI coefficients for conventional MRAS are determined by the trial-and-error method, and these values are crucial for the performance of the MRAS estimators. Therefore, it can be noted that a fair comparison results can be obtained by determining the optimal step size value and PI coefficient values by using metaheuristic optimization techniques.

6 Conclusion

In this paper, IM drive based on PTC is designed and tested for the speed-sensorless high performance control applications of the IMs. So as to perform the speed-sensorless PTC of IM, the stator current based MRAS with LMS adaptation is used. In the MRAS structure, $\varphi_{r\alpha}$ and $\varphi_{r\beta}$ is obtained by using the current model of the IM, which requires the rotor mechanical speed (ω_m) along with the $i_{s\alpha}$ and $i_{s\beta}$. Instead of using PI controller based adaptation mechanism in the stator current based MRAS, LMS based adaptation mechanism is used to perform the estimations in this paper. By using the LMS algorithm in adaptation mechanism, it is possible to determine ω_m as a weight coefficient in the LMS based MRAS algorithm which is

calculated and updated in each iteration. In order to test the proposed IM drive in simulations, a scenario including wide speed range operation of the IM with linear and step-like t_L variations is performed. The simulation results show robustness and effectiveness of the proposed IM drive. Moreover, the MRAS with LMS adaptation is compared with the MRAS using conventional PI. The presented results and MSE values show the superiority of the MRAS with LMS adaptation compared to the MRAS using conventional PI.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 19%

References

- [1] B. Reddy, G. Poddar, and B. P. Muni, 'Parameter Estimation and Online Adaptation of Rotor Time Constant for Induction Motor Drive', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 58(2), 1416–1428, 2022. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3141700>.
- [2] I. M. Alsofyani and N. R. N. Idris, 'Simple Flux Regulation for Improving State Estimation at Very Low and Zero Speed of a Speed Sensorless Direct Torque Control of an Induction Motor', *IEEE Trans. Power Electron.*, 31(4), 3027–3035, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2447731>.
- [3] M. A. Usta, H. I. Okumus, and H. Kahveci, 'A simplified three-level SVM-DTC induction motor drive with speed and stator resistance estimation based on extended Kalman filter', *Electr. Eng.*, 99(2), 707–720, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0442-x>.
- [4] J. Rodriguez, R. M. Kennel, J. R. Espinoza, M. Trincado, C. A. Silva, and C. A. Rojas, 'High-Performance Control Strategies for Electrical Drives: An Experimental Assessment', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(2), 812–820, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2158778>.
- [5] K. Wróbel, P. Serkies, and K. Szabat, 'Model Predictive Base Direct Speed Control of Induction Motor Drive—Continuous and Finite Set Approaches', *Energies*, 13(5), 1193, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13051193>.
- [6] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra, and A. Tani, 'FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control', *IEEE Trans. Power Electron.*, 17(5), 779–787, 2002. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2002.802183>.
- [7] F. Korkmaz, I. Topaloglu, H. Mamur, M. Ari, and I. Tarimer, 'Reduction of torque ripple in induction motor by artificial neural multinetworks', *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 24, 3492–3502, 2016. <https://doi.org/10.3906/elk-1406-54>.
- [8] E. Zerdali and R. Demir, 'Speed-sensorless predictive torque controlled induction motor drive with feed-forward control of load torque for electric vehicle applications', *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 29, 223–240, 2021. <https://doi.org/10.3906/elk-2005-75>.
- [9] K. V Praveen Kumar and T. V. Kumar, 'Enhanced direct torque control and predictive torque control strategies of an open-End winding induction motor drive to eliminate common-mode voltage and weighting factors', *IET Power Electron.*, 12(8), 1986–1997, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5599>.
- [10] S. R. Eftekhari, S. A. Davari, P. Naderi, C. Garcia, and J. Rodriguez, 'Robust Loss Minimization for Predictive Direct Torque and Flux Control of an Induction Motor With Electrical Circuit Model', *IEEE Trans. Power Electron.*, 35(5), 5417–5426, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2944190>.
- [11] P. R. U. Guazzelli, W. C. de Andrade Pereira, C. M. R. de Oliveira, A. G. de Castro, and M. L. de Aguiar, 'Weighting Factors Optimization of Predictive Torque Control of Induction Motor by Multiobjective Genetic Algorithm', *IEEE Trans. Power Electron.*, 34(7), 6628–6638, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2834304>.
- [12] F. Wang, H. Xie, Q. Chen, S. A. Davari, J. Rodriguez, and R. Kennel, 'Parallel Predictive Torque Control for Induction Machines Without Weighting Factors', *IEEE Trans. Power Electron.*, 35(2), 1779–1788, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2922312>.
- [13] J. Wang, F. Wang, Z. Zhang, S. Li, and J. Rodriguez, 'Design and Implementation of Disturbance Compensation-Based Enhanced Robust Finite Control Set Predictive Torque Control for Induction Motor Systems', *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 13(5), 2645–2656, 2017. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2679283>.
- [14] S. A. Bednarz and M. Dybkowski, 'Estimation of the Induction Motor Stator and Rotor Resistance Using Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System Estimator', *Appl. Sci.*, 9(23), 5145, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9235145>.
- [15] I. Vicente, A. Endeman, X. Garin, and M. Brown, 'Comparative study of stabilising methods for adaptive speed sensorless full-order observers with stator resistance estimation', *IET Control Theory Appl.*, 4(6), 993–1004, 2010. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2008.0506>.
- [16] Y. Zhang, Z. Yin, Y. Zhang, J. Liu, and X. Tong, 'A Novel Sliding Mode Observer With Optimized Constant Rate Reaching Law for Sensorless Control of Induction Motor', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67(7), 5867–5878, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2942577>.
- [17] R. Yildiz, M. Barut, and E. Zerdali, 'A Comprehensive Comparison of Extended and Unscented Kalman Filters for Speed-Sensorless Control Applications of Induction Motors', *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 16(10), 6423–6432, 2020. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2964876>.
- [18] C. Schauder, 'Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers', *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 28(5), 1054–1061, 1992. <https://doi.org/10.1109/28.158829>.
- [19] V. Vasic, S. N. Vukosavic, and E. Levi, 'A stator resistance estimation scheme for speed sensorless rotor

- flux oriented induction motor drives', *IEEE Trans. Energy Convers.*, 18(4), 476–483, 2003. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.816595>.
- [20] M. N. Gayathri, S. Himavathi, and R. Sankaran, Performance enhancement of vector controlled drive with rotor flux based MRAS rotor resistance estimator. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI -2012), pp. 1–6, Coimbatore, India, 2012.
- [21] F. L. Mapelli, D. Tarsitano, and F. Cheli, 'MRAS rotor resistance estimators for EV vector controlled induction motor traction drive: Analysis and experimental results', *Electr. Power Syst. Res.*, 146, 298–307, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.005>.
- [22] R. Demir and M. Barut, 'Novel hybrid estimator based on model reference adaptive system and extended Kalman filter for speed-sensorless induction motor control', *Trans. Inst. Meas. Control*, 40(13), 3884–3898, 2018. <https://doi.org/10.1177/0142331217734631>.
- [23] A. V. R. Teja, C. Chakraborty, S. Maiti, and Y. Hori, 'A New Model Reference Adaptive Controller for Four Quadrant Vector Controlled Induction Motor Drives', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(10), 3757–3767, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2164769>.
- [24] S. Basak, A. V. Ravi Teja, C. Chakraborty, and Y. Hori, A new model reference adaptive formulation to estimate stator resistance in field oriented induction motor drive. *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*, pp. 8470–8475, Vienna, Austria, 2013.
- [25] T. Orłowska-Kowalska and M. Dybkowski, 'Stator-Current-Based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction-Motor Drive', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57(4), 1296–1308, 2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2031134>.
- [26] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan, 'Speed-Sensorless Estimation for Induction Motors Using Extended Kalman Filters', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 54(1), 272–280, 2007. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.885123>.
- [27] S. Haykin, Adaptive filter theory (3rd ed.). Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1996.
- [28] R. Yıldız, R. Demir, and M. Barut, Speed-sensorless predictive torque control of IM based on the adaptive fading extended Kalman filter. IV. International Turkic World Congress on Science and Engineering, pp. 82–93. Niğde, Turkey, 2022.
- [29] M. Habibullah, D. D. C. Lu, D. Xiao, J. E. Fletcher, and M. F. Rahman, 'Predictive Torque Control of Induction Motor Sensorless Drive Fed by a 3L-NPC Inverter', *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 13(1), 60–70, 2017. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2603922>.





Süt ve süt ürünleri için depo seçimi Selection of suitable warehouse for milk and dairy products

Sena Nur Kaplan¹ , Ülkü Can Üner² , Tuğba Danışan³ , Tamer Eren^{4,*} 

^{1,2,3,4} Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 71400, Kırıkkale, Türkiye

Öz

Gıda tüketiminde sağlıklı ve güvenilir ürünler artık daha çok tercih edilmektedir. Gıdaların bozulmadan tüketilebilmesi için birçok saklama koşulu bulunmaktadır. Özellikle bozulabilir gıdalarda bu koşullar daha da önemlidir. Soğuk zincir uygulamaları bozulabilir gıdalar için öne çıkan uygulamalardır. Soğuk zincirle birlikte gıdaların kalitesi ve güvenliği koruma altına alınmaktadır. Bozulabilir her gıdada olduğu gibi, süt ve süt ürünlerinin de saklanma koşulları vardır. Örneğin, pastörize süt +8°C’de, tereyağı ve peynir +10°C’de saklanmalıdır. Bu nedenle üreticiler depo seçimi yaparken ürünlerinin özelliklerini dikkate almalıdır. Ürünler bu koşullara uygun depolardan muhafaza edilmelidir. Bu çalışmada bozulabilir gıdalardan olan süt ve süt ürünlerinin depolanması için depo seçimi yapılmıştır. Ürünlerin bozulmadan müşteriye ulaşması için depolarda olması gereken kriterler belirlenmiştir. Ürün saklama koşulları, güvenlik, katma değerli hizmetler, taşıma hizmetleri ve depo özellikleri olmak üzere beş kriter, Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Alternatifler Technique for Order Preference by Similarity to An Ideal Solution (TOPSIS) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda Konya ilindeki deponun seçilmesinin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bozulabilir gıdalar, Depo seçimi, Süt ürünleri, Çok kriterli karar verme

1. Giriş

Tedarik zinciri yönetimi, müşteriye en iyi ve en kaliteli ürünü sunmak için birbiri ile uyumlu olan sistemlerin ortak çalışması sonucu ortaya çıkmıştır. Tedarik zinciri yönetimi, malzemelerin elde edilmesinden ürün oluşumuna kadar geçen süreçleri ve ürünün müşteriye ulaşmasında rol alan tüm fonksiyonları içeren bir süreçtir. Ayrıca tedarik zinciri yönetimi denildiğinde ürünlerin istenilen yerde, istenilen miktarlarda, istenilen zamanda elde bulundurulması akla gelmektedir. Bunların yanı sıra verimliliği artırıp maliyeti düşürerek ürünleri en az maliyetle elde tutmak da tedarik zinciri yönetimi kapsamına girmektedir [1]. Bunlarla birlikte işletmenin tedarik zincirinde yaptığı bir iyileştirme, o işletme için müşteri memnuniyetini artıracak ve aynı zamanda maliyetlerinin de düşmesine katkı sağlayacaktır. Tüm bu olumlu sonuçların etkisinin pazar payına yansımada da

Abstract

Healthy and reliable products are now more preferred in food consumption. There are many storage conditions for foods to be consumed without spoiling. These conditions are especially important for perishable foods. Cold chain applications are prominent applications for perishable foods. With the cold chain, the quality and safety of food is protected. As with any perishable food, milk and dairy products also have storage conditions. For example, pasteurized milk should be stored at +8°C and butter and cheese at +10°C. For this reason, manufacturers should consider the characteristics of their products when choosing a warehouse. Products should be stored in warehouses that comply with these conditions. In this study, warehouse selection was made for the storage of milk and dairy products, which are perishable foods. In order for the products to reach the customer without spoiling, the criteria that must be in the warehouses have been determined. Five criteria, namely product storage conditions, safety, value-added services, transportation services and warehouse features, were weighted with the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. Alternatives were evaluated using the Technique for Order Preference by Similarity to An Ideal Solution (TOPSIS) method. As a result of the study, it was concluded that the selection of the warehouse in Konya was appropriate.

Keywords: Perishable foods, Warehouse selection, Dairy products, Multi-criteria decision making

beklenen bir sonuç olmaktadır. Bu alanda yapılan iyileştirmelerin finansal alanda da olumlu gelişmeleri sağlayacağı bilinmektedir [2]. Tedarik zinciri yönetiminin içerisinde yer alan bir başka konu ise “Soğuk Zincir Yönetimi” dir. İnsan sağlığı ve gıdaların korunması adına soğuk zincir yapısı kırılmadan süreç tamamlanmalıdır. Soğuk zincir yapısının; taşıma, depolama, paketlenme, izleme, perakendeci ve tüketiciden oluştuğu söylenebilir. Tedarik zinciri kapsamında yer alan soğuk zincir yönetiminde yaşanan problemlerden birisi depolama sorunlarıdır. Ürünler, içerdikleri özellikler doğrultusunda farklı depolarda saklanmak zorundadır. Bu farklılığın sağlanması için ise ürünlerin farklı kategorilere ayrılması ilk adımı oluşturmaktadır. İşletmelerin ürünleri sınıflandırmadan seçtikleri depo, her ürün için doğru bir tercih olmaktan çıkmaktadır. Soğuk zincirin kırılmaması

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: tamereren@gmail.com (T. Eren)

Geliş / Received: 14.04.2022 Kabul / Accepted: 21.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1103493

adına depolarda düzenli olarak sıcaklık kontrolü ve ürünlerin iç sıcaklık kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Depo sıcaklığının sabit tutulması aynı zamanda bazı ürünlerin aroma kaybı yaşamasını da önlemektedir [3]. Soğuk zincirin kırılması gıda güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Aynı zamanda da Bacillus Cereus sporları çoğalarak gıda zehirlenmelerine sebep olmaktadır [4]. Gıdaların istenilen sıcaklık sınırında tutulmaması, besin kaynaklı hastalıkların oluşumuna neden olacağı için sıcaklık kontrolü oldukça önemlidir. Bu nedenle dayanıklılığı kısa olan gıda ürünlerinin depolanmasına dikkat edilmelidir. Soğuk zincir yönetiminde depolamanın önemi artmıştır. Son yıllarda depo yatırımları özellikle tarımsal üretimin yoğun olduğu bölgelerde gerçekleşmektedir ve soğuk zincir yönetiminde ısı kontrollü depolama hizmetlerinin sektörde önem arz ettiği fark edilmiştir [5].

Bozulabilir gıdaların tazeliğinin bozulmadan müşteriye ulaşması için ürün taşımacılığının uygun ve etkin yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda da ürünlerin sağlıklı korunması amacıyla depo yer seçimlerinin doğru yapılması önem arz etmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde depo için gerekli olan genel kriterlerin dikkate alındığı görülmüştür. Ayrıca seçilen deponun ürün saklama koşullarını sağlayıp sağlamadığı dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada ise bozulabilir gıdalarda ürün saklama koşulları incelenip, buna uygun ana kriterler ve alt kriterler belirlenmiştir. Bu kriterlere uygun depo seçimi yapılmıştır.

2. Literatür

Literatürde tedarik zinciri yönetimi kapsamında birçok konu ele alınmaktadır. Tedarikçiler istenilen hammadde ve malzemeleri uygun maliyetle temin etmek durumundadırlar. Bu nedenle tedarik zinciri yönetimi işletmeler için oldukça önemlidir [6].

Çabuk bozulabilir ürünlerin dağıtım noktalarına ve tüketiciye ulaşmasında soğuk tedarik zinciri yönetimi rol almaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda soğuk tedarik zinciri yönetiminde ve yeşil tedarik zinciri yönetiminde sıklıkla karşılaşılan benzer problemler görülmektedir. Yeşil tedarik zinciri yönetiminin önemine dikkat çekmek ve bu kavramın daha başarılı bir şekilde ele alınması için araştırmalar yapılmıştır [7]. Bu kapsamda ele alınan bir konu sürdürülebilirliktir. Doğaya zararlı olan faktörlerin zarar seviyesini minimuma indirmek istenilen bir sonuçtur. Bu amaca yönelik Balıbaş [8] yaptığı çalışmada, bir katı atık geri dönüşüm tesisi seçerek doğada yer alan problemlerin çözümünü ele almıştır. Çözüm aşamasında ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemlerinden yararlanmıştır. Yöntemler içerisinde AHP ve Bulanık TOPSIS çözüme ulaşmada başvurulan yöntemlerden olmuştur. Tedarik zincirinde gıdaların üretimden müşteriye ulaşana kadar güvenliğinin ve kalitesinin korunması önemli bir husustur. Bilgi teknolojileri içerisinde güvenliğin ve kalitenin izlenebilirliği büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda Keleş ve Ova [9] bilgi teknolojilerinden RFID, ERP, LOT kullanarak ürünlere ait bazı kriterlerin (sıcaklık, nem, oksijen vs.) takibe alınmasına dair araştırmalar yapmışlardır.

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde depolarla ilgili seçim problemlerinin sıklıkla ele alındığı

gözlemlenmiştir. Demirci ve Arıkan [10] yaptıkları çalışmada depo problemlerinden birisi olan en iyi ilaç deposu yerleşke probleminde ÇKKV yöntemine başvurarak çözüme ulaşmışlardır. On kriteri üç uzman görüşü ile değerlendirip SWARA yöntemini kullanmışlardır. On farklı alternatif yerleşke yerini, MOORA ve OCRA ile değerlendirmişlerdir. Kabadayı ve Esen [11] firmalar için önem arz eden depo yer seçimini, Gri Temelli TOPSIS yöntemi ile beş ana kriter ve yirmi alt kriter belirleyerek yapmışlardır.

Depo yer seçim problemleri sektör bazlı incelendiğinde Tırmıkçioğlu [12] tekstil sektöründeki çalışmasında firmanın karını maksimize edecek depo seçimi yapmıştır. Sezgisel bulanık, WASPAS yöntemi ile beş alternatiften en uygun alternatifin Bayrampaşa olduğunu tespit etmiştir. Çizmecioğlu [13] ise bir işletmede en uygun tedarikçiyi seçme probleminde AHP ve TOPSIS yönteminden yararlanmıştır. Ulaşılan sonuçları birbirleri ile karşılaştırıp, duyarlılık analizleri yapmıştır. Tedarikçi seçiminde Supçiller ve Deligöz [14] en iyi tedarikçi seçimini yapabilmek için birden fazla yöntem kullanmışlardır. En uygun tedarikçiyi seçmişlerdir.

ÇKKV yönteminin kullanıldığı bir diğer alan ise gıda sektörüdür. Her alanda olduğu gibi gıda sektöründe de rekabet ortamının beraberinde getirdiklerine karşılık finansal değerlendirmelerin önemi her geçen gün artmaktadır. Bu gelişmeler sonucunda Maya ve Eren [15] çalışmalarında, finansal değerlendirmelerin yapılması için ÇKKV yöntemlerine başvurmuşlardır. Bu sayede birden çok kriter değerlendirip istenilen sonucu elde etmişlerdir. Meyve ve sebzeler özelinde Çullu [16] yaptığı çalışmada ürünlerin soğuk hava depolarında nasıl korunduğuna dair bilgiler vermiştir. Soğuk hava depolarının yer seçiminde olması gereken kriterleri ağırlıklandırmıştır. Aydın ili Efeler ilçesinde depo kurulmasının uygun olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Gıda sektöründe yapılan bir diğer çalışmada Özkan [17], gıdaların bozulmadan firmalara ulaşımının sağlanmasında taşımacılığın etkisini incelemiştir. Taşımacılık alanında meydana gelen sorunlar çözüme kavuşursa gıdaların müşteriye ulaşmaya kadar ki güvenliği rahatlıkla sağlanacaktır. Bu nedenle AHP yönteminden yararlanarak taşıma sürecine etki eden faktörleri sıralamıştır. Taşımacılık işini yapan firmaların hangi özellikleri barındırmaları gerektiğini saptayarak, yöneticilere karar alırken ışık tutacak fikirler vermiştir.

Tedarik zinciri yönetiminde bozulabilir ürünler konusunda birçok çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Buna yönelik Doğan vd. [18] yaptıkları çalışmada raf ömrü kısa olan ürünlerin tedarik zincirindeki stok yönetimini simülasyon modellemesi yaparak incelemişlerdir.

Literatürde depolarla ilgili seçim problemlerinin yanı sıra bozulabilir gıdaların taşınmasına yönelik, soğuk lojistik uygulamalarının artırılması amacıyla Şen [19], frigorifik araçların seçim problemini ele almıştır. Soğuk zincirin sağlanması için soğutma cihazları uygun nitelikte olmalı, distribütörlük yapan firmalar uygun alt yapı ve bilgiye sahip olmalıdır. Bozulabilir ürünlerin takibinde yer alan RFID etiketinin önemine de bu çalışmada değinmiştir. Ayrıca

SWOT analizini de uygulamıştır. AHP yöntemini kullanarak çözüme ulaşılan Güney [20] yaptığı taşıyıcı seçme probleminde taşıma ve depolama maliyeti, zamanında dağıtım performansı, müşteri hizmetleri ve güvenilirlik, işletmenin itibarı, tecrübe, soğuk zincir işlemlerinin yeniliği ve etkinliği, izleme ve takip için bilgi teknolojileri uygulamaları, finansal durum, ağ yönetimi ve empati olarak dokuz kriter belirleyerek çözüme gitmiştir. Benzer şekilde Korucuk [21] soğuk zincir taşımacılığı yapan işletmelerde 3PL firma seçimini AHP ve GIA tekniklerini kullanarak yapmıştır. Tedarik zincirinde gıdaların bekleme zamanlarının kısaltılmasına yönelik Akşahin [22] yaptığı çalışmada gıdaların üretiminin tamamlanıncaya kadar ki tüm aşamalarında oluşan zaman kayıplarını ortadan kaldırmak amacıyla elektronik ortamdan faydalanma fikri üzerinde çalışmıştır. Bu sayede gıdaların zarar görmeden ve daha hızlı bir şekilde müşteriye ulaşmasını sağlamıştır. Literatürde bozulabilir gıdalardan olan özellikle süt ve süt ürünleri için de çalışmalar yapılmıştır. Gülsün ve Şahin [23] peynir altı suyu üretimi için gerekli olan tesis yeri seçimine ÇKKV yöntemlerini kullanarak karar vermişlerdir. Trakya bölgesinde uygun tesis yer seçimi yapmışlardır. Sekiz kriter kullanarak üç alternatiften en uygununa karar vermişlerdir. Akçok ve Gökçe [24] yaptıkları çalışmada sütlerden numune alıp analiz ederek sütün kalitesi için gerekli olan kriterleri ÇKKV yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Öncelikle AHP, VIKOR ve VIKORSORT yöntemleri ile süt sınıflandırılması yapmışlardır. Sonucunda ise sütlerin kalite sıralamasını en iyiden en kötüye olacak şekilde sıralamışlardır. Akan vd. [25] yaptıkları çalışmada sütlerin bozulmasına yol açan psikrotrof bakteriler ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Bu bakterilerin süt ve süt ürünlerinin depolama sürelerini kısalttığı bilgilerine dayanarak düzenli kontrollerinin yapılmasına ve kaliteli çiğ süt üretiminin gerekliliklerine dikkat çekmişlerdir. Bozulabilir gıdalar içerisinde yer alan sütün, bozulmasına sebep olan bakterilerin incelendiği bir diğer çalışma da ise Başar ve Heparan [26], çiğ sütte sık bulunan bakterileri tespit ederek bu bakterilerin özelliklerini ve sütün bozulmasında yer alan rollerini araştırmışlardır.

Gıdalar için soğuk zincir lojistiği kapsamında yapılan bir diğer çalışmada Sarısoy [27], gıdalar içerisinde yer alan mikroorganizmaların artış hızlarına sebep olan faktörlerin gıda güvenliği açısından etkilerine vurgu yaparak, soğuk zincir lojistiğinin önemine dikkat çekmiştir. Çalışma ile gıdalarda oluşan kayıpların ekonomik açıdan ortaya çıkardığı durumlara da değinmiştir.

Aksoy [28] ise yaptığı çalışmada her gıdanın kendine özgü bir PH değeri olduğuna ve PH değerinde sapma olduğunda üründe bir sorun olacağına değinmiştir. Bu çalışmayla gıdalarda PH ölçümünün önemine dikkat çekmiştir.

Akar [29] çalışmasında, bir süt işleme tesisinde gıda güvenliğini artırmak amacıyla bulanık yaklaşım ve bulanık AHP yöntemlerini kullanarak riskleri belirlemiştir. Maliyet için ise karışık tam sayılı programlama yöntemini kullanarak amaç fonksiyonunu minimize edecek bir model kurmuştur. Şeker ve Korkmaz [30], Kahraman Maraş ilinde soğuk zincir taşıyıcı seçiminde dondurma üreticilerinin kullandıkları kriterleri belirlemiştir. Uzman görüşlerinden

faydalanarak AHP yöntemi ile kriterleri ağırlıklandırmışlardır. Taşıyıcı seçiminde olması gereken kriterleri önem sırasına göre sıralamışlardır.

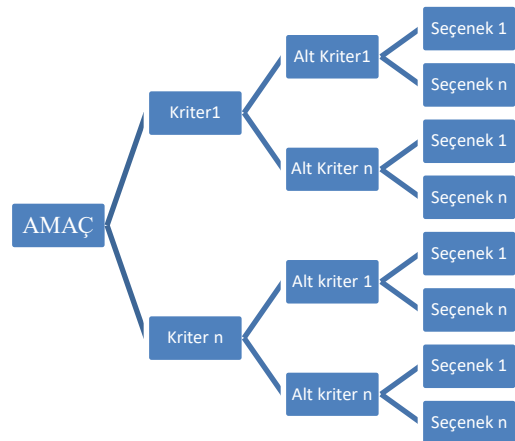
Bozulabilir gıdalar içerisinde yer alan süt ve süt ürünlerinin depolanma kriterleri soğuk lojistik zinciri açısından literatürde değerlendirilmemiştir. Bu çalışmada belirlenen ana kriterler ve alt kriterler literatürde yer verilen çalışmalardan seçilmiştir. Örneğin; İpekçi ve Tanyaş [5] yaptıkları çalışmada ürünlerin yalnızca taşınma sırasında değil, depolanmalarında ve perakende noktalarında sergilenenlerinde de sıcaklıklarının önemli olduğuna değinmişlerdir. Bu bilgiye dayanarak çalışmada yer alan ana kriterlere 'Uygun Sıcaklık' kriteri eklenmiştir. Keleş ve Ova [9] yaptıkları çalışmada gıda tedarik zincirlerinde etkin bir yönetim için bilgi teknolojilerinin kullanımının izlenebilirliğe olanak verdiğine, izlenebilirliğinde gıda kalitesi ve güvenliğini arttırdığına değinmişlerdir. Bu bilgilere dayanarak izlenebilirlik alt kriter olarak belirlenmiştir. Bu ana kriter ve alt kriterler bir depoda süt ve süt ürünlerinin saklanması gereken kriterleri gösterdiği için önemlidir. Önem arz eden kriterlerle uygun deponun seçilmesi literatürdeki diğer çalışmalara göre farklılık kazandırmakla birlikte bu sektöre ışık tutacağı ön görülmektedir.

3. Kullanılan yöntemler

Süt ve süt ürünlerinde uygun depo seçimi ve depolama kriterlerinin kararının verilmesinde ÇKKV yöntemlerinden olan AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

3.1 AHP yöntemi

1977 yılında Saaty [31] tarafından ortaya atılan ÇKKV yöntemlerinden biridir. Karar vericinin öncelikleri belirlemesine yardımcı olmaktadır [32]. AHP' de ilk olarak ele alınan problem hiyerarşik yapıya dönüştürülür. Problemin amacı, kriterleri, varsa alt kriterleri belirlenir. Son olarak da alternatifler belirlenir. AHP' de dört seviyeli hiyerarşik yapı Şekil 1' de gösterilmiştir.

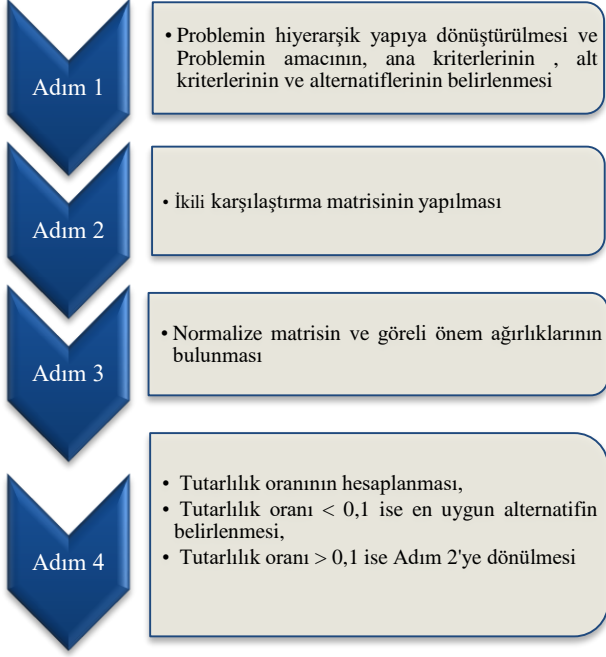


Şekil 1. Dört seviyeli hiyerarşik yapı

İkili karşılaştırma matrisi ile karşılaştırılan kriterlerden hangisi diğerine göre önemli ise puanlama yapılır. Puanlama işlemi sonrasında göreceli önem değerlerini belirlemek için

normalize edilmiş matris yapılıdır. Tutarlılık oranı hesaplandıktan sonra oran eğer 0,1'den küçükse yapılan işlemler kabul edilir.

AHP adımları Şekil 2'de akış şemasında gösterilmiştir. İkili karşılaştırma matrisi yapılırken temel ölçek tablosundan yararlanılır. Tablo 1'de temel ölçek tablosu gösterilmiştir. Tablo 2'de RI değerleri verilmiştir.



Şekil 2. AHP Yöntemi akış şeması

Tablo 1. Temel ölçek tablosu [33]

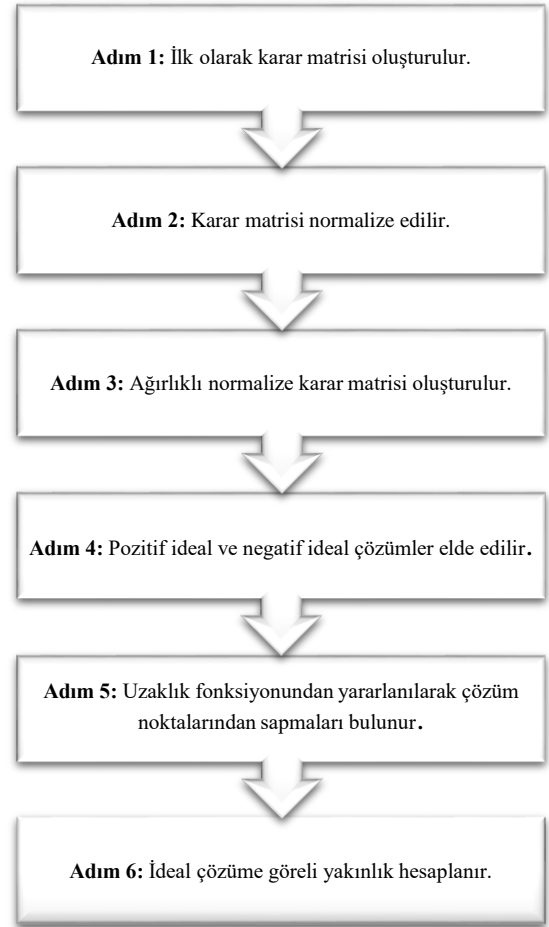
Sayısal değer	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	Her iki faktörde aynı öneme sahiptir.
3	Orta derecede önemli	Bir faktör değerine göre biraz daha önemlidir.
5	Önemli	Bir faktör değerine göre kuvvetle daha önemlidir.
7	Çok önemli	Bir faktör değerine göre yüksek derecede kuvvetle daha önemlidir.
9	Aşırı derecede önemli	Bir faktör değerine göre çok yüksek derecede önemlidir.
2,4,6,8		Yukarıda yer alan iki ardışık yargı arasında düşen orta değerdir.

Tablo 2. RI değerleri [33]

Boyut (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rassal tutarlık indeksi(RI)	0	0	0.58	0.90	1.12	1.25	1.32	1.41	1.45	1.49

3.2 TOPSIS yöntemi

1981 yılında Hwang ve Yoon [34] tarafından geliştirilen TOPSIS yöntemi, birçok problemin çözümünde kullanılmıştır [35]. ÇKKV yöntemlerinden birisi olan bu yöntemde pozitif ideal ve negatif ideal çözümler elde edilerek, bu çözüm noktalarına en yakın mesafede olan alternatifin bulunması hedeflenmektedir. Her bir alternatifin ideal ve negatif ideal çözüm noktalarından sapmalarını bulabilmek için "Euclidion Uzaklık Fonksiyonu" ndan yararlanılır [36,37]. Şekil 3'te TOPSIS Yöntemi akış şemasına yer verilmiştir.



Şekil 3. TOPSIS yöntemi akış şeması [37]

4. Uygulama

Bu çalışmada bozulabilir gıdalar içerisinde yer alan süt ve süt ürünlerinin depolama kriterleri belirlenmiş ve buna uygun depo seçimi için bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Literatürde tesis [39], taşıma türü [40], giyilebilir teknoloji [36,38,41,42] ve ekip seçimi [43] gibi birçok alanda kullanılan ÇKKV yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

Günümüzde birçok firma bozulabilir gıdalar içerisinde yer alan süt ve süt ürünlerini depolamaktadır. Bunun için birçok faktörü değerlendirip kendilerine en uygun depoyu

seçmektedirler. Yapılan bu çalışma ile depo seçimi yaparken öncelikle ana kriterler belirlenmiştir. Ana kriterlerin belirlenme aşamasında literatür taraması yapılarak süt ve süt ürünlerinin bozulmasına etki eden faktörler seçilmiştir. Bu faktörlerin yanında süt ve süt ürünleri depolayan firmaların sahip olduğu özellikler de dikkate alınarak depo seçiminde göz önüne alınması gereken ana kriterler oluşturulmuştur. Ana kriterlerle ilgili araştırmalar yapılarak alt kriterler belirlenmiştir. Bu ana kriterler ve ana kriterlere uygun alt kriterler Tablo 3'te gösterilmiştir. Ana kriterler ve alt kriterlerin açıklamaları Tablo 4 ve Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Süt ve süt ürünlerinde depo seçimi ve depolama kriterleri

<i>Ana Kriterler</i>	<i>Alt Kriterler</i>
Ürün saklama koşulları(A1)	Uygun sıcaklık (A1.1)
	Donma sıcaklığı (A1.2)
	Nem oranı (A1.3)
	Enzim (A1.4)
	Ürün tazeliği (A1.5)
	Yüksek basınç (A1.6)
Güvenlik(A2)	7.24 Kamera (A2.1)
	Yangın Kontrolü (A2.2)
	Ürün Giriş /Çıkış Kontrolü (A2.3)
Katma Değerli hizmetler(A3)	Kalite Kontrol (A3.1)
	Barkodlama (A3.2)
	Etiketleme (A3.3)
	Çapraz sevkiyat (A3.4)
	Paketleme (A3.5)
	Antrepo (A3.6)
	Uluslararası taşıma (A3.7)
Depo özellikleri(A4)	Alt yapı imkanları (A4.1)
	İzlenebilirlik (A4.2)
	Geçerli ölçüm cihazları (A4.3)
	Palet rafı sistemi (A4.4)
	İlk giren ilk çıkar (FIFO) (A4.5)
	Dedike alan kullanımı (A4.6)
	Raflar ve paletlerde dezenfekteye uygunluk (A4.7)
Taşıma Hizmetleri(A5)	Taşıma aracının mali durumu (A5.1)
	İyi ulaştırma arterlerine karayollarına uzaklığı (A5.2)
	Uygun araçların bulunabilirliği (A5.3)

Tablo 4. Ana kriterler ve açıklamalar

<i>Ana Kriterler</i>	<i>Açıklamalar</i>
Ürün Saklama Koşulları	Bozulabilir ürünlerin son tüketiciye ulaşana kadar tazeliğinin devamlılığının sağlanması adına yapılan muhafaza yöntemleridir.
Güvenlik	Ürünlerin depolarda saklanırken olası problemlere karşı koruma altına alınmasıdır.
Katma Değerli Hizmetler	Depo seçimi yapılırken depodan beklenen özelliklerin gerekli ve yeterli ölçüde olması istenmektedir. Bu nedenle ürüne sunulan hizmetlerin yanında olması gereken ek hizmetlerdir.
Depo Özellikleri	Soğuk zincir yönetiminde ürünlerin tazeliğinin korunması ve daha sağlıklı muhafaza edilmesi için deponun sahip olması gereken nitelikleridir.
Taşıma Hizmetleri	Seçilecek olan depodan ürünlerin taşınmasında, taşıma araçları ve ulaşım imkânları önem arz etmektedir.

Tablo 5. Alt kriterler ve açıklamaları

<i>Alt kriter</i>	<i>Açıklama</i>
Uygun Araçların Bulunabilirliği	Taşınacak olan ürünler bozulabilir olduğundan dolayı araçların ürünlere uygun olup olmadığı da dikkat edilmesi gereken hususlar arasındadır.
Uygun Sıcaklık	Her gıda da olduğu gibi süt ve süt ürünlerinde de uygun sıcaklık oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle bu ürünler için uygun sıcaklığın 4 °C (±2) olması, uygun depolama şartının yerine getirildiğinin göstergesidir.
Donma Sıcaklığı	Süt ve süt ürünlerinin dondurularak saklanması doğru bir yöntem olmadığı bilinmektedir. Örneğin bir tereyağı için soğuk hava deposunun sıcaklığı -12°C den düşük olmalıdır.
Nem oranı	Gıda tiplerine göre nem oranları farklılık göstermektedir. Süt ve süt ürünleri soğuk ürün ana grubunda yer almakla birlikte nem oranı için %60 sınırı belirlenmiştir.
Enzim	Süt ve süt ürünleri içerisinde yer alan vitaminler, enzimlerin yapısına koenzim olarak bağlanabilmektedir. Bu nedenle süt ve süt ürünlerinin bozulmadan saklanması, buna bağlı olarak da enzimlere bağlanan vitaminlerin yapısının bozulmaması için enzimlerin uygun sıcaklıkta çalışması gerekmektedir.
Ürün Tazeliği	Ürünleri depoların tazeliğine dikkat etmek önemli bir aşamadır. Depolanacak süt ve ürünün UHT Süt, Pastörize Süt, Çiğ Süt, kısa süre depolanmış ürün veya uzun süre depolanmış ürün olması göz önüne alınması gereken faktörlerdendir.
Yüksek Basınç	Süt ve süt ürünleri üzerinde yüksek basınç birçok olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. Bu basınç etkisinin ürünlerin aroma, renk, besin değeri gibi bileşenlerine farklı katkıların olduğu belirlenmiştir.
7/24 Kamera	Ürünlerin depodaki güvenliği için kamera sisteminin aktif bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir.
Yangın Kontrolü	Seçilecek depoda olası acil durumlara erken müdahale edebilmek adına yangın kontrolü hizmetinin aktif olması dikkat edilen önemli kriterler arasında yer almaktadır.
Ürün Giriş/Çıkış Kontrolü	Ürünlerin depoya giriş/çıkış kontrolleri doğru ve düzenli yapılmalıdır. Kapıda gerçekleşen bu işlem anında ürün bilgileri kaydedilmektedir. Bu sayede herhangi bir ürün özelliğine, bilgisayarda yer alan doğru bilgiler ile hızlı ve kolay erişim sağlanmaktadır.
Kalite kontrol	Ürünlerin müşteriye ulaşmadan önce depodaki durumlarının belirli aralıklarla kontrol edilmesi önem arz etmektedir.
Barkodlama & Etiketleme	Ürünün depoya girişinden depodan çıkışına kadar her bir ürün grubuna veya her bir ürüne tanınması gereken bazı özellikler olması gerekmektedir. Bu özelliğin ürüne özgü basılacak etiket veya barkod ile yapılması mümkündür. Buda ürünün depoda sürekli izlenebilirliğini ve kontrol edilmesini sağlar. Etiketleme özel depo koşullarını da içermelidir.
Çapraz sevkیات	Depolarda ürüne yapılması gereken gerekli işlem varsa yapılarak ilgili yere gönderilir. Bu sayede ürün üretim, depo, ilgili işlem yapılması için gidilecek yer ve son tüketici gibi bir yol izleyeceğine üretim, depo, son tüketici gibi bir yol izler.
Paketleme	Ürünlerin dağıtımına çıkarken paketlemeye ihtiyacı olabilir. İşlemin depoda yapılması depo seçimi konusunda ayırt edecek bir kriterdir.
Antrepo	Gümrükleri ödenmemiş malların korunduğu, gümrüklere yakın olan bir depo türüdür.
Uluslararası taşıma	İşletme ürününü yurt dışına transferini sağlayacaksa seçtiği “depo yurt dışına transfer yapıyor mu?” sorusunun cevabını alması gerekmektedir. İşletme için maliyetin minimum olması gerektiği için ekstra bir transfer ücreti ödmeden ürününü göndermesi gerekmektedir.
Alt yapı imkanları	Depolar uygun alt yapı imkanlarına sahip olması gerekmektedir. Sistemin sürekli çevrimiçi ve kontrol edilebilir olması gerekmektedir. Aynı zamanda ürünlerin istenen saklanma koşullarında saklanması için sıcaklığın sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir. Eğer uygun bir alt yapı olmazsa istenilen bu özellikler sektöre uğrar.
İzlenebilirlik	Ürünlerin izlenebilirliği için günümüzde teknolojik gelişmeler etkin olarak kullanılması gerekmektedir. RFID, Pick-By-Light, Pick-By-Voice ile depoların yönetmek ve kontrol etmek daha kolaydır.
Onaylı ölçüm cihazı	İzlenebilirlik açısından ölçüm cihazlarının doğru ölçüm yapması gerekmektedir. Bu yüzden cihazların kalibrasyonu sürekli sağlanmalıdır. Onaylı ölçüm cihazı, cihazların kalibrasyon kontrolünün onaylı olması ve cihazın doğru ölçüm yapıyor olması demektir.
Palet rafı sistemi	Depoda saklanan ürünlerin duvardan 20 cm uzaklıkta ve alt raf yerden en az 20 cm yüksekte olmalıdır.
Sürekli sıcaklık kontrolü	Ürünlerin stabil olarak aynı koşullarda muhafazası önemlidir. Depolarda ürün için sürekli sıcaklık kontrolünün olması ürünün sürekli izlendiği anlamına gelmektedir.
İlk giren ilk çıkar (FIFO)	FIFO’ nun kelime anlamı yönlendiriciye gelen ilk paket iletilecek ilk pakettir demektir. Bu mantıkla bozulabilir ürünlerde son kullanma tarihi, ürünün kendine has saklanma koşulları gibi nedenlerle depoya ilk gelen ürün depodan ilk çıkan ürün olması gerekmektedir.
Dedike alan kullanımı	Depo seçiminde hem ofis ortamı için hem de depo ortamı özel bir alan olması demektir.
Raf ve paletlerde dezenfekteye uygunluk	Raf ve paletlerde saklanacak ürünlerin depolarda korunurken hijyenik olması için gerekli olan işlemlerin bütünüdür.
Taşıma aracının mali durumu	Seçilecek depo yerinde araçların kolay ve uygun maliyetle bulunması gerekmektedir.
İyi ulaştırma arterlerine ve karayollarına uzaklığı	Seçilecek deponun konumu, ürün taşımada zamana ve maliyetlere de yansımaktadır. Bu nedenle karayollarına uzaklığının bilinerek seçim yapılması gerekmektedir.

4.1. Alternatifler

Problemin çözüm aşamasına geçmeden önce alternatif depolar D1, D2, D3, D4 olarak isimlendirilmiştir. Konya D1, Erzurum D2, Adana D3, İzmir D4 olarak seçilmiştir. Depo seçimine karar verilirken sektördeki firmalar ve depolar incelenmiştir. Elde edilen tüm bilgiler ve değerlendirmeler doğrultusunda TÜİK [44] verilerinden hareketle büyükbaş-küçükbaş hayvan sayıları dikkate alınarak D1 olarak seçilmiştir. Yine TÜİK [44] verilerinden hareketle büyükbaş- küçükbaş hayvan sayılarının Erzurum'da fazla olması sebebiyle ve hammaddenin daha kolay ulaşılabilirliği düşüncesiyle D2 seçilmiştir. Ayrıca Gaziantep ve Karaman'da üretim tesisi olduğu için her iki bölgeye de yakın depo olarak D3 seçilmiştir. Süt ve süt ürünleri üretim yapan firmaların Ege Bölgesi'nde birçok depoları olması sebebiyle D4 belirlenmiştir.

4.2. Problemin çözümü

Depo seçimi problemi ile ilgili birçok veri toplanmıştır. En uygun depo seçimine karar verebilmek için elde edilen bu bilgiler AHP ve TOPSIS yöntemlerinde kullanılıp, problem çözüm aşamasına alınmıştır.

4.2.1. Problemin AHP yöntemi ile çözümü

Probleme ilişkin alt ve ana kriter ağırlıklarının hesaplanması için AHP yöntemi kullanılmıştır. Tablo 6'da AHP yönteminde ana kriterlere dair ikili karşılaştırma matrisine yer verilmiştir.

Tablo 6. AHP yönteminde ikili karşılaştırma matrisi

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	4	2	3	5
A2	0,25	1	0,50	2	3
A3	0,50	2	1	4	4
A4	0,33	0,50	0,25	1	3
A5	0,20	0,33	0,25	0,33	1

Ana kriterin ağırlıkları AHP yönteminde sırasıyla A1, A3, A2, A4 ve A5 olarak bulunmuştur. Tablo 7'de ana kriterlerin görelî önem değerleri gösterilmiştir. Tablo 8'de alt kriterlerin ağırlıkları gösterilmiştir.

Tablo 7. Görelî önem değerleri

Kriterler	Görelî önem değerleri
A1	0,41
A2	0,15
A3	0,27
A4	0,11
A5	0,06

Süt ve süt ürünlerinin depolarda bozulmadan saklanması için uygun sıcaklıklarda korunmaları gerekmektedir. Her ürünün kendine özgü donma sıcaklıkları da göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 8. Alt kriterlerin görelî önem değerleri

Ana kriter	Alt kriter	Önem değeri
Ürün saklama koşulları	Uygun sıcaklık	0,3722
	Donma sıcaklığı	0,2235
	Nem oranı	0,0842
	Enzim	0,0541
	Ürün tazeliği	0,2202
Güvenlik	Yüksek basınç	0,0458
	7/24 kamera	0,1200
	Yangın kontrolü	0,3200
Taşıma hizmetleri	Ürün giriş/çıkış kontrolü	0,5600
	Taşıma aracının mali durumu	0,5700
	İyi ulaştırma arterlerine ve karayollarına uzaklığı	0,3200
Katma değerli hizmetler	Araçların uygunluğu	0,1100
	Çapraz sevkiyat	0,2759
	Barkodlama	0,2190
	Etiketleme	0,1545
	Kalite kontrol	0,1312
Depo özellikleri	Paketleme	0,0958
	Antrepo	0,0662
	Uluslararası taşıma	0,0574
	Alt yapı imkanları	0,1611
	İzlenebilirlik	0,2236
Depo özellikleri	Geçerli ölçüm cihazları	0,1201
	Sürekli sıcaklık kontrolü	0,2868
	Palet rafı sistemi	0,0424
	İlk giren ilk çıkar sistemi (FIFO)	0,0786
	Dedike alan kullanımı	0,0454
	Raflar ve paletlerde dezenfekteye uygunluk	0,0420

Aynı zamanda depoların sahip olması gereken nem oranları da önem arz etmektedir. Başar ve Heperkan'ın [26] yaptıkları çalışmada da belirtildiği üzere sıcaklık arttıkça süt ve süt ürünlerinin bozulma hızları artmaktadır. Buna dayanarak her üründe yer alan enzimler farklılık göstermektedir. Ürün için uygun sıcaklık koşulu dikkate alınırken, aynı zamanda içerisinde yer alan enzimlerin de çalışma sıcaklıkları düşünülmelidir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda sıcaklık faktörü ele alınırken enzim faktörü de ayrıca ele alınmaktadır. Örneğin Akan vd. [25] yaptıkları çalışmada uygun koşullar sağlanmadığında ortaya çıkan bakterilerin süte etkisini ele alırken, bu bakterilerin oluşturabileceği enzimleri ve bu enzimlerin süt yapısına ne gibi yarar ve zarar oluşturabileceğini de ele almışlardır. Bu bilgilere dayanarak enzimin dikkate alınması önemlidir. Süt ve süt ürünlerinde enzimlerin (laktoperoksidaz, katalaz, lipoprotein lipaz vb) yapıları bozulduğu takdirde ürün tazeliği de bozulmuş olacaktır. Depolar bu saklama koşullarına dikkat ederek ürün tazeliğini koruyacaktır. Bu nedenle depolar için uygun saklama koşulları çok önemlidir.

Ayrıca katma değerli hizmetler ürünlerin güvenliğinin sağlandığı barkod ve güvenlik etiketlemesine, aynı zamanda ürünlerin dijital sistemlerden takip edilmesine imkân vermektedir. Katma değerli hizmetler ile müşteri memnuniyeti artmaktadır. Müşteri memnuniyetini arttıran bu özellikler her depoda olmayan ancak olunması ile artı bir avantaj sağlayan özelliklerdir. Antrepo kelime anlamı ile

eşyanın ihracat/ ithalatı sırasında gümrük işlemleri tamamlanana kadar koruma altına alınarak geçici depolarda korunmasını ifade etmektedir. Müşteri memnuniyetini arttırmak için katma değerli hizmetler olarak sunulmaktadır. Bu nedenle 'Antrepo' alt kriteri, katma değerli hizmetler arasına alınmıştır. Katma değerli hizmetler olarak sunulan bir diğer hizmet ise 'uluslararası taşımacılıktır'. Bu çalışmada alternatif depolar ulusal alandan seçilmiştir. Alternatif depolarda uluslararası taşımanın olması depolara artı bir özellik kazandırmaktadır. Bu nedenle 'Uluslararası taşımacılık' alt kriteri katma değerli hizmetler arasına alınmıştır.

4.2.2 Problemin TOPSIS yöntemi ile çözümü

AHP yöntemi ile bulunan ana kriter ağırlıkları üzerinden alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. İlk olarak 4x5 boyutunda karar matrisi 0-10 arası puan verilerek oluşturulmuştur. Tablo 9'da gösterilmiştir. TOPSIS adımlarının sonucu, ağırlığı en yüksek olan il Konya (D1) olarak birinci sırada yer almaktadır. Tablo 10'da Konya ilinin en uygun depo olduğu ve birinci sırada yer aldığı sunulmuştur.

Tablo 9. TOPSIS karar matrisi

	A1	A2	A3	A4	A5
D1	9	5	8	4	9
D2	7	4	5	8	3
D3	4	2	3	4	6
D4	6	5	8	5	10

Tablo 10. TOPSIS sonuçları

Alternatifler	Sonuç değerleri
D1	0.78596445
D2	0.77907243
D3	0.69714572
D4	0.76121160

TOPSIS sonucunda Konya ilinin bulunduğu coğrafi konum nedeniyle seçilecek olan deponun ürün saklama koşulları diğer illere göre daha iyidir. Örneğin Adana ili ile Konya kıyaslandığı zaman Adana'daki hava sıcaklığının yüksek olması nedeniyle depolarda iklimlendirme daha zor yapılmaktadır. Konya ili Erzurum iline göre ulaşım alt yapısı olarak daha uygundur.

Erzurum ilindeki depoda palet rafi sistemi sayesinde ürün giriş çıkışı, ürün alımı ve yerleşimi rahat yapılmaktadır. Aynı zamanda geçerli ölçüm cihazları sayesinde sürekli sıcaklık kontrolü sürdürülebilir bir haldedir. İzlenebilirliğin depoda olması sayesinde ürünlerin olması gereken sıcaklıkları takip edilmektedir. Ürünlerin son kullanma tarihlerine göre depodan ne zaman çıkmaları gerektiği izlenebilirlik sayesinde kontrol altına alınmaktadır. Ayrıca ilk giren ilk çıkar yöntemi depolarda önem arz etmektedir [19]. Konya ilindeki deponun seçilememesi gibi bir durum karşısında ise Erzurum ili ikinci alternatif olarak düşünülebilir. İzmir ve Adana illerindeki alternatifler ise devamında gelmektedir.

5. Sonuç ve öneriler

Bozulabilir gıdalar içinde yer alan süt ve süt ürünlerinin depolarda muhafaza edilmesinde önemli kriterler bulunmaktadır. Son tüketiciye kadar ürünün bozulmadan gidebilmesi için bu kriterlerin belirlenmesi önemlidir. Literatür araştırması sonucunda depo seçim problemlerinin var olduğu ancak yapılan çalışmalarda genellikle ana kriter değerlendirilmesinin yapıldığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada bozulabilir gıdalardan olan süt ve süt ürünleri için depo seçimi yapılmıştır. Problem için beş ana kriter ve toplamda yirmi yedi alt kriter değerlendirilmiştir. A1, A2, A3, A4 ve A5 olmak üzere beş ana kriter ve bu ana kriterlere ait alt kriterler belirlenmiştir. Ana kriterler arasından ürün saklama koşullarında en önemli alt kriterin uygun sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Güvenlik ana kriterinde en önemli alt kriter, ürün giriş ve çıkışlarının kontrolünün yapılması olarak belirlenmiştir. Katma değerli hizmetler arasından en önemli alt kriterin çapraz sevkiyat olduğu bulunmuştur. Taşıma hizmetleri için ise taşıma aracının mali durumunun önemli olduğu görülmüştür. Depo özellikleri ana kriterine ait alt kriterler içinde sürekli sıcaklık kontrolünün yapılmasının önemli olduğu belirlenmiştir. Ana ve alt kriterler için ağırlıklar belirlendikten sonra TOPSIS aşamasına geçilmiştir. AHP yönteminde belirlenen ana kriter ağırlıkları üzerinden TOPSIS yöntemi ile D1, D2, D3, D4 olmak üzere dört deponun değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak Konya ilindeki deponun seçilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Belirlenen depo kriterleri ve buna uygun depo seçiminin yapılması süt ve süt ürünleri için depo seçiminde fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca bozulabilir gıdalardaki depolar için de birkaç özel kriter eklenmesi haricinde problem genel yapısının ilerleyen planlamalarda katkı sağlaması da hedeflenmiştir. İlerleyen çalışmalarda belirlenen alt kriterlere göre daha detaylı bir değerlendirme de yapılabilir.

Çıkar çatışması

Bu çalışmada yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Benzerlik Oranı: %9

Kaynaklar

- [1] Dış ticaret akademisi, Tedarik zinciri yönetimi ve lojistik. <http://www.lojistikdunyasi.net/dis-ticaret-ve-lojistik-kutuphanesi/lojistik-sevkiyat-depoyonetimi.pdf>
- [2] G. Erdem, Tedarik zinciri yönetimi uygulamalarının benimsenmesinin tedarik zinciri ve işletme performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [3] D. Ufuk ve B. Sarımehtetoğlu, Balık etinin muhafazasında soğutma ve dondurma yöntemleri. Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 13(2), 151-158, 2016. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/ercivet/issue/25190/273813>.
- [4] N. Banaz, Tedarik zincirinde soğuk zincir uygulamaları ve bir araç rotalama problemi çözümü. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2019. <https://hdl.handle.net/20.500.12619/79640>

- [5] E. İpekçi ve M. Tanyaş, Soğuk zincir lojistiği uygulamaları ve Türkiye’de soğuk zincir lojistiğinin swot analizi. Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (26), 46-64, 2021. <https://dergipark.org.tr/en/pub/diclesosbed/issue/6189/1926307>
- [6] U. E. Eyman, Tedarik zinciri yönetimi. Kalite Ofisi Yayınları, 15, 2007.
- [7] G. Büyüközkan ve Z. Vardaloğlu, Yeşil tedarik zinciri yönetimi. Lojistik Dergisi, 8, 66-73, 2008. <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33516466/ytzy8-with-cover-page->
- [8] B. Balıbaş, Çok kriterli karar verme yöntemleri ile sürdürülebilir tedarikçi seçimi: Katı atık işleme tesisinde bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, 2020.
- [9] B. Keleş ve G. Ova, Gıda tedarik zinciri yönetiminde bilgi teknolojileri kullanımı. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 17(1), 137-143, 2020. <https://doi.org/10.25308/aduziraat.695732>
- [10] A. Demirci ve A. U. Arıkan, COVID-19 döneminde ilaç deposu yeri seçimi: mersin örneği. Uluslararası İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 7(1), 5-27, 2021. <https://doi.org/10.29131/uiibd.891190>
- [11] N. Kabadayı ve T. E Çakır Esen, Gri ilişkisel temelli topsıs yöntemi ile depo yeri seçimi. Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 9 (1), 169-184, 2021. <https://doi.org/10.18506/anemon.761624>
- [12] N. Tırmıkcıoğlu, Sezgisel bulanık waspas yöntemi ve depo yeri seçimi problemi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21 (6),1330-1342, 2021. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.946313>
- [13] S. Çizmelioglu, Tedarik zincirinde çok kriterli karar verme yöntemleriyle sürdürülebilir tedarikçi seçimi ve imalat sektöründe bir uygulama. Yüksel lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi, 2019.
- [14] A. A. Supçiller ve K. Deligöz, Tedarikçi seçimi probleminin çok kriterli karar verme yöntemleriyle uzlaşık çözümü. Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi, 355-368, 2018. <https://doi.org/10.18092/ulikidince.352742>
- [15] R. Maya ve T. Eren, Türk gıda sektörünün finansal performans analizinin çok kriterli karar verme yöntemleri ile yapılması. Verimlilik Dergisi, 3(3), 31-60, 2018. <https://dergipark.org.tr/en/pub/verimlilik/issue/37982/438622>
- [16] B. Çullu, Tarım ürünleri lojistiği kapsamında sebze-meyve soğuk hava depolarının kuruluş yeri seçimi: Aydın ili uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2017. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/552213>
- [17] H. Özkan, Bozulabilir gıda ürünleri taşımacılığı: Antalya ili uygulaması. Doktora tezi, Maltepe Üniversitesi, 2021.
- [18] İ. Doğan, A. Tekeşşin ve A. Kara, Kısa ömürlü ürünlerin tedarik zincirinin modellenmesi ve simülasyon çalışması. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(2), 605-618, 2017. <https://doi.org/10.17100/nevbiltek.292995>
- [19] A. Şen, Tedarik zincirinde soğuk lojistik uygulamalarının tasarımın Enstitüsüne yönelik bir çalışma. Doktora Tezi, DEÜ Sosyal Bilimleri, 2008. <http://hdl.handle.net/20.500.12397/11268>
- [20] M. Güney ve G. Altuntaş, Bozulabilir ürün üreten işletmelerin taşıyıcı seçiminde kullandıkları kriterlerin ve önem derecelerinin belirlenmesine yönelik bir araştırma. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [21] S. Korucuk, Soğuk zincir taşımacılığı yapan işletmelerde 3pl firma seçimi İstanbul örneği. İğdir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 16, 341-365, 2018. <https://dergipark.org.tr/en/pub/igdirsosbilder/issue/66821/1045038>
- [22] B. Akşahin, Tedarik zinciri yönetiminde gıda sektöründe meydana gelen bekleme zamanlarının kısaltılması. Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, 2014. <https://hdl.handle.net/20.500.12415/3199>
- [23] B. Gülsün ve G. Şahin, Vıkor ve Topsıs yöntemleri kullanılarak peyniraltı suyu tozu üretimi yapan bir işletme için tesis yeri seçimi: Trakya bölgesinde bir vaka çalışması. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 16(31), 1-22, 2017. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ticaretfd/issue/55939/767046>
- [24] S. G. Akçok, Çok kriterli karar verme yöntemleriyle çiğ sütlerin kalitelerine göre kategorize edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020. <http://hdl.handle.net/11499/28658>
- [25] E. Akan, O. Yerlikaya ve Ö. Kınık, Psikrotrof bakterilerin çiğ süt ve süt ürünleri kalitesine etkisi. Akademik Gıda, 12(4), 68-78, 2014. <https://dergipark.org.tr/en/pub/akademik-gida/issue/55788/763671>
- [26] C. S. Başar ve Z. D. Heperkan, Sütün mikrobiyotası ve bozulmasına yol açan önemli bakteriler. Gıda, 46(3), 660-668, 2021. <https://doi.org/10.15237/gida.GD21034>
- [27] G. Sarısoy, Gıdaların soğuk zincir lojistiği. Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi. <http://hdl.handle.net/123456789/1271>
- [28] A. Aksoy, Gıdalarda pH ölçümünün önemi, Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(2), 193-216, 2021. <https://doi.org/10.46373/hafebid.978917>
- [29] G. S. Akar, Bozulabilir gıda tedarik zincirlerinde üretim riskleri gözetilerek üretim-dağıtım planlaması bir süt işleme tesisinde uygulama. Doktora Tezi, Adnan Menderes Üniversitesi, 2015 <http://hdl.handle.net/11607/1459>
- [30] Ö. Şeker ve O. Korkmaz, Kahramanmaraş ilindeki dondurma üreticilerinin soğuk zincir taşıyıcı seçiminde kullanmış oldukları kriterler ve bu kriterlerin önem derecelerinin ahp yöntemi ile belirlenmesi. Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 6(4), 860-877, 2021. <https://doi.org/10.29106/fesa.1015495>

- [31] Saaty, T.L, the analytic hierarchy process, New York: McGraw-Hill, 1980.
- [32] E. Yazıcı, S.İ. Üner, A. Demir, S. Dinler ve H.M. Alakaş. Prioritizing individuals who will have covid-19 vaccine with multi-criteria decision making methods. Gazi University Journal of Science, 1-1. <https://doi.org/10.35378/gujs.1053782>.
- [33] E. Özcan, T. Danişan, R. Yumuşak ve T. Eren, An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants. Eksploatacja i Niezawodność, 22 (3), 498-506, 2020. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.3.3>
- [34] S. J. Chen ve C. L. Hwang. Fuzzy multiple attribute decision making methods. In Fuzzy multiple attribute decision making. Springer, pp. 289-486, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [35] E. Özcan, T. Danişan ve T. Eren, Hidroelektrik santralların en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin optimizasyonu için matematiksel bir model önerisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 498-506, 2019. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/47732/612310?publisher=pamukkale>
- [36] T. Eren, T. Danişan, A. Deringöz ve G. Aksüt, Comparison and selection of patient follow-up systems for covid-19 pandemic patients. Fashion and Textiles, 9(1), 1-13, 2022. <https://doi.org/10.1186/s40691-022-00296-7>
- [37] T. Danişan, E. Özcan ve T. Eren. Personnel Selection with Multi-Criteria Decision Making Methods in the Ready-to-Wear Sector. Tehnički Vjesnik, 29(4), 1339-1347, 2022. <https://doi.org/10.17559/tv-20210816220137>
- [38] Z. N. Turgut, T. Danişan ve T. Eren. Spor ve moda dünyasında giyilebilir teknolojilerin çkkv yöntemleriyle değerlendirilmesi ve seçimi. Herkes için Spor ve Rekreasyon Dergisi, 3(1), 1-11, 2021. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jsar/issue/63301/903211>
- [39] M. Kara, Y. Ercan, R., Yumuşak, A. Cürebal ve T., Eren, Yenilenebilir hibrit enerji santrali uygulamasında tesis yer seçimi. International Journal of Engineering Research and Development, 14(1), 208-227, 2022.
- [40] G. Gümüş, Z. Ercan, T. Danişan, E. Güven ve T. Eren, Türkiye’de aşı taşıma sisteminde ahp ve topsis yöntemleri ile taşıma türü seçimi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 36, 47-58, 2022. <https://doi.org/10.20875/makusobed.1114144>
- [41] A. Deringöz, T. Danişan ve T. Eren, Covid-19 takibinde giyilebilir sağlık teknolojilerinin çkkv yöntemleri ile değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi, 25 (2), 533-543, 2022. <https://doi.org/10.2339/politeknik.768219>
- [42] B. N. Akıncı, T. Danişan ve T. Eren, Hipertansiyon hastaları için giyilebilir sağlık teknolojileri seçimi. Hacettepe University Faculty of Health Sciences Journal, 8(2), 232-248, 2021. <https://doi.org/10.2339/politeknik.886544>
- [43] T. Danişan ve T. Eren, Uluslararası etkin müdahale ekiplerinin çkkv yöntemleri ile belirlenmesi, 3rd International Disaster Management Congress, sayfa 378-379, Tokat, Türkiye, 9-10 Haziran 2022.
- [44] TÜİK, Hayvansal üretim istatistikleri. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hayvansal-Uretim-Istatistikleri-2019-33873>





EDAS ve WASPAS yöntemleriyle tıbbi malzeme tedarikçisi belirleme

Determination of the right medical equipment supplier using the EDAS and WASPAS methods

Aşır Özbek^{1,*} , Muhammet Arif Özbek² 

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 71451, Kırıkkale Türkiye

² İstanbul Medipol Üniversitesi, Beyin ve Sinir Cerrahisi Bölümü, 34214, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı bir sağlık kuruluşunda yapılan boyun fitiği, bel fitiği ve omurga ameliyatlarında kullanılacak olan tıbbi malzemeler için en uygun tedarikçi firmayı belirlemektir. Bu süreçte malzemelerin uygun şekilde tedarikine ilave olarak tedarikçi firmanın da hizmet vermesi gerekmektedir. Bu nedenle kuruluş için, hekim ve hasta memnuniyetini en üst seviyeye çıkaracak tedarikçiyi belirlemek çok önemli olmaktadır. Bu süreç çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemi olarak da görülmektedir. Bu nedenle problemi çözmek için ÇKKV yöntemlerinden Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA), Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS) ve Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) yöntemleri bütünlük olarak kullanılarak en uygun tedarikçi firma belirlenmiştir. SWARA ile kriter ağırlıkları belirlenirken, EDAS ve WASPAS yöntemleri ile tedarikçiler, kriterler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca duyarlılık analizi yapılarak kriter ağırlıklarının tedarikçi seçimindeki olası etkileri ortaya çıkarılmıştır. Yöntemlerin uygulanması neticesinde en uygun tedarikçinin EDAS'a göre T1, WASPAS'a göre ise T2 olduğu belirlenmiştir. T3 her iki yönteme göre de son sırada yer almıştır.

Anahtar kelimeler: Çok kriterli karar verme, Tıbbi malzeme, SWARA, EDAS, WASPAS

1 Giriş

Vücudumuzun temel yapı taşlarından olan omurgamız, konjenital ve edinsel sebeplere bağlı olarak birtakım hasarlara maruz kalmaktadır. Bu hasarların giderilebilmesi için vida, protez, implant gibi tıbbi malzemelere ihtiyaç duyulabilmektedir. Hastaneler, kurumlarında yapılan boyun fitiği, bel fitiği, omurga düzeltme vb. ameliyatlarda belirtilen tıbbi malzemeleri tedarik etmek durumundadırlar.

Spinal cerrahide kullanılan enstrümanlar; cerrahinin etkinliğinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Omurgayı stabilize etmek amacıyla çeşitli vida, çubuk, kanca, plak ve kafesler kullanılmaktadır. Bu materyallerin büyük çoğunluğu titanyum veya titanyum alaşımlarından oluşmaktadır. Karbonfiber veya hidroksi apatiti takviyeli kompozit enstrümanlar son yıllarda kullanılmaya başlanmış olup paslanmaz çeliğin kullanımı giderek azalmıştır. Bu

Abstract

The aim of this study was to determine the most appropriate supplier for the medical equipment to be used in cervical disc herniation, lumbar disc herniation, and spine surgeries in a health institution. The supplier was also to provide maintaining services. Thus, determination of the proper supplier was of great importance for the health institution to maximize the satisfaction of the physicians and the patients. It was considered to be a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) problem, so the Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA), Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS), and Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) methods were used in an integrated way in the determination process. While the SWARA method was employed in determining the weights for the criteria, the EDAS and WASPAS methods were used in the evaluation process. A sensitivity analysis was also made to reveal the possible effects of the weights on supplier selection. The results demonstrated that the best supplier was T1 according to EDAS, and T2 according to WASPAS, while T3 was in the last place according to both methods.

Keywords: Multi-Criteria decision making, Medical equipment, SWARA, EDAS, WASPAS

maddeler seçilirken büyük çalışmalardan geçirilmektedir. Maddenin vücuda uyumu, mikrobiyolojik etkileri, vücut sıvısı veya organ ile etkileşimin yanıtları, enstrümana yüklenecek kuvvet ve ağırlığa olan dayanıklılığı incelenmektedir. Cerrahi uygulamalarda nihai hedef bozulan yapı ve fonksiyonlarının yeniden tesis edilmesidir. Bu süreçte implant seçimi cerrahi başarıda büyük rol oynamaktadır.

Ameliyat yapılan hastanın sağlığına kavuşarak yaşamını sorunsuz bir şekilde sürdürebilmesinde ameliyatı gerçekleştiren hekimlerin başarısı yanında kullandıkları malzemenin kalitesine ek olarak tedarikçi firmanın sunduğu hizmetin seviyesi ve kalitesi de bu süreci ciddi şekilde etkilemektedir. Bu nedenlerden dolayı hastaların sağlıklarına kavuşmasına etki eden faktörlere ilave olarak en uygun tedarikçi firmayı belirlemek çok önemli olmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ozbek@kku.edu.tr (A. Özbek)

Geliş / Received: 20.02.2022 Kabul / Accepted: 05.12.2022 Yayımlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1076387

Sağlık sektöründe temel amaç, hedef ve vizyonuna uygun olarak tedarikçilerin seçilmesi, hastane ve hasta iyileşmesinde etkinliği artıran temel faktörlerdir. Sağlık kuruluşları açısından en uygun tedarikçinin seçimi, birbirlerini etkileyen nicel ve nitel birçok faktörü bünyesinde tutan ÇKKV problemi olarak görülebilmektedir. Tedarikçi seçiminin en temel amacı; tedarikçi işletmenin sağlık kuruluşu ile uyum içinde çalışması ve malzemeyi makul maliyetle ve gerektiği zamanda temin etmesidir. Sağlık kuruluşları açısından uygun tedarikçiyi belirleme stratejileri ileriye dönük hedefleri doğrultusunda çok önemli olmaktadır. Ancak kuruluşlar, uzun vadeli hizmet ve ürün alacağı uygun tedarikçiyi bulmakta zaman zaman zorlanabilmektedir.

Araştırmacıların birçoğu, işletmelerin tedarikçi seçme sorununun ÇKKV problemi olarak değerlendirmiş ve problemin çözümüne yönelik olarak çok farklı uygulamalar geliştirmişlerdir. İşletmeler, tedarikçiler ile uzun süreli stratejik bir ilişki içerisine girmelerinden dolayı tedarikçi belirleme sürecinde çok dikkatli bir yaklaşım sergilemeleri önemli olmaktadır.

En uygun tedarikçiyi seçme ve analiz etme konusunda literatürde birçok çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Yine yapılan literatür araştırmalarında aynı ya da benzer konular çalışılırken çok farklı kriterin ve birçok farklı yöntemin diğer metotlarla birlikte entegre olarak ya da tek başına kullanıldığı görülmektedir. Dickson [1] tarafında 273 satın alma müdürü ve yetkilisi ile yüz yüze görüşme yöntemiyle yapılan anket çalışması, tedarikçi değerlendirme alanında gerçekleştirilen çalışmaların en önemlilerinden ve ilklerinden sayılmaktadır. Tedarikçi değerlendirilmesi, seçimi ve analizi üzerinde yapılan çalışmalarda Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), Analitik Ağ Süreci (AAS), VİseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR), The Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis Method (MOORA), Veri Zarflama Analiz (VZA), Additive Ratio Assessment (ARAS), Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS), Fuzzy Inference System (FIS), Hedef Programlama (HP), Doğrusal Programlama (DP), Çok Seçimli Hedef Programlama (MCGP) gibi yöntemlerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Kriter ağırlıklarını belirlemede ise özellikle son yıllarda Best Worst Method'un (BWM) tercih edildiği anlaşılmaktadır.

Chai vd. [2], tedarikçi seçimi ile ilgili 2008 ve 2012 yılları arasında yapılan 123 çalışmayı incelemişler ve 26 farklı ÇKKV yönteminin kullanıldığı sonucuna varmışlardır. AHS ile yapılan çalışmaların toplam çalışma içerisinde yaklaşık olarak %24'ünü oluşturduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan araştırmada ÇKKV yöntemlerinin tedarikçi seçim probleminde tek başına uygulanabildiği gibi farklı yöntemlerle birlikte kullanıldığı da görülmüştür.

Tong vd. [3], küçük ve orta ölçekli işletmeler için tedarikçi seçiminde The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE) II yöntemini kullanmışlardır.

Baki [4], bulanık ARAS yöntemini kullanarak yeşil tedarikçi seçiminde sekiz ana kriter ve 27 alt kriter

kullanarak 6 tedarikçi arasında en uygun olanı seçmek için bir model geliştirmiştir. Bu model için 254 katılımcıya anket uygulanmıştır.

Kaushik vd. [5], moda sektöründe e-ticaret yapan bir firmanın *operasyonel yetkinlik, ürün niteliği, lojistik, depolama, etik, statü, iş yetkinlikleri ve çok yönlülük* olmak üzere yedi ana kriter ve 38 alt kriterle dayalı tedarikçi seçiminde BWM ve VIKOR yöntemini kullanmışlardır.

Hoseini vd. [6], İran inşaat sektöründe tedarikçi seçim probleminde BWM ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada 4 tedarikçi 9 kriterle göre analiz edilmiştir. Çıkan sonuçları AHS ve Simple Additive Weighting (SAW) yöntemleriyle karşılaştırmış ve önerilen modelin sıralamaları ile benzeştiğini tespit etmişlerdir.

Savaşkan vd. [7], kuru kayısı sektöründe bulunan işletmelerin tedarikçi seçim problemlerine çözüm için bir model geliştirmişlerdir. Bu amaçla kuru kayısı tedarikçilerinin seçiminde 5 ana 34 alt kriter göz önünde bulundurulmuştur. Tedarikçi seçimi Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Afrasiabi vd. [8], üretim endüstrisinde tedarikçi seçiminde bulanık BWM, Gri İlişkisel Analiz (GİA) ve TOPSIS yöntemlerini entegre olarak kullanmışlardır. Kriter ağırlıklarını belirlemede bulanık BWM kullanılırken tedarikçilerin seçiminde GİA ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bulanık sayılar üçgen bulanık sayılar ile temsil edilmiştir. On altı değerlendirme kriteri tanımlanmış ve bunlar *ekonomik, çevresel ve sosyal* başlıkları altında sınıflandırılmıştır.

Aouadni ve Euchi [9], BWM, MMD-TOPSIS ve doğrusal programlama yöntemlerine dayalı bir tedarikçi seçim modeli önermişlerdir. Bu önerilen modeli Tunus Elektrik Derneği tedarikleri için uygulamışlardır.

Mohammed vd. [10], The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL), VIKOR, TOPSIS, Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC) ve Operational Competitiveness Rating Analysis (OCRA) yöntemlerinin entegre olarak kullanıldığı tedarikçi modeli önermişlerdir.

Nguyen vd. [11], çalışmalarında rüzgâr enerjisi projelerinde rüzgâr türbini tedarikçi seçimi için bulanık kümelere dayalı bir ÇKKV modeli önermişlerdir. Önerilen modelde kriter ağırlıkları AHS ile belirlenirken en uygun tedarikçi seçimi WASPAS ile yapılmıştır. Çalışmada 5 tedarikçi arasından en uygun tedarikçi 4 ana kriter ve 11 alt kriterle göre değerlendirilmiştir.

Yazdani vd. [12], gıda tedarik zincirlerinde tedarikçi seçimi probleminde kriterlerin ağırlıklarını belirlemede D-sayıları ile birlikte SWARA ve level based weight assessment (LBWA) yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmada beş tedarikçi arasından en uygun tedarikçiyi belirleme sekiz kriterle göre Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution (MARCOS)-D yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir.

Lau vd. [13], Hong Kong'da organik gıda tedarikçisi seçim problemi için bulanık AHS, TOPSIS ve ELECTRE yöntemlerini kullanarak oyun teorisi tabanlı bir karar verme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada *ürün kalitesi, organik güvenlik, izleme maliyeti, fiyat, teslimat, hizmetlerin*

mevcudiyeti, ticari pozisyon, tedarikçi ilişkisi, risk faktörleri ve sosyal sorumluluk kriterleri kullanılmıştır.

Fu [14], yemek endüstrisinde gıda tedarikçisi seçimi için AHS ve ARAS yöntemlerini kullanan çok seçenekli bir hedef programlama modeli önermiştir. Modelde beş adet tedarikçi, *yemek kalitesi, hizmet süresi, teslim süresi, firma imajı ve besin güvenliği* kriterlerine göre analiz edilmiştir.

Wu vd. [15], kimya endüstrisinde tedarikçi seçim problemini çözmek için bulanık GİA, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), entropy weight method (EWM) ve TOPSIS yöntemlerine dayalı bir model önermiştir. Modelde *ekonomik, sosyal ve çevre* ana kriterleri altında 13 alt kriterlere göre altı tedarikçi firma değerlendirilmiştir.

Liu vd. [16] tıbbi tedarikçi seçimi sürecinde kriter ağırlıklarını belirlemek için BWM yöntemini kullanırken, en uygun tedarikçiyi belirlemede ELECTRE yöntemi ile Distance from Average Solution (EDAS) yöntemini temel alan MAGDM adını verdikleri bir yöntem önerilmiştir.

Sağlık sektörü özelinde ise yapılan tedarikçi seçim çalışmalarının bazıları şu şekildedir:

Doğan ve Akbal [17], bir üniversite hastanesi için medikal malzeme tedarikçisini seçmede AHS yöntemini kullanmışlardır. *Fiyat, teknik yeterlilik, hizmet kalitesi, tamir hizmeti ve garanti politikası* kriterlerine göre üç tedarikçi firma değerlendirilmiştir.

Stević vd. [18], 21 kriteri dikkate alarak sağlık sektörü için sürdürülebilir bir tedarikçi seçiminde MACROS yöntemini kullanmışlardır.

Miah vd. [19], sağlık tedarik zinciri yönetimi için bir satın alma karar destek yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yeni Zelanda'da 61 hastanenin satın alma yöneticilerine anket uygulamışlardır. Bu ankette dikkate aldıkları kriterler *ürün kalitesi, fiyat, müşteri servisi, geçmiş deneyim, dönüş hızı ve teslim süresi* olmuştur.

Mehralian vd. [20], *kalite, teslimat, teknoloji, imaj, çevre işleri, esneklik, bilgi sistemi, fiyat ve çevresel riskler* kriterlerini kullanarak İran ilaç şirketleri için uygun tedarikçi seçiminde bulanık TOPSIS yöntemini kullanmışlardır.

Fashoto vd. [21], gelişmekte olan ülkelerdeki üniversitelerin sağlık hizmetlerinde tedarikçilerin değerlendirilmesi ve seçimi için bir karar destek modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde *fiyat, servis, teslimat, risk ve kalite* kriterleri kullanılmış ve ağırlıkları AHS ile belirlenmiştir. Yapay sinir ağı (YSA) yöntemi ile de tedarikçiler değerlendirilmiştir.

Ahmadi vd [22], sağlık sistemlerindeki tedarik yönetimi problemlerini çözmek için bir optimizasyon yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yöntemde *satın alma fiyatı, kalite, tepki süresi, teslimatta güvenilirlik ve son kullanma tarihi* kriterleri dikkate alınmıştır. Optimizasyon VZA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Bahadori vd. [23], yapay sinir ağı ve bulanık VIKOR yöntemlerini kullanarak hastaneler için bir tedarikçi seçim modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde *fiyat, kalite, zamanında teslimat, ödeme koşulları, tedarikçinin geçmişi, paketleme ve nakliye kalitesi* kriterleri kullanılmıştır.

Ishtiaq vd. [24], Pakistan'ın Karaçi şehrindeki bir hastanenin atık yönetimi için tedarikçi seçim probleminin çözümünde *atık yönetim maliyeti, tedarikçi ayrıntıları, atık*

işleme prosedürü ve atık arıtma kriterlerini dikkate alarak AHS yöntemi ile bir çözüm önerisi sunmuşlardır.

Pourghahreman ve Qhatari [25], ajan bazlı bir farmasötik tedarik zincirinde tedarikçi seçim probleminde dikkate alınan kriterlerin önceliklerini belirlemek için TOPSIS ve PROMETHEE II yöntemlerini bütünleşik olarak kullanan bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, ilk olarak uzman görüşleri dikkate alınarak on kriter seçilmiş, kriterlerin sıralanması için nicel ve nitel olmak üzere iki kategori belirlenmiş ve ardından TOPSIS ve PROMETHEE II yöntemleri uygulanarak kriterlerin sıralaması yapılmıştır.

Alinezad vd [26], bir ilaç firması için 17 kriteri dikkate alarak beş tedarikçi firma arasından en uygun tedarikçiyi seçme ve değerlendirmede kalite fonksiyon dağılımı ve bulanık AHS yöntemlerini bütünleşik olarak kullanmışlardır.

Badi ve Ballem [27], *fiyat, maliyetler, kalite, tedarikçi profili, teslimat ve esneklik* kriterlerini dikkate alarak üç tıbbi tedarikçi arasından en uygun olanı belirlemek için BWM and MAIRCA (Multi-Attribute Ideal-Real Comparative Analysis) yöntemlerini kullanmışlardır.

Tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesi ilgili yapılan çalışmalardan bazıları **Tablo 1**'de verilmiştir.

Bu çalışmada bir vakıf üniversite hastanesinin beyin sinir cerrahisi bölümünde görevli öğretim üyeleri ve asistanlar tarafından önem sırasına göre sıralanan ve puanlanan kriterlerin ağırlıkları SWARA yöntemi ile belirlenmiştir. En doğru tedarikçiyi seçmede EDAS ve WASPAS yöntemleri kullanılmıştır. SWARA yöntemi diğer metotlarla karşılaştırıldığında kıyaslama sayısının daha az olması nedeniyle bu yöntemin çok daha tutarlı sonuçlar vermesine sebep olmaktadır. SWARA tekniğinde, kriterlerin uygulayıcılar tarafından değerlendirilmesi için herhangi bir ölçüğe gerek duyulmamaktadır [66]. EDAS ve WASPAS yöntemlerinin birçok çalışmada başarılı olarak uygulanması ve doğru sonuçlar vermesi ayrıca WASPAS yönteminin, duyarlılık analizi yaparak alternatiflerin sıralanmasındaki tutarlılığı kontrol edebilmesinden dolayı tercih edilmiştir [67]. Yapılan bu çalışmanın sağlık kuruluşlarında ihtiyaç duyulan tıbbi malzeme tedarikçisi seçim probleminde SWARA-EDAS-WASPAS bütünleşik modelin uygulanması ve diğer alanlardaki ÇKKV problemlerin çözümüne farklı bir seçenek sunmasından dolayı literatürdeki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

Dört ana bölümden oluşan bu çalışmanın ilk bölümü olan giriş kısmında konun kavramsal boyutuna değinilmiştir. Tedarikçi değerlendirmesi ve seçimi ile ilgili literatür taraması da yine bu bölümde yapılmıştır. İkinci bölümde ise kullanılan yöntemler olan SWARA, EDAS ve WASPAS teknikleri detaya girmeden tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde SWARA ile kriter ağırlıkları, EDAS ve WASPAS yöntemi ile de tedarikçi seçimi yapılarak bulgulara ve tartışmalara yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca kriterlerin sonuçları etkileyip etkilemediğini görmek açısından duyarlılık analizi yapılmıştır. Son kısım olan sonuç kısmında ise yapılan çalışma analiz edilmiş ve ileride yapılacak çalışmalara yönelik olarak araştırmacılara öneriler sunulmuştur.

Tablo 1. Tedarikçi seçim çalışmaları

Yazar	ÇKKV Yöntemi	Endüstri
Pramanik vd. [28]	Fuzzy AHS-RAS	Otomotiv üretimi
Xiong vd. [29]	Fuzzy BWM- WASPAS- TOPSIS	Açıklayıcı örnek
Hasan vd. [30]	Fuzzy DSS- MCGP	Lojistik
Mohammed [31]	Grey DEMATEL- VIKOR	Kimyasal üretim
Piprani vd. [32]	Fuzzy AHS	Tekstil üretim
Parkouhi vd. [33]	Grey DEMATEL- SAW	Ahşap ve kâğıt
Davoudabadi vd. [34]	PCA-VZA	Açıklayıcı örnek
Amindoust [35]	FIS-VZA	Alaşım üretimi
Pramanik vd. [36]	Fuzzy AHS- TOPSIS-QFD	Genel imalat
PrasannaVenkatesan and Goh [37]	Fuzzy AHS- PROMETHEE	Sayısal deney
Sahu vd [38]	Fuzzy VIKOR	Ampirik örnek
Haldar vd [39]	Fuzzy AHS-QFD	Varsayımsal durum
Vinodh vd [40]	Fuzzy AAS	Elektronik üretimi
Kumar vd. [41]	Yeşil VZA	Otomobil yedek parçaları
Girubha vd. [42]	NP, ELECTRE II & VIKOR	Elektronik anahtar imalat
Sang and Liu [43]	TODIM	Otomobil üreticisi
Shabanpour vd. [44]	Goal Programming & DEA	Çelik imalat
Su vd. [45]	DEMATEL	Elektronik imalat
Fallahpour vd. [46]	AHS, Preference Programming & TOPSIS	Örme kumaş üretim
Luthra vd. [47]	AHS & VIKOR	Otomobil endüstri
Song vd. [48]	DEMATEL	Güneş kliması
Abdel-Basset vd [49]	DEMATEL	Plastik boru parçaları
Awasthi vd. [50]	AHS & VIKOR	Elektronik eşya imalat şirketi
Azimifard vd. [51]	AHS-TOPSIS	Çelik endüstrisi
Lu vd. [52]	ELECTRE	Sayısal test
Song and Li [53]	TOPSIS	İlaç işletmesi
Khan vd. [54]	Method of moments	Yeşil tedarik
Abdel-Baset vd. [55]	AHS & VIKOR	İthalatçı firma
Alikhani vd. [56]	VIKOR-VZA	Süpermarket zinciri
Rashidi & Cullinane [57]	VZA-TOPSIS	Lojistik hizmet sağlayıcı
Fei vd. [58]	VIKOR	Sayısal örnek
Zolfani and Chatterjee [59]	SWARA- BWM	Ev döşeme malzemeleri
Stević vd. [18]	MARCOS	Sağlık hizmeti
Jain vd. [60]	AHS-TOPSIS	Demir ve çelik endüstrileri
Rouyendegh vd. [61]	TOPSIS	Sayısal örnek
Wen vd. [62]	VIKOR	Otomobil parçası imalatı
Ecer and Pamucar [63]	BWM-CoCoSo	Ev aletleri imalatı
Yazdani vd. [64]	DEMATEL & BWM & EDAS	Sağlık tedarikçisi
Yazdani vd. [65]	CoCoSo	İnşaat firmaso
Ishtiaq vd. [24]	AHS	Hastane atık yönetimi

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada üç farklı yöntem entegre olarak uygulanmıştır. Kriterler SWARA yöntemi ile ağırlıklandırılırken, tedarikçilerin değerlendirilmesi EDAS ve WASPAS yöntemleri ile ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.1 SWARA yöntemi

SWARA yöntemi, Zavadskas, Turskis ve Keršulienė tarafından 2010 yılında ÇKKV problemlere çözüm bulmak amacıyla geliştirilmiş bir tekniktir. Grup çalışmasını desteklemesi ve uygulanmasının çok kolay olması gibi nedenlerden dolayı hızlı bir şekilde kabul görmüş ve bugüne kadar birçok çalışmada başarı ile uygulanmıştır [66, 68-70].

Bu yöntemde kriterler, karar vericiler tarafından ilk olarak çok önemliden daha az önemliye doğru yani önem sırasına göre azalan şekilde sıralanır. Böylece karar verici adedince kriter önem sırası vektörünü ortaya çıkar. Kriterlerin genel önem sıralaması, uzmanların yaptığı kriter önem sıralamalarının aritmetik veya bazı durumlarda geometrik ortalaması alınarak belirlenir. Her bir karar verici, genel sıralamayı dikkate alarak kriterleri $j+1$. kriterden başlayarak j . kriter (bir önceki) ile kıyaslar ve bu kıyaslama neticesinde SWARA yöntemine göre kriterlerin önem katsayıları belirlenir. Sonuçta ne kadar karar verici varsa o kadar kriter önem katsayı vektörü elde edilir. Bu elde edilen kriter önem katsayı vektörlerinin aynı indisli elemanlarının aritmetik ortalaması alınarak nihai öncelik katsayıları bulunur [68, 71-72].

Literatür incelendiğinde son yıllarda birçok çalışmanın SWARA yöntem ile yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak şunlar verilebilir: Tedarikçi seçimi [73-74], personel seçimi [68, 75-78], faktöring şirketlerin değerlendirilmesi [70], lojistik işletmelerin değerlendirilmesi [71,79], ambalaj ve ürün tasarımı [24,80].

SWARA yöntemi şu adımlardan oluşmaktadır [24-66,81]:

2.1.1 SWARA işlem adımları

- 1. Adım:** Kriterler önemine göre azalan seviyede sıralanır.
- 2. Adım:** j . kriter ile $(j + 1)$. kriter ile kıyaslanır ve j . kriterin önemini yüzde olarak ifade eden s_{j+1} parametresi belirlenir.
- 3. Adım:** Denklem (1) ile gösterilen k_j değeri, kriterlerin ikili olarak karşılaştırılmasıyla elde edilen ve j . kriterin $(j + 1)$. kritere göre önemini yüzde olarak ifade eden parametreye 1 ilave edilmiş değişkendir.

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

- 4. Adım:** q_j parametresi 0-1 arasında bir değer alır ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

- 5. Adım:** Kriterlerin göreceli ağırlıkları w_j Denklem (3)'de gösterildiği gibi belirlenir.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (3)$$

2.2 EDAS yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden olan EDAS metodu, Keshavarz Ghorabae ve arkadaşları tarafından 2015 yılında geliştirilmiştir. EDAS yöntemi, seçeneklerden en uygun olanı belirlemede ortalama çözümü dikkate almaktadır [82]. EDAS, geliştirici yazarları tarafından diğer ÇKKV yöntemlerinden SAW Complex Proportional Assessment (COPRAS), TOPSIS, VIKOR ile karşılaştırılmış ve geçerliliği test edilmiştir [66]. Bu yöntem 6 adımdan oluşmaktadır.

2.2.1 EDAS işlem adımları

Yöntemin işlem adımları [66,82];

1. *Adım*: Başlangıç matrisinin (X) oluşturulması. Seçeneklerin kriterlere göre aldığı değerlerin gösterildiği başlangıç karar matrisi **Denklem (4)** ile formüle edildiği gibi oluşturulur. x_{ij} , i. seçeneğin j. kritere göre aldığı değeri göstermektedir. m, seçenek; n ise kriter sayısını belirtmektedir.

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2. *Adım*: Tüm kriterlere göre ortalama değerler matrisinin (AV) belirlenmesi. Her bir kritere göre seçeneklerin ortalama değeri **Denklem (5a)** yardımıyla elde edilir. AV_j , j. kriterin ortalamasını göstermektedir.

$$AV_j = \frac{\sum_i^m X_{ij}}{m} \quad (5a)$$

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} \quad (5b)$$

3. *Adım*: Ortalamadan pozitif uzaklık (PDA) ve negatif uzaklık (NDA) matrisinin oluşturulması. **Denklem (6)** ile formüle edilen PDA ve **Denklem (7)** ile formüle edilen NDA matrisleri fayda yönlü olduklarında (8) ve (9) numaralı **Denklemler** ile maliyet yönlü oldukları zaman ise (10) ve (11) numaralı **Denklemler** ile oluşturulur.

$$PDA = [PDA_{ij}]_{m \times n} \quad (6)$$

$$NDA = [NDA_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (8)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (9)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - X_{ij}))}{AV_j} \quad (10)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (X_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (11)$$

4. *Adım*: PDA ve NDA matrislerinin ağırlıklandırılması ve seçeneklerin değerlerinin hesaplanması. Her bir seçeneğin kriterlere göre ağırlıklandırılmış değerleri toplanır. Toplam pozitif uzaklık (SP) değerleri **Denklem (12)**, toplam negatif uzaklık (SN) değerleri ise **Denklem (13)** kullanılarak hesaplanır [83].

$$SP_i = \sum_{j=1}^n v_j PDA_{ij} \quad (12)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n v_j NDA_{ij} \quad (13)$$

5. *Adım*: Seçeneklerin SP ve SN değerlerinin normalize edilmesi. Her bir seçeneğin normalize SP ve normalize SN değerleri, **Denklem (14)** ve **(15)** kullanılarak hesaplanır.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max_i(SP_i)} \quad (14)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max_i(SN_i)} \quad (15)$$

6. *Adım*: Sıralama puanının hesaplanması. **Denklem (16)** ile formülüne edildiği gibi her bir seçeneğin normalize toplam pozitif (NSP) ve normalize toplam negatif (NSN) puanlarının ortalaması alınarak seçeneklerin nihai performansı (AS) elde edilir.

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) \quad (16)$$

AS_i değeri, $0 \leq AS_i \leq 1$ koşulunu sağlamalıdır.

Seçenekler, AS puanına göre azalan düzeyde sıralanır. En yüksek değere sahip birinci sıradaki seçenek en uygun alternatif olarak değerlendirilir.

2.3 WASPAS yöntemi

ÇKKV yöntemlerinden olan WASPAS, Zavadskas vd. tarafından 2012 yılında geliştirilen Weighted Product Model (WPM) ve Weighted Sum Model (WSM) tekniklerine dayanmaktadır [80]. WASPAS yöntemi, ÇKKV problemlerinin çözümünde kriter ağırlıklarını dikkate alarak alternatiflerin kriterlere göre nihai performansını hesaplamaktadır. Yöntemin uygulanması neticesinde alternatifler en yüksekte en düşüğe doğru sıralanmaktadır. Ayrıca yöntem, yüksek tutarlılığa erişmek için ağırlıklandırılmış ve entegre edilmiş fonksiyonu optimize etmektedir [83,84]. WASPAS yöntemi birçok çalışmada başarı ile uygulanmıştır. Örnek olarak bu çalışmalara şunlar verilebilir: Kamu binalarında cephe giydirmesi [85], alışveriş merkezi yeri seçimi [80,86], tedarikçi seçimi [74,87-88], sağlık ve güvenlik çözümlerinin değerlendirilmesi [89],

personel seçimi [77], Türkiye'deki şehirlerin yaşanabilirliğinin değerlendirilmesi [83] ve robot seçimi [90] gibi çalışmalar son yıllarda WASPAS yöntemiyle yapılan çalışmalardan birkaçını oluşturmaktadır.

Bu yöntemin uygulanmasında öncelikle $m \times n$ boyutunda bir matris oluşturulur. Karar matrisi olarak adlandırılan bu matriste seçeneklerin kriterlere göre değerleri yer alır. Matriste m , seçenekleri (A_i , $i = 1, 2, \dots, m$) ve n ise kriterleri (K_j , $j = 1, 2, \dots, n$) gösterirken, w_j , kriterlerin ağırlığını ifade etmektedir.

2.3.1 WASPAS işlem adımları

WASPAS yönteminin adımları şu şekilde özetlenebilir [76, 84].

1. *Adım*: İlk olarak karar matrisi (X) oluşturulur. Denklem (17) ile gösterilen bu matriste; x_{ij} ; i . seçeneğin j . kritere göre değerini göstermektedir.

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

2. *Adım*: Kriterlerin fayda veya maliyet yönlü oluşlarına göre karar matrisi normalize edilir. Normalizasyon işlemi fayda yönlü kriterler için (18), maliyet yönlü kriterler için (19) numaralı Denklem ile gerçekleştirilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}} \quad (18)$$

$$x_{ij}^* = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (19)$$

3. *Adım*: Her bir seçenğin nisbi performansı, kriter ağırlıkları ile seçeneğin kriterlere göre performansının çarpımının toplamı ile elde edilir. Bu durum Denklem (20) ile formülize edilmiştir.

$$P_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n x_{ij}^* w_j \quad (20)$$

4. *Adım*: Her bir seçenğin nisbi performansı, seçeneklerin kriterlere göre kuvvetlerinin çarpımı alınarak bulunur. Denklem (21) ile bu durum ifade edilmiştir.

$$P_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_j} \quad (21)$$

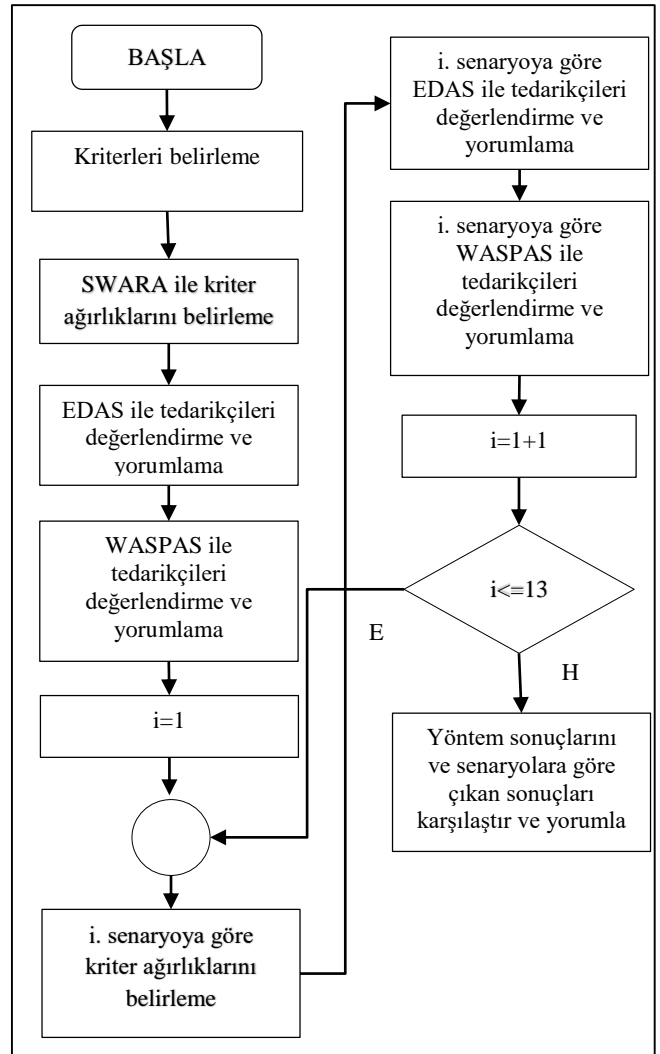
5. *Adım*: Seçeneklerin genel sıralamadaki pozisyonlarını gösteren nihai performansı P_i , Denklem (20) ve (21)'e göre hesaplanan göreceli performanslarının toplanmasıyla bulunur. Denklem (22) ile bu durum ifade edilmiştir.

$$P_i = 0.5P_i^{(1)} + 0.5P_i^{(2)} \quad (22)$$

Karar verme sürecinin etkinliğini ve doğruluğunu artırmak için Denklem (23) kullanılabilir. α , 0 ile 1 arasında değer alabilen bir parametredir. WASPAS yöntemi, $\alpha=0$ olarak belirlendiğinde WPM yöntemine; $\alpha=1$ olarak belirlendiğinde ise WSM yöntemine dönüşmektedir. Karar verici, α değerini istediği gibi belirleyebilmektedir. Zavadskas vd. α değeri için 0,5 değerini belirlemelerine rağmen α için en uygun değerın hesaplanmasını önermektedirler [98].

$$P_i = \alpha P_i^{(1)} + (1 - \alpha) P_i^{(2)} \quad (23)$$

6. *Adım*: Alternatiflerin nihai sıralamada yerlerini belirlemek için P_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. İlk sıradaki alternatif en uygun seçenek olarak değerlendirilir.



Şekil 1. Tedarikçi seçim modeli

3 Bulgular ve tartışma

3.1.1 Tedarikçi seçim modeli

Sağlık sektörü için tedarikçi belirleme modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Modelin ilk aşamasında kriterler, literatür

taraması, vakıf üniversite hastanesi beyin sinir cerrahisi bölümü öğretim elemanları ve asistanlarının (karar vericiler) görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada ise her bir karar vericinin kriterleri önem sırasına göre azalan seviyede sıralamaları neticesinde SWARA yöntemi ile kriter ağırlıkları tespit edilmiştir. Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra tedarikçilerin değerlendirilmesine geçilmiştir. İlk olarak EDAS ile tedarikçiler değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Bir sonraki adımda tedarikçiler WASPAS ile değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın son adımında 13 adet senaryo geliştirilmiş ve her bir senaryoya göre kriter ağırlıkları tekrar belirlenmiş ve tedarikçiler EDAS ve WASPAS'a göre değerlendirilmiştir. Son aşamada ise senaryolu ve senaryosuz durumlara göre çıkan sonuçlar analiz edilmiş ve aralarındaki farklar ve benzerlikler ortaya konmuştur.

3.1.2 SWARA ile kriter ağırlıklarının belirlenmesi

Literatür incelemesi sonucunda tedarikçi seçiminde kalite, maliyet, güvenilirlik ve teslimat kriterlerinin en önemli ölçütler olduğu görülmektedir. Ancak sağlık işletmeleri, tedarikçi seçim sürecinde tedarik edeceği ürüne göre ek kriterleri de dikkate alması gerekmektedir. Sağlık sektörü tedarikçi seçiminde kullanılan kriterler **Tablo 2**'de gösterilmiştir.

Karar vericilerin görüşleri ve literatür taraması neticesinde sağlık kuruluşlarında malzeme tedarikçi seçiminde aşağıda verilen kriterler tespit edilmiştir:

- Malzemelerin ameliyata hazır hale getirilmesi (K1)
- Malzemelerin kullanımının kolay olması (K2)
- Maliyet (K3)
- Teslimatın hızlı gerçekleştirilmesi (K4)
- Kullanılacak malzemenin kalitesi (çelik alaşım, titanyum alaşım) (K5)
- Arınlık şartlarının yerine getirilmesi (K6)
- Güvenirlik (K7)
- Farklı anatomik yapılarla uygun ürün çeşitliliği (K8)
- Vidaların sağlamlığı, güvenilirliği ve kontrollü olarak uygulanabilirliği (K9)
- Vücuta uygunluk ve uyum (K10).

Öncelikle kriterler karar vericiler tarafından bireysel olarak önemine göre puanlanır. Puanlamada 1-10 arası ölçek kullanılır. 1, kriterin çok önemli olduğunu gösterirken 10, öneminin oldukça az olduğunu ifade eder. Karar vericiler tarafından yapılan puanlamanın kriter bazında geometrik ortalaması alınır ve küçükten büyüğe doğru (önemliden daha az önemliye doğru) sıralanır. Bu sıralama analize temel teşkil edecek dizilimdir. **Tablo 3**'de karar vericilerin puanlamaları ve belirlenen sıralamalar verilmiştir.

Kriterler, elde edilen nihai sıralama temel alınarak (j+1). kriterden başlayarak k. (bir önceki) kriter ile karar vericiler tarafından önem derecesine göre kıyaslanır. k. kriterin (j+1). kriterden ne kadar önemli olduğu yüzde olarak belirlenir ve (j+1). kriterin bulunduğu satıra s_j değeri olarak eklenir. Her bir karar verici kriterlerin kıyaslamasını tek başına yapar. Karar vericilerin kriterleri kıyaslama sonuçları **Tablo 4**'de verilmiştir.

Tablo 2. Sağlık sektörü tedarikçi seçim kriterleri

Fiyat, teknik yeterlilik, hizmet kalitesi, tamir hizmeti ve garanti politikası [15]
Ekonomik, çevresel ve sosyal [18]
Kalite, fiyat, müşteri servisi, geçmiş deneyimi, dönüş hızı ve teslim süresi [19]
Kalite, teslimat, teknoloji, imaj, çevre işleri, esneklik, bilgi sistemi, fiyat ve çevresel riskler [20]
Fiyat, servis, teslimat, risk ve kalite [21]
Satın alma fiyatı, kalite, tepki süresi, teslimatta güvenilirlik, son kullanma tarihi [22]
Fiyat, kalite, zamanında teslimat, ödeme koşulları, tedarikçinin geçmişi, paketleme ve nakliye kalitesi [23]
Atık yönetim maliyeti, tedarikçi ayrıntıları, atık işleme prosedürü, atık arıtma [24]
Kalite, zamanında teslimat, güven, itibar, esneklik, önceki işbirliği deneyimi, mali durum, fiyat, teslim süresi, sağlanabilecek malzeme miktarı [25]
Maliyet, tedarikçi durumu, teslim süresi, kalite [26]
Fiyat ve maliyetler, kalite, tedarikçi profili, teslimat, esneklik [27]
Satın alma maliyeti, ürün kalitesi, finansal istikrar, teslimat performansı, bina ve tesis, personel [92]
Fiyat, teslimat, servis, esneklik ve ilişki [93]
Maliyet, kalite, hizmetler, teslimat, tedarikçi profili [94]
Maliyet, kalite, hizmetler, diğer, tedarikçi profili, risk [95]
Kalite, maliyet, mevzuata uygunluk, hizmet güvenilirliği, risk yönetimi, tedarikçi profili, yeşil satın alma [96]
Tedarik kapasitesi, üretim kapasitesi, tepki süresi, üretim teknolojisi, fiyat, garanti, prosedürel uygunluk, satın alma işlemi, iletişim sistemi, kalite, tamamlanan sevkiyat belgesi, miktar, zamanında teslimat, mali durum, yer, itibar, yönetim ve organizasyon [97]

Tablo 3. Kriterlerin puanlanması ve sıralama

Kriterler	UZ 1	UZ 2	UZ 3	UZ 4	GEO	Sıra
K1	9	9	4	10	7.545	10
K2	7	6	5	5	5.692	7
K3	10	1	10	4	4.472	4
K4	8	8	2	9	5.826	8
K5	1	2	1	1	1.189	1
K6	6	7	3	8	5.635	6
K7	5	10	9	6	7.208	9
K8	3	3	7	3	3.708	2
K9	2	5	8	7	4.865	5
K10	4	4	6	2	3.722	3

Karar vericiler tarafından kriterlerin kendi aralarında karşılaştırılması sonucunda ortaya çıkan değerler **Tablo 4**'de gösterilmiştir. Kriter ağırlıkları SWARA metoduna göre hesaplanmış ve **Tablo 5**'de verilmiştir. Sonuçta karar verici sayısı kadar kriter ağırlık vektörü elde edilmiştir.

Tablo 4. Kriterlerin karar vericiler tarafından kıyaslanması

Kriterler	Sıra	KV1	KV2	KV3	KV4
K5	1				
K8	2	0.20	0.10	0.20	0.20
K10	3	0.30	0.20	0.20	0.20
K3	4	0.20	0.15	0.10	0.10
K9	5	0.10	0.00	0.15	0.00
K6	6	0.10	0.05	0.50	0.10
K2	7	0.20	0.10	0.20	0.20
K4	8	0.00	0.10	0.10	0.10
K7	9	0.10	0.10	0.00	0.00
K1	10	0.00	0.00	0.10	0.10

Tedarikçileri değerlendirmek için gerekli olan nihai kriter ağırlıklar, **Tablo 5**'de verilen sıralamalarda aynı indisli kriterlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. **Tablo 5**'e bakıldığında en önemli kriterin 0.169 değeri ile K5 olduğu anlaşılmaktadır. K8; 0.145 değeri ile ikinci önemli kriter olmuştur. Sıralamanın en sonunda 0.061 değeri ile K1 yer almıştır. Kriterlerin sıralanması **Tablo 5**'de görülebileceği gibi $K5 > K8 > K10 > K3 > K9 > K6 > K2 > K4 > K7 > K1$ şeklinde gerçekleşmiştir.

Tablo 5. SWARA yöntemine göre kriterlerin ağırlıkları

Kriterler	UZ1	UZ2	UZ3	UZ4	A.ORT
K1	0.071	0.049	0.065	0.061	0.061
K2	0.086	0.059	0.078	0.071	0.074
K3	0.099	0.122	0.103	0.107	0.108
K4	0.078	0.053	0.071	0.067	0.068
K5	0.151	0.193	0.164	0.177	0.169
K6	0.094	0.071	0.094	0.083	0.086
K7	0.071	0.053	0.071	0.062	0.065
K8	0.137	0.161	0.136	0.151	0.145
K9	0.099	0.106	0.103	0.099	0.103
K10	0.114	0.134	0.114	0.123	0.121

3.1.3 WASPAS İle tedarikçi seçimi

Üç adet tedarikçi firma, karar vericiler tarafından belirlenen kriterlere göre puanlanmıştır. Değerlendirmede 1-10 arası puanlama ölçeği kullanılmıştır (1: çok çok kötü, 10: çok çok iyi). Karar vericilerin tedarikçileri kriterlere göre değerlendirmesi sonucunda ortaya çıkan değerler geometrik ortalama yöntemiyle tek bir tabloda birleştirilmiştir. Bu tablo, WASPAS ve EDAS yöntemi uygulamasında kullanılan temel parametreler olmakta ve başlangıç karar matrisi olarak adlandırılmaktadır. Bu veriler **Tablo 6**'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Başlangıç karar matrisi

Kriterler	T1	T2	T3
K1	8.132	9.240	8.000
K2	8.132	8.972	7.238
K3	6.620	6.435	6.435
K4	9.212	8.712	7.737
K5	8.239	8.485	7.238
K6	9.487	9.740	8.739
K7	9.147	8.149	7.737
K8	8.207	8.239	8.000
K9	8.712	9.240	8.239
K10	8.207	8.452	7.969

WASPAS yöntemi ile **Tablo 6**'da gösterilen verilerin analizi sonucunda **Tablo 7**'de görüldüğü gibi T2 tedarikçisi en uygun tedarikçi olarak belirlenmiştir. İkinci sırayı T1 olarak sembolize edilen tedarikçi almıştır. Son sıraya ise T3 adlı tedarikçi konumlanmıştır. Tedarikçilerin dizilimi $T2 > T1 > T3$ şeklinde olmuştur. Bu sıralamaya göre sağlık kuruluşu için en doğru tedarikçinin T2 olduğu, en uygun olmayan tedarikçinin de T3 olduğu ortaya konmuştur.

Tablo 7. WASPAS yöntemi sonuçları ve sıralama

	T1	T2	T3
Puan	0.965	0.989	0.900
Sıralama	2	1	3

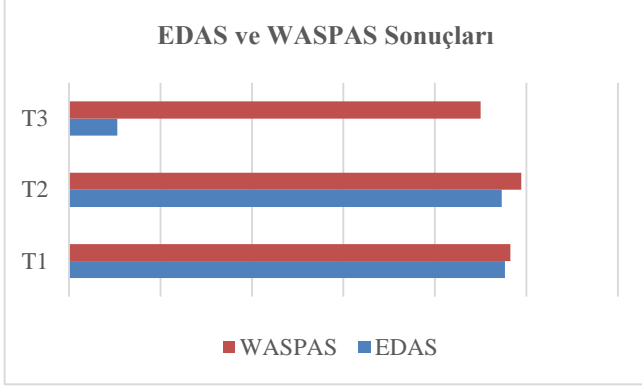
3.1.4 EDAS İle tedarikçi seçimi

EDAS yöntemi ile **Tablo 6**'da gösterilen verilerin analizi sonucunda **Tablo 8**'de gösterilen tedarikçi sıralaması elde edilmiştir. Analiz neticesinde en doğru tedarikçinin T1 olduğu anlaşılmıştır. 2. sırada T2 tedarikçisi yer almıştır. T3 tedarikçisi ise son sıraya konumlanmıştır. EDAS yöntemi analizine göre sağlık kuruluşu için en doğru tedarikçinin T1 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 8. EDAS yöntemi sonuçları ve sıralama

	T1	T2	T3
Puan	0.9528	0.9464	0.1058
Sıralama	1	2	3

Tablo 7, **Tablo 8** ve **Şekil 2** birlikte analiz edildiğinde her iki yöntem sonuçlarına göre T3 tedarikçisi son sırada yer almıştır. T1 tedarikçisi EDAS yöntemi sonuçlarına göre 1. sırada konumlanırken, WASPAS yöntemi sonuçlarına göre 2. sırada yer almıştır. T2 tedarikçisi EDAS yöntemi sonuçlarına göre 2. sırada konumlanırken, WASPAS yöntemi sonuçlarına göre 1. sırada yer almıştır.



Şekil 2. EDAS ve WASPAS sonuçları

3.1.5 Duyarlılık analizi

Çalışmanın bu bölümünde kapsamlı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu amaçla kriterlerin ağırlık değerleri değiştirilmiş ve bu farklı ağırlıkların EDAS ve WASPAS yöntemleri kullanılarak elde edilen sıralama sonuçlarına olası etkileri incelenmiştir. Ağırlıkları değiştirerek yeni değerleri belirlemek için Kahraman [99] tarafından önerilen yöntem dikkate alınmıştır. Yöntemin uygulanması neticesinde senaryo olarak tanımlanan 13 farklı kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 9'da gösterilmiştir.

Duyarlılık analizinde ilk olarak esneklik ağırlık katsayıları Denklem (24) kullanılarak hesaplanır.

$$\alpha_i = \frac{w_i^0}{\sum_{i \in I} w_i^0}, \quad I = (N - S - U) \quad (24)$$

Δx parametresi, ilişkili ağırlık esneklik katsayısına göre ağırlık kümesine uygulanan değişiklik miktarını temsil eder. Δx değişkeninin sınırı, parametrik durum için aşağıdaki (25) numaralı Eşitsizlik kullanılarak hesaplanabilir:

$$-w_s^0 \leq \Delta x \leq \min \frac{w_i^0}{\alpha_i}, \quad \forall i \in I \quad (25)$$

Duyarlılık ağırlığındaki değişikliğin sınırı, Denklem (26) ile de ayarlanabilir.

$$-w_s^0 \leq \Delta x \leq \sum_{i \in I} w_i^0 \quad (26)$$

Karar verici duyarlılık analizi için ayarlanan parametrelere göre yeni ağırlıkları hesaplar. Yeni ağırlıklar Denklem (27), (28) ve (29) kullanılarak hesaplanabilir.

$$w_s = w_s^0 + \alpha_s \Delta x \quad s \in S \quad (27)$$

$$w_i = w_i^0 - \alpha_i \Delta x \quad i \in I \quad (28)$$

$$w_u = w_u^0 + \alpha_u \Delta x \quad u \in SU \quad (29)$$

Tablo 9. Senaryolara göre yeni kriter ağırlıkları

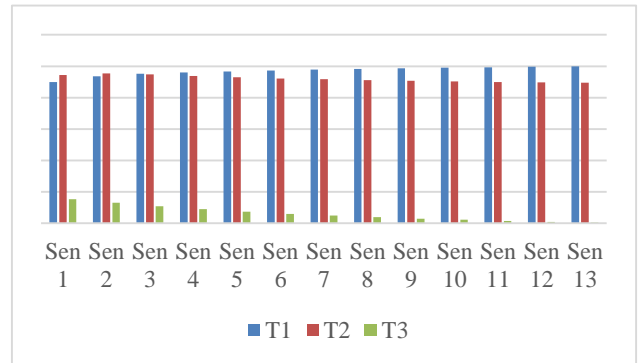
Senaryolar	K1	K2	K3	K4	K5
	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
Senerayo-1	0.0734	0.0890	0.1300	0.0818	0.0000
Senerayo-2	0.0675	0.0819	0.1196	0.0753	0.0800
Senerayo-3	0.0617	0.0748	0.1092	0.0687	0.1600
Senerayo-4	0.0558	0.0677	0.0988	0.0622	0.2400
Senerayo-5	0.0499	0.0606	0.0884	0.0556	0.3200
Senerayo-6	0.0440	0.0534	0.0780	0.0491	0.4000
Senerayo-7	0.0382	0.0463	0.0676	0.0426	0.4800
Senerayo-8	0.0323	0.0392	0.0572	0.0360	0.5600
Senerayo-9	0.0264	0.0321	0.0468	0.0295	0.6400
Senerayo-10	0.0206	0.0249	0.0364	0.0229	0.7200
Senerayo-11	0.0147	0.0178	0.0260	0.0164	0.8000
Senerayo-12	0.0088	0.0107	0.0156	0.0098	0.8800
Senerayo-13	0.0029	0.0036	0.0052	0.0033	0.9600

Tablo 9. Senaryolara göre yeni kriter ağırlıkları (devam)

Senaryolar	K6	K7	K8	K9	K10
	w_6	w_7	w_8	w_9	w_{10}
Senerayo-1	0.1035	0.0782	0.1745	0.1239	0.1456
Senerayo-2	0.0952	0.0720	0.1605	0.1140	0.1340
Senerayo-3	0.0869	0.0657	0.1466	0.1041	0.1223
Senerayo-4	0.0787	0.0594	0.1326	0.0942	0.1107
Senerayo-5	0.0704	0.0532	0.1187	0.0843	0.0990
Senerayo-6	0.0621	0.0469	0.1047	0.0744	0.0874
Senerayo-7	0.0538	0.0407	0.0907	0.0645	0.0757
Senerayo-8	0.0455	0.0344	0.0768	0.0545	0.0641
Senerayo-9	0.0373	0.0282	0.0628	0.0446	0.0524
Senerayo-10	0.0290	0.0219	0.0489	0.0347	0.0408
Senerayo-11	0.0207	0.0156	0.0349	0.0248	0.0291
Senerayo-12	0.0124	0.0094	0.0209	0.0149	0.0175
Senerayo-13	0.0041	0.0031	0.0070	0.0050	0.0058

3.1.6 Senaryolara göre EDAS uygulaması

EDAS yönteminin Tablo 9'da verilen yeniden düzenlenmiş kriter ağırlıklarına göre uygulanması neticesinde Tablo 10'da gösterilen sıralamalar elde edilmiştir. Tablo 10 ve Şekil 3 birlikte incelendiğinde tedarikçilerin sıralamalarında sadece 1. ve 2. senaryolarda sıralamanın değiştiği görülmektedir. 3. senaryodan itibaren senaryosuz uygulama neticesinde görüldüğü gibi sıralama T1>T2>T3 şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Senaryolara göre EDAS yöntemi uygulanması

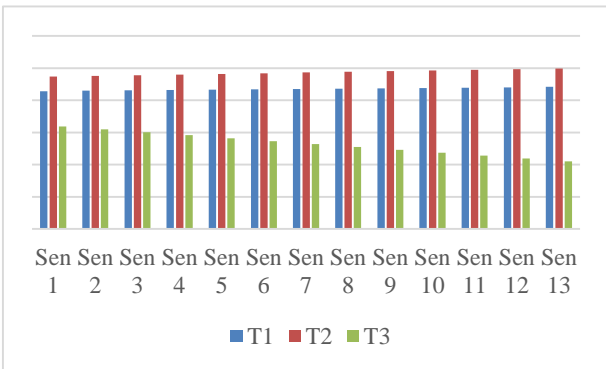
Tablo 10. Senaryolara göre EDAS yöntemi uygulaması

Senaryolar	T1	T2	T3
Orijinal	0.953	0.946	0.106
Sıralama	1	2	3
Senerayo-1	0.899	0.944	0.152
Sıralama	2	1	3
Senerayo-2	0.935	0.954	0.130
Sıralama	2	1	3
Senerayo-3	0.952	0.948	0.108
Sıralama	1	2	3
Senerayo-4	0.960	0.938	0.089
Sıralama	1	2	3
Senerayo-5	0.967	0.929	0.073
Sıralama	1	2	3
Senerayo-6	0.973	0.922	0.059
Sıralama	1	2	3
Senerayo-7	0.978	0.916	0.047
Sıralama	1	2	3
Senerayo-8	0.983	0.911	0.037
Sıralama	1	2	3
Senerayo-9	0.987	0.907	0.029
Sıralama	1	2	3
Senerayo-10	0.990	0.903	0.021
Sıralama	1	2	3
Senerayo-11	0.993	0.900	0.014
Sıralama	1	2	3
Senerayo-12	0.996	0.897	0.008
Sıralama	1	2	3
Senerayo-13	0.999	0.894	0.003
Sıralama	1	2	3

3.1.7 Senaryolara göre WASPAS uygulaması

WASPAS yönteminin Tablo 9’da verilen yeniden düzenlenmiş kriter değerlerine göre uygulanması neticesinde Tablo 11’de gösterilen sıralamalar elde edilmiştir. Tablo 11 ve Şekil 4 birlikte incelendiğinde tedarikçilerin sıralamalarında hiçbir değişiklik olmadığı görülmektedir. Senaryolu ve senaryosuz (orijinal) uygulamalar neticesinde görüldüğü gibi sıralama $T2 > T1 > T3$ şeklinde gerçekleşmiştir.

WASPAS uygulaması neticesinde çıkan sonuçların senaryolu EDAS uygulamasının ilk iki senaryosu ile örtüştüğü görülmektedir. Netice itibariyle her iki yöntemin uygulanması neticesinde senaryolu ve senaryosuz analizler arasında anlamlı bir fark olmadığı ortaya konmuştur.



Şekil 4. Senaryolara göre WASPAS yöntemi uygulaması

Tablo 11. Senaryolara göre WASPAS yöntemi uygulaması

Senaryolar	T1	T2	T3
Orijinal	0.965	0.989	0.900
Sıralama	2	1	3
Senerayo-1	0.964	0.987	0.909
Sıralama	2	1	3
Senerayo-2	0.965	0.988	0.905
Sıralama	2	1	3
Senerayo-3	0.965	0.989	0.900
Sıralama	2	1	3
Senerayo-4	0.966	0.990	0.896
Sıralama	2	1	3
Senerayo-5	0.966	0.991	0.891
Sıralama	2	1	3
Senerayo-6	0.967	0.992	0.887
Sıralama	2	1	3
Senerayo-7	0.967	0.993	0.882
Sıralama	2	1	3
Senerayo-8	0.968	0.994	0.878
Sıralama	2	1	3
Senerayo-9	0.969	0.995	0.873
Sıralama	2	1	3
Senerayo-10	0.969	0.996	0.869
Sıralama	2	1	3
Senerayo-11	0.970	0.997	0.864
Sıralama	2	1	3
Senerayo-12	0.970	0.998	0.860
Sıralama	2	1	3
Senerayo-13	0.971	0.999	0.855
Sıralama	2	1	3

4 Sonuçlar

Vücudumuzun diğer organlarında olduğu gibi omurgamızda da zaman zaman farklı sebeplerden ötürü hasarlar meydana gelebilmektedir. İşte bu hasarların tedavi edilmesi için vida, çubuk, kanca, plaka ve kafes gibi tıbbi malzemelere ihtiyaç duyulabilmektedir. Sağlık kuruluşları, belirtilen bu malzemeleri miktar, kalite, fiyat, zaman ve hizmet gibi temel faktörleri dikkate alarak en uygun şekilde tedarik etmek durumundadır. Sağlık kuruluşlarının ve uzman hekimlerin performansını, kendi kabiliyetlerinin yanısıra tedarikçi firmanın gösterdiği performans da etkilemektedir.

Bu çalışma ile bir vakıf üniversitesi hastanesi beyin-sinir cerrahisi bölümünün ameliyatlarda kullanacağı malzeme ihtiyaçlarını temin etmek amacıyla literatür incelemesi ve öğretim elemanları görüşleri doğrultusunda tespit edilen on kritere göre üç adet tedarikçi firma analiz edilmiştir. Kriter ağırlıkları, öğretim elemanlarının kriterleri önemine göre yaptığı sıralamalar neticesinde SWARA yöntemi ile

hesaplanmıştır. Yöntemin uygulanması neticesinde 0.169 ile K5 kriteri en önemli ölçüt olmuştur. K5 kriterini K8 ve K10 takip etmiştir. En son sırada ise K1 yer almıştır. Kriterlerin önem sıralaması $K5 > K8 > K10 > K3 > K9 > K6 > K2 > K4 > K7 > K1$ şeklinde gerçekleşmiştir. Üç tedarikçi firma, öğretim elemanlarından oluşan dört kişilik karar vericiler tarafından belirlenen kriter ağırlıkları dikkate alınarak puanlanmıştır. Değerlendirme sürecinde 1-10 arası puanlama ölçeği kullanılmıştır. Ortaya çıkan veriler EDAS ve WASPAS yöntemi ile analiz edilmiştir. Neticede en uygun tedarikçi firmanın EDAS uygulamasına göre T1, WASPAS uygulamasına göre ise T2 olduğu belirlenmiştir. Her iki yöntemin uygulanmasında T3 tedarikçisi son sıralarda yer almıştır. EDAS uygulamasına göre tedarikçilerin sıralaması $T1 > T2 > T3$ şeklinde olurken WASPAS uygulamasında $T2 > T1 > T3$ şeklinde gerçekleşmiştir.

Bu çalışmada çok kapsamlı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Kriter değerleri Kahraman'ın [99] önerdiği yöneme göre yeniden düzenlenmiş ve senaryo olarak adlandırılan 13 farklı kriter ağırlık vektörü ortaya çıkmıştır. EDAS uygulamasına göre ilk iki senaryonun dışında sıralama değişmemiştir. WASPAS uygulamasında da orijinal kriter ağırlıkları ile çıkan sonuçlardan farklı bir sıralama olmamıştır.

Bu ve benzeri konular üzerinde araştırmacılar tarafından yapılacak çalışmalarda AAS, MOORA, AHS, ARAS gibi çok farklı yöntemler kullanılabilir ve çıkan sonuçlar yapılan bu çalışma ile karşılaştırılabilir. Ayrıca sağlık kuruluşunun stratejisi doğrultusunda kriterler yeniden düzenlenebilir veya yeni kriterler analize dahil edilebilir. Kriter ağırlıkları SWARA yerine AHS, BWM gibi farklı metotlarla da hesaplanabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] G. W. Dickson, An analysis of vendor selection systems and decisions, *Journal of Purchasing* 2, 1, 5-17, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1745493X.1966.tb00818.x>
- [2] J. Chai, J.N.K. Liu and E.W.T Ngal, Application of Decision Making Techniques In Supplier Selection: A Systematic Review of Literature, *Experts Systems with Applications*, 40, 3872–3885, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>
- [3] L.Z. Tong, Wang, J. and Z. Pu, Sustainable supplier selection for SMEs based on an extended PROMETHEE II approach. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129830, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129830>
- [4] R. Baki, An Integrated Multi-criteria Structural Equation Model for Green Supplier Selection. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-14, 2022. <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00415-7>
- [5] V. Kaushik, A. Kumar, H. Gupta, H. And G. Dixit, A hybrid decision model for supplier selection in Online Fashion Retail (OFR). *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25, 1, 27-51, 2022. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1791810>
- [6] S. A. Hoseini, S. Hashemkhani Zolfani, P. Skačkauskas, A. Fallahpour and S. Saberi, A Combined Interval Type-2 Fuzzy MCDM Framework for the Resilient Supplier Selection Problem. *Mathematics*, 10, 1, 44, 2022. <https://doi.org/10.3390/math10010044>
- [7] A. G. Savaşkan, M. Deste and Ş. Ekinçi, Kayısı Sektöründeki İşletmelerde Bulanık TOPSİS İle Tedarikçi Seçimi. *Sakarya İktisat Dergisi*, 10(4), 449-466, 2021.
- [8] A. Afrasiabi, M. Tavana and D. Di Caprio, An extended hybrid fuzzy multi-criteria decision model for sustainable and resilient supplier selection. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-24, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17851-2>
- [9] S. Aouadni and J. Euchı, Using Integrated MMD-TOPSIS to Solve the Supplier Selection and Fair Order Allocation Problem: A Tunisian Case Study. *Logistics*, 6, 1, 8, 2022. <https://doi.org/10.3390/logistics6010008>
- [10] A. Mohammed, M. Yazdani, A. Oukil, E. S. Gonzalez, A Hybrid MCDM Approach towards Resilient Sourcing. *Sustainability* 13, 2695, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13052695>
- [11] V. T. Nguyen, N. H. Hai and N. T. K. Lan, Spherical Fuzzy Multicriteria Decision-Making Model for Wind Turbine Supplier Selection in a Renewable Energy Project. *Energies*, 15, 3, 713, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15030713>
- [12] M. Yazdani, D. Pamucar, P. Chatterjee and A. E. Torkayesh, A multi-tier sustainable food supplier selection model under uncertainty. *Operations Management Research*, 1-30, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00186-z>
- [13] H. Lau, P. K. Shum, D. Nakandala, Y. Fan and C. Lee, A game theoretic decision model for organic food supplier evaluation in the global supply chains. *J Clean Prod* 242:118536, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118536>
- [14] Y. K. Fu, An integrated approach to catering supplier selection using AHP-ARAS-MCGP methodology. *J Air Transp Manag* 75, 164–169, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.01.011>
- [15] C. Wu, Y. Lin and D. Barnes, An integrated decision-making approach for sustainable supplier selection in the chemical industry. *Expert Systems with Applications*, 184, 115553, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115553>
- [16] P. Liu, X. Wang, P. Wang, F. Wang and F. Teng, Sustainable medical supplier selection based on multi-granularity probabilistic linguistic term sets. *Technological and Economic Development of Economy*, 1-38, 2022. <https://doi.org/10.3846/tede.2022.15940>

- [17] N. Ö. Doğan H. Akbal, Sağlık sektöründe tedarikçi seçim kararının ahp yöntemi ile incelenmesi: bir üniversite hastanesi Örneği. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 17, 4, 440-456. 2019. <https://doi.org/10.18026/cbayarsos.664380>
- [18] Z. Stević, D. Pamučar, A. Puška and P. Chatterjee P, Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution (MARCOS). *Comput Ind Eng* 140, 106231, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>
- [19] S. J. Miah, K. Ahsan, and K. A. B. Msimangira, An Approach of purchasing decision support in healthcare supply chain management. *Operations and Supply Chain Management*, 6(2), 43–53. 2013. <http://doi.org/10.31387/oscm0140087>
- [20] G. Mehralian, A. R. Gatari, M. Morakabati, M. and H. Vatanpoura, Developing a suitable model for supplier selection based on supply chain risks: An empirical study from Iranian. *Pharmaceutical Companies. Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 11(1), 209–219, 2012.
- [21] S. G. Fashoto, B. Akinnuwesi, O. Owolabi, and D. Adelekan, Decision support model for supplier selection in healthcare service delivery using analytical hierarchy process and artificial neural network. *African Journal of Business Management*, 10(9), 209–232, 2016. doi: 10.5897/AJBM2016.8030
- [22] A. Ahmadi, M. S. Pishvae and S. A. Torabi, Procurement management in healthcare systems. *Operations Research Applications in Health Care Management*, 569–598, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65455-3_22
- [23] M. Bahadori, S. M. Hosseini, E. Teymourzadeh, R. Ravangard, M. Raadabadi and K. Alimohammadzadeh, A supplier selection model for hospitals using a combination of artificial neural network and fuzzy VIKOR. *International Journal of Healthcare Management*, 13(4), 286-294, 2020. <https://doi.org/10.1080/20479700.2017.1404730>
- [24] P. Ishtiaq, S. A. Khan and M. U. Haq, A multi-criteria decision-making approach to rank supplier selection criteria for hospital waste management: A case from Pakistan. *Waste Management & Research*, 36(4), 386-394, 2018. <https://doi.org/10.1177/0734242X18755894>
- [25] N. Pourghahreman and A. Qhatari, Supplier selection in an agent based pharmaceutical supply chain: An application of TOPSIS and PROMETHEE II. *Uncertain Supply Chain Management*, 3(3), 231-240, 2015. <http://dx.doi.org/10.5267/j.uscm.2015.4.001>
- [26] A. Alinezad, A., A. Seif and N. Esfandiari, Supplier evaluation and selection with QFD and FAHP in a pharmaceutical company. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(1–4), 355–364, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-0134733-3>
- [27] I. Badi and M. Ballem, Supplier selection using the rough BWM-MAIRCA model: A case study in pharmaceutical supplying in Libya. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(2), 16–33, 2018. <https://doi.org/10.31181/dmame1802016b>
- [28] D. Pramanik, S. C. Mondal and A. Haldar, Resilient supplier selection to mitigate uncertainty: Soft-computing approach. *J. Model. Manag.*, 15, 1339–1361, 2020. <http://dx.doi.org/10.1108/JM2-01-2019-0027>
- [29] L. Xiong, S. Zhong, S. Liu, X. Zhang and Y. Li, An Approach for Resilient-Green Supplier Selection Based on WASPAS, BWM, and TOPSIS under Intuitionistic Fuzzy Sets. *Math. Probl. Eng.*, 1–18, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1761893>
- [30] M. Hasan, D. Jiang, A. S. Ullah, N. E. Alam, Resilient supplier selection in logistics 4.0 with heterogeneous information. *Expert Syst. Appl.*, 139, 112799, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.07.016>
- [31] A. Mohammed, Towards ‘gresilient’ supply chain management: A quantitative study. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104641, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104641>
- [32] A. Z. Piprani, N. I. Jaafar and S. M. Ali, Prioritizing resilient capability factors of dealing with supply chain disruptions: An analytical hierarchy process (AHP) application in the textile industry. *Benchmarking Int. J.*, 27, 2537–2563, 2020. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2019-0111>
- [33] S. V. Parkouhi, A. S. Ghadikolaei and H. F. Lajimi, Resilient supplier selection and segmentation in grey environment. *J. Clean. Prod.* 207, 1123–1137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.007>
- [34] R. Davoudabadi, S. M. Mousav and E. Sharifiba, An integrated weighting and ranking model based on entropy, DEA and PCA considering two aggregation approaches for resilient supplier selection problem. *J. Comput. Sci.* 40, 101074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.101074>
- [35] A. Amindoust, A resilient-sustainable based supplier selection model using a hybrid. *Comput. Ind. Eng.*, 126, 122–135, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.09.031>
- [36] D. Pramanik, A. Haldar, S. C. Mondal, S. K. Naskar and A. Ray. Resilient supplier selection using AHP-TOPSIS-QFD under a fuzzy environment. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.*, 12, 1–10, 2016. <https://doi.org/10.1080/17509653.2015.1101719>
- [37] S. PrasannaVenkatesan and M. Goh, Multi-objective supplier selection and order allocation under disruption risk. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 124-142, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.09.005>
- [38] A. K. Sahu, S. Datta and S. Mahapatra, Evaluation and selection of resilient suppliers in fuzzy environment Exploration of Fuzzy VIKOR. *Benchmarking Int. J.*, 23, 651–673, 2016. <https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2014-0109>
- [39] A. Haldar, A. Ray, D. Banerjee and S. Ghosh, A hybrid MCDM model for resilient supplier selection. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.*, 7, 284–292, 2013. <https://doi.org/10.1080/17509653.2012.10671234>

- [40] S. Vinodh, R. Anesh Ramiya and S. Gautham, Application of fuzzy analytic network process for supplier selection in a manufacturing organization. *Expert Syst. Appl.*, 38, 272–280, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.057>
- [41] A. Kumar, V. Jain and S. Kumar, A comprehensive environment friendly approach for supplier selection. *Omega* 42, 1, 109–123, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.04.003>
- [42] R. J. Girubha and S. Vinodh, Application of fuzzy VIKOR and environmental impact analysis for material selection of an automotive component, *Materials & Design*, 37, 478–486, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.022>
- [43] X. Sang and X. Liu, An interval type-2 fuzzy sets-based TODIM method and its application to green supplier selection. *J Oper Res Soc* 67, 5, 722–734, 2016. <https://doi.org/10.1057/jors.2015.86>
- [44] H. Shabanpour H, S. Yousef and R. F. Saen, Future planning for benchmarking and ranking sustainable suppliers using goal programming and robust double frontiers DEA. *Transp Res Part D: Transp Environ* 50, 129–143, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.022>
- [45] C. M. Su, D. J. Horng, M. L. Tseng, A. S. Chiu, K. J. Wu and H. P. Chen, Improving sustainable supply chain management using a novel hierarchical grey-DEMATEL approach. *J Clean Prod* 134, 469–481, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.080>
- [46] A. Fallahpour, E. U. Olugu, S. N. Musa, K. Y. Wong and S. Noori, A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management. *Comput Ind Eng* 105, 391–410, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.01.005>
- [47] S. Luthra, K. Govindan, D. Kannan, S. K. Mangla and C. P. Garg, An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. *J Clean Prod* 140, 1686–1698, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078>
- [48] W. Song, Z. Xu and H. C. Liu, Developing sustainable supplier selection criteria for solar air-conditioner manufacturer: An integrated approach. *Renew Sustain Energy Rev* 79, 1461–1471, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.081>
- [49] M. Abdel-Basset, G. Manogaran, A. Gamal and F. Smarandache, A hybrid approach of neutrosophic sets and DEMATEL method for developing supplier selection criteria. *Design Automation for Embedded Systems*, 22, 3, 257–278, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10617-018-9203-6>
- [50] A. Awasthi, K. Govindan and S. Gold, Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *Int J Prod Econ* 195, 106–117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.013>
- [51] A. Azimifard, S. H. Moosavirad and S. Ariafar, Selecting sustainable supplier countries for Iran's steel industry at three levels by using AHP and TOPSIS methods. *Resour Policy* 57, 30–44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.002>
- [52] H. Lu, S. Jiang, W. Song and X. Ming, A Rough Multi-Criteria Decision-Making Approach for Sustainable Supplier Selection under Vague Environment. *Sustainability* 10, 8, 2622, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10082622>
- [53] Y. Song and G. Li, A large-scale group decision-making with incomplete multi-granular probabilistic linguistic term sets and its application in sustainable supplier selection. *J Oper Res Soc* 1–15, 2018. <https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1458017>
- [54] S. A. R. Khan, Y. Zhang, M. Anees, H. Golpîra, A. Lahmar and D. Qianli, Green supply chain management, economic growth and environment: A GMM based evidence. *J Clean Prod* 185, 588–599, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.226>
- [55] M. Abdel -Baset, V. Chang, A. Gamal and F. Smarandache, An integrated neutrosophic ANP and VIKOR method for achieving sustainable supplier selection: A case study in importing field. *Comput Ind* 106, 94–110, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.017>
- [56] R. Alikhani, S. A. Torabi and N. Altay, Strategic supplier selection under sustainability and risk criteria. *Int J Prod Econ* 208, 69–82, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.018>
- [57] K. Rashidi and K. Cullinane, A comparison of fuzzy DEA and fuzzy TOPSIS in sustainable supplier selection: Implications for sourcing strategy. *Expert Syst Appl* 121, 266–281, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.025>
- [58] L. Fei, Y. Deng and Y. Hu, DS-VIKOR: A new multi-criteria decision-making method for supplier selection. *Int J Fuzzy Syst* 21, 1, 157–175, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40815-018-0543-y>
- [59] S. H. Zolfani and P. Chatterjee, Comparative evaluation of sustainable design based on Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and Best Worst Method (BWM) methods: a perspective on household furnishing materials. *Symmetry* 11, 1, 74, 2019. <https://doi.org/10.3390/sym11010074>
- [60] N. Jain, A. R. Singh and R. K. Upadhyay, Sustainable supplier selection under attractive criteria through FIS and integrated fuzzy MCDM techniques. *Int J Sustain Eng*, 1–22, 2020. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1737751>
- [61] B. D. Rouyendegh, A. Yildizbasi and P. Üstünyer, Intuitionistic fuzzy TOPSIS method for green supplier selection problem. *Soft Comput* 24,3,2215–2228,2020. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04054-8>
- [62] T. C. Wen, K. H. Chang and H. H. Lai, Integrating the 2-tuple linguistic representation and soft set to solve supplier selection problems with incomplete information. *Eng Appl Artif Intell* 87,103248, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103248>
- [63] F. Ecer and D. Pamucar, Sustainable supplier selection: A novel integrated fuzzy best worst method (F-BWM) and fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) multi-

- criteria model. *J Clean Prod* 266, 121981. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121981>
- [64] M. Yazdani, P. Chatterjee and A. E. Torkayesh, An Integrated AHPQFD-Based Compromise Ranking Model for Sustainable Supplier Selection. In *Handbook of Research on Interdisciplinary Approaches to Decision Making for Sustainable supply chains*, 32–54, IGI Globa, 2020. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9570-0>
- [65] M. Yazdani, P. Zarate, E. Kazimieras Zavadskas and Z. Turskis, A Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Manag Decis* 57, 9, 2501–2519, 2019. <https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458>
- [66] D. Stanujkic, D. Karabasevic and E. K. Zavadskas, A framework for the selection of a packaging design based on the SWARA method, *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 26, 2, 181-187, 2015. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.26.2.8820>
- [67] A. Özbek, Çok kriterli karar verme yöntemleri ve Excel ile problem çözümü, Seçkin Yayıncılık, 3. Baskı, Ankara, 2021.
- [68] S. Chakraborty and E.K. Zavadskas, Applications of WASPAS method in manufacturing decision making, *Informatica*, 25, 1, 1–20, 2014.
- [69] V. Keršulienė and Z. Turskis, Integrated Fuzzy Multiple Criteria Decision Making Model For Architect Selection, *Technological And Economic Development Of Economy*, 17,4, 645-666, 2011. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.635718>
- [70] A. Özbek ve E. Erol, AHS ve SWARA Yöntemleri İle Yem Sektöründe İş Sağlığı Ve Güvenliği Kriterlerinin Ağırlıklandırılması, *AKÜ İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20, 2, 51-66, 2018. <https://doi.org/10.33707/akuiibfd.451969>
- [71] A. Özbek, BİST'te İşlem Gören Faktoring Şirketlerinin Mali Yapılarının Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Değerlendirilmesi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi İ.İ.B.F Yönetim Ve Ekonomi Dergisi*, 25, 1, 29-53, 2018a. <https://doi.org/10.18657/yonveek.306188>
- [72] A. Özbek, Fortune 500 Listesinde Yer Alan Lojistik Firmaların Değerlendirilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20, 1, 13-26, 2018b.
- [73] S. H. Zolfani, E. K. Zavadskas and Z. Turskis, Design Of Products With Both International And Local Perspectives Based On Yin-Yang Balance Theory And SWARA Method, *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 26,2, 153-166, 2013. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2013.11517613>
- [74] M. Alimardani, S. Hashemkhani Zolfani, M. H. Aghdaie and J. Tamošaitienė, A novel hybrid SWARA and VIKOR methodology for supplier selection in an agile environment. *Technological and economic development of economy*, 19, 3, 533-548, 2013. <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2013.814606>
- [75] E. A. Adalı ve A. T. Işık, Bir Tedarikçi Seçim Problemi için SWARA ve WASPAS Yöntemlerine Dayanan Karar Verme Yaklaşımı, *International Review of Economics and Management*, 5,4, 56-77, 2017. <https://doi.org/10.18825/iremjournal.335408>
- [76] J. Heidary Dahooie, E. Beheshti Jazan Abadi, A. S. Vanaki and H. R. Firoozfar, Competency-based IT personnel selection using a hybrid SWARA and ARAS-G methodology. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28, 1, 5-16, 2018. <https://doi.org/10.1002/hfm.20713>
- [77] E. Çakır, Kentsel Dönüşüm Kapsamında Müteahhit Firmanın SWARA–Gri İlişkisel Analiz Yöntemiyle Seçilmesi, *The Journal Of International Scientific Researches*, 2, 6, 79-95, 2017.
- [78] D. Karabašević, D. Stanujkić, S. Urošević and M. Maksimović, An Approach To Personnels Election Based On SWARA And WASPAS Methods, *Bizinfo (Blace) Journal Of Economics, Management and Informatics*, 7, 1, 1-11, 2016. <https://doi.org/10.5937/bizinfo1601001K>
- [79] S. H. Zolfani and S. S. A. Banihashemi, Personnel Selection Based On A Novel Model Of Game Theory And MCDM Approaches, In *Proc Of 8th International Scientific Conference Business And Management*, 191-198, 2014. <https://doi.org/10.3846/bm.2014.024>
- [80] A. Özbek ve İ. Demirkol, Lojistik sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin SWARA ve GİA yöntemleri ile analizi. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8, 1, 71-86, 2018.
- [81] S. H Zolfani, M. H. Aghdaie, A. Derakhti, E. K. Zavadskas and M. H. M. Varzandeh, Decision making on business issues with foresight perspective; an application of new hyrid MCDM model in shopping mall locating. *Expert systems with applications*, 40, 17, 7111-7121, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.040>
- [82] A. Ruzgys, R. Volvačiovas, Čignatavičius amd Z. Turskis, Integrated evaluation of external wall insulation in residential buildings using SWARATODIM MCDM method. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, 1, 103-110, 2014. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.843585>
- [83] M. Keshavarz Ghorabae, E. K. Zavadskas, L. Olfat ve Z. Turskis, Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS). *Informatica*, 26,3, 435-451, 2015.
- [84] A. Özbek, Türkiye'deki İllerin EDAS ve WASPAS Yöntemleri İle Yaşanabilirlik Kriterlerine Göre Sıralanması, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 9, 1, 2019.
- [85] S. Lashgari, J. Antuchevičienė, A. Delavari and O. Kheirkhah, Using QSPM and WASPAS methods for determining outsourcing strategies, *Journal of Business Economics and Management*, 15, 4, 729-743, 2014. <https://doi.org/10.3846/16111699.2014.908789>
- [86] E. K. Zavadskas, J. Antuchevičienė, J. Šaparauskas and Z. Turskis, Multi-criteria assessment of facades' alternatives: Peculiarities of ranking methodology, *Procedia Engineering* 57, 107–112, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.016>

- [87] Z. Turskis, E. K. Zavadskas, J. Antucheviciene and N. Kosareva, A hybrid model based on fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for construction site selection. *International Journal of Computers Communications & Control*, 10, 6, 113-128, 2015.
- [88] M. K. Ghorabae, E. K. Zavadskas, M. Amiri and A. Esmaili, Multi-criteria evaluation of green suppliers using an extended WASPAS method with interval type-2 fuzzy sets, *Journal of Cleaner Production*, 137, 213-229, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.031>
- [89] G. Stojić, Ž. Stević, J. Antuchevičienė, D. Pamučar and M. Vasiljević, A Novel Rough WASPAS Approach for Supplier Selection in a Company Manufacturing PVC Carpentry Products. *Information*, 9, 5, 121, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/info9050121>
- [90] T. Dėjus and J. Antuchevičienė, Assessment of health and safety solutions at a construction site, *Journal of Civil Engineering and Management*, 19, 5, 728-737, 2013. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.812578>
- [91] P. Karande, E.K. Zavadskas and S. Chakraborty, A study on the ranking performance of some MCDM methods for industrial robot selection problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7, 3, 399-42, 2016. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2016.1.001>
- [92] V. G. Venkatesh., R. Dubey, P. Joy, M. Thomas, V. Vijeesh and A. Moosa, Supplier selection in blood bags manufacturing industry using TOPSIS model. *International Journal of Operational Research*, 24(4), 461, 2015.
- [93] M. Palanisamy and R. Ranganathan, An Efficient supplier selection Model for Hospital Pharmacy through Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS. *International Journal of Services and Operations Management* 33(4), 468-493,2019.
- [94] A. Forghani, S. J. Sadjadi, and B. Farhang Moghadam, B., A supplier selection model in pharmaceutical supply chain using PCA, Z-TOPSIS and MILP: A case study. *PloS one*, 13(8), 2018. e0201604. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201604>
- [95] K. Kirytopoulos, V. Leopoulos and D. Voulgaridou, Supplier selection in pharmaceutical industry. Benchmarking: An International Journal, 15(4), 494–516,2008. <https://doi.org/10.1108/14635770810887267>
- [96] C. I. Enyinda, E. Dunu and J. Bell-Hanyes, A model for quantifying strategic supplier selection: Evidence from a generic pharmaceutical firm supply chain. *International Journal of Business, Marketing, and Decision Sciences*, 3(2), 25–44, 2010.
- [97] B. E. Rouyendegh and T. E. Saputro, Supplier selection using integrated fuzzy TOPSIS and MCGP: A case study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 116, 3957–3970, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.874>
- [98] E. K. Zavadskas, Z. Turskis, J. Antucheviciene and A. Zakarevicius, Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika ir elektrotechnika*, 122(6), 3-6, 2012. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>
- [99] Y. R. Kahraman, Robust sensitivity analysis for multi-attribute deterministic hierarchical value models. *Air Force Inst of Tech Wright-Patterson afb OH*, 2002.





Geleneksel et üretimi ve tüketimine alternatif: Et analogları

Alternative to traditional meat production and consumption: Meat analogues

İbrahim Ender Künili¹ , Selin Özge Dinç^{2,*} , Fatma Çolakoğlu³ 

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Fakültesi, Su Ürünleri Avlama ve İşleme Teknolojisi Bölümü, Türkiye
^{2,3} Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Gıda Teknolojisi Bölümü, Türkiye

Öz

Son yıllarda popülaritesi artan ve yeni ürün grupları arasında yer alan et analogları, çoğunlukla bitkisel proteinlerin hammadde olarak kullanıldığı ve son ürüne eti andıran formun kazandırılmasına dayalı ürünlerdir. Et analogları üretiminde baklagillerden yağlı tohumlara, buğdaydan alglere kadar birçok bitkisel kaynak hammadde olarak kullanılabilen, hammadde özelliklerine göre aroma arttırıcı ve renk verici gibi katkı ilavesi yapılarak ürüne istenilen özellikler kazandırılmaktadır. Nihai ürün formunda et benzeri özellikler elde etmek için tüm hammaddeler ve katkı maddeleri geleneksel ve/veya modern işleme teknikleri ile işlenir. Bu işleme teknikleri arasında ekstrüzyon, yaygın olarak kullanılan ve kabul edilen bir yöntem olarak bilinmektedir. Et analoglarının hayvansal ürünlere ikame olarak tüketici tarafındaki kabul edilebilirliği, hammadde ve katkı ile kullanılan üretim tekniğinin ürüne kazandırdığı kalite özelliklerine göre şekillenmektedir. Yakın gelecekte et analoglarının tüketim alışkanlıklarında yaygın yer bulacağı öngörülmektedir. Bu nedenle, üretime katılan bileşenler üzerine araştırmaların artması, üretim teknolojilerinin kullanımının yaygınlaşması ve geliştirilmesi ile üretime yönelik yasal düzenlemelerin yapılması kaçınılmaz olacaktır. Bu çalışmada yeni bir gıda olarak et analogu ve kavramı, üretimin başlangıcından tüketici kabulüne kadar geniş bir perspektiften ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Bitkisel protein kaynakları, Et analogları, Et ikameleri, Üretim teknikleri, Tüketici algısı

1 Giriş

Hayvansal kaynaklara ikame ürünler, son yıllarda değişen yaşam şartları ve tüketici beklentileri doğrultusunda, diyetlerde daha çok yer almaya başlamıştır. Bu durumun başlıca nedenleri arasında doyuma ulaşmış tüketici gruplarının yeni ürün beklentileri ve vegan/vejetaryen beslenme tarzını benimsemiş tüketicilere yönelik ürün geliştirme çalışmaları yer almaktadır [1]. Bunun yanı sıra, artık hayatımızda var olan iklim değişiklikleri, hayvansal kaynaklı ürünlere karşı duyulan güvenlik endişeleri, sağlıklı beslenme eğilimleri ve artan nüfusla beraber artan protein ihtiyacına yönelik planlanan eylemler de alternatif kaynak arayışına hız kazandırmaktadır [2-7].

Abstract

Meat analogues are among the new trending product groups in recent years that are produced mainly with vegetable proteins as raw material and are based on giving the final product a form resembling meat. In the production of meat analogues, many vegetable sources from legumes to oilseeds, wheat to algae can be used as raw materials, and the desired properties are brought into the last product by adding additives, such as flavor enhancers and colorants according to the raw material. To obtain meat-like properties in the final product form, all raw materials and additives are processed with traditional and/or modern processing techniques. Among these processing techniques, extrusion is known as a widely used and accepted method. The acceptability of meat analogues as a substitute for animal products on the consumer side is shaped by the quality characteristics of the raw materials and additives as well as the method used in the production phase. It is predicted that meat analogues will have a widespread place in the consumption habits of consumers in the near future. For this reason, it will be inevitable to increase research on the components involved in the production, as well as expand and develop the use of production technologies, and make legal regulations for production. In this study, meat analogue as a novel food and its concept, from the beginning of production to consumer acceptance and their approaches were discussed from a wide perspective.

Keywords: Vegetable protein sources, Meat analogues, Meat substitutes, Production techniques, Consumer perception

Hayvansal ürünlere ikame olarak kullanılacak en önemli kaynak, bitkisel ürünlerdir. Bitkisel kaynaklar günümüzde farklı formları ile talep gören ürünlere dönüşmekte, et analogları veya et ikameleri olarak da bilinen şekliyle tüketim alışkanlıklarında yer almaya başlamaktadır. Et analogları; bitkisel kaynakların hammadde olarak kullanılabilirdiği, yardımcı katkı maddelerinin ilavesi ve farklı işleme yöntemleriyle işlenebilen et benzeri proteinli ürünlerdir [8]. Üretim sırasında baklagiller, yağlı tohumlar, buğday, mantarlar ve algler gibi birçok bitkisel hammadde ile birlikte farklı amaçlar ile yardımcı katkıları kullanılabilir. Üretim tekniği olarak ise hücre kültürü yöntemi, eğirme tekniği, ekstrüzyon, shear cell ve couette

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: selinozge.dinc@comu.edu.tr (S. Dinç)

Geliş / Received: 09.08.2022 Kabul / Accepted: 29.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1159590

hücre tekniği, dondurarak yapılandırma tekniği, 3D gıda yazıcısı, fermantasyon, hidrokolloidler ve bitki protein kombinasyonları kullanılabilir, son ürüne et benzeri duyu ve tekstürel özellikler verilerek et ikamesi ürün geliştirilebilmektedir [9]. Bu şekilde ortaya çıkan et analogları tüketici tarafında, kültürel yapıya bağlı olarak farklı düzeylerde kabul görebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda tüketici beğeni testlerinde, kabul ve beğeni oranlarının ürün özellikleri ve kültürel algıdan büyük ölçüde etkilendiği ortaya çıkmıştır [11]. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika'da et analogları tüketiminin vejeteryen tüketicilerin ötesine geçerek et seven tüketicileri de içine alacak şekilde genişlediği bildirilmektedir [10]. İster beslenme tarzı, isterse iklim değişikliğine bağlı artan kaygılar sonucu olsun, günümüz ve gelecekte bu ürünlerin sofralarda daha çok yer alacağı aşîkârdır. Dolayısıyla et analogları konusunda, hammadde ve yardımcı madde seçimi, üretim yöntemleri, standardizasyon çalışmaları, tüketici algısına yönelik çalışmalar ile piyasa araştırmalarının yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada ise, et analogları üretiminde kullanılan alternatif bitkisel kaynaklar ve özellikleri, yardımcı maddeler, üretim teknolojileri ve tüketicilerin et analoglarına yaklaşımları derlenmiştir.

2 Et analogları üretimi için alternatif protein kaynakları

Alternatif protein kaynağı arayışında, çevre dostu, sürdürülebilir, ön işleme tekniklerine minimum ihtiyaç duyan, protein içeriği açısından kaliteli ve et analogu olarak tüketim zevki veren hammaddeler ön plana çıkmaktadır. Bu arayış içerisinde ise hammadde seçiminde dikkat edilen en önemli özelliğin hammaddenin, protein ve aminoasit içeriği açısından hayvansal kaynaklar ile kıyaslanabilir durumda olmasıdır (Tablo 1). Gerek protein içeriği, gerek diğer özellikler yönünden bakıldığında günümüzde et analogları üretim çalışmaları kullanılan bitki türleri arasında buğday, pirinç, mısır, kanola, ayçiçeği, kolza tohumu, soya fasulyesi, lima fasulyesi, lupin, bezelye, nohut, yer fıstığı, kenevir, pamuk tohumu, mantarlar [8] ile özellikle yüksek ham protein oranlarıyla makro ve mikro algerin yer aldığı görülmektedir [11-13]. Ayrıca ticari olarak birçok bitkisel proteinin un, konsantre ve izolat formlarının üretildiği ve et analogu hammaddesi olarak kullanımlarının bulunduğu bildirilmektedir [9].

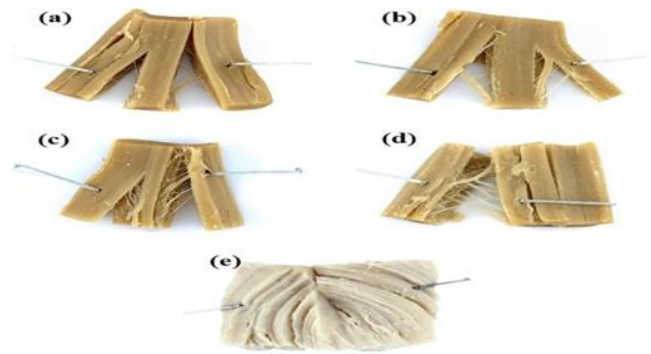
2.1 Soya

Soya içeriğindeki protein oranı, çeşidi ve karbonhidrat gibi diğer bileşenlerin miktarı açısından et analogları üretiminde yaygın kullanılmakta, bu bileşenler soya proteinlerinin en önemli seçilme nedeni olan fonksiyonel özelliklerini (jelleşme ve su tutma kapasitesi) etkilemektedir [14-18]. Soya proteini konsantrelerinin et analoguna işlenmesi sonucu elde edilen ürün; liflilik, sertlik derecesi, çignenebilirlik ve ağızda bıraktığı his itibari ile tavukgöğsünün yapısına benzer olarak ifade edilmiştir [19]. Abdullah vd. [20] tarafından yürütülen bir çalışmada soyadan elde edilen kıyma, burger eti, biftek, sucuk ve salam ürünleri geleneksel et ürünleri ile duyu açıdan kıyaslanmış ve soya et analoglarının duyu açıdan geleneksel ete benzer özellik gösterdiği bildirilmiştir. Ancak

soya protein ekstraktı, et analogları üretiminde ideal hammadde olarak yaygın kullanılsa da, alerjen potansiyeli taşıdığından popülerliğini yitirmektedir [8, 21].

2.2 Buğday gluteni

Buğday gluteni, protein ekstraksiyonunun kolay yapılabilir olması ve et analogları üretiminde önemli olan bağlayıcılık ve köpük oluşturma gibi fonksiyonel özellikleri ve son ürünlere fibriler yapı kazandırabilmesi ile ön plana çıkmaktadır (Şekil 1) [22-25]. Soya protein ürünlerinde, %30 oranında buğday gluteninin de yer alması, elde edilen ürünlere daha iyi tekstür, sertlik ve çignenebilirlik sağladığı ifade edilmektedir [19]. Ancak buğday gluteninin kullanımındaki en önemli sorun gluten alerjisi veya intoleransının toplum sağlığı açısından yarattığı endişedir [26].



Şekil 1. Farklı buğday gluten oranlarına sahip soya proteini konsantresi et analogları (a) %0 Buğday gluteni, (b) %10 Buğday gluteni, (c) %20 Buğday gluteni, (d) %30 Buğday gluteni ve (e) haşlanmış tavukgöğsü [19].

2.3 Yer fıstığı

Et analogları üretimi için kullanılan ve potansiyeli oldukça yüksek olan diğer bitkisel protein kaynaklarının başında ise yer fıstığı gelmektedir. Yer fıstığı unlarının protein içeriği yaklaşık %52, konsantrelerinin %78 ve izolatlarının protein içeriği ise %90'lara ulaşmaktadır [27]. Protein içeriğinin yanı sıra, soya protein ekstraktlarına eşdeğer emülsifiye, köpürme ve jelleşme özellikleri bulunması ve yüksek nem ekstrüzyonu ile işlenmesinin ardından ete benzer fibriler dokuların elde edilmesi, yer fıstığını et analoglarının üretiminde potansiyeli yüksek hammadde kaynağı yapmaktadır [28-30]. Rehrah vd. [28], yer fıstığı bazlı kıyma ürününe ait üç formülasyonu, bir ürün uygulamasında ticari bir soya bazlı kıyma ürününe karşı değerlendirmiştir. Araştırmacılar, yer fıstığı bazlı üç farklı formülasyondan elde edilen ürünlerin, ek aroma verici ve baharat ilavesi ile geliştirilmesinin ardından, ürün tatlarının tüketici tarafından daha kabul edilebilir olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak yer fıstığı soya ve buğday gluteni gibi gıda alerjisi olarak bilinmekte ve bu bileşenlerden herhangi birinin kullanımının, tüketiciye bağlı olarak et analoglarının kabul edilebilirliğini azaltabileceği bildirilmektedir [31].

2.4 Baklagiller

Bezelye, mercimek, bakla, nohut ve maş fasulyesi gibi ürünler et analogları üretimlerinde denenmiş, fasulye protein

ekstraktlarının et analogları üretiminde hem besleyicilik hem de fonksiyonel özellikler bakımından en çok tercih edilebilecek potansiyele sahip kaynaklar arasında sayılabileceği ifade edilmiştir [32-33]. Bununla birlikte, protein oranı arzu edilen seviyelerde olan fasulyenin ana protein kaynağı olarak kullanıldığı et analogu üretiminde son ürünün tekstürel yapısı arzu edilen seviyelere ulaşamamakta, genellikle, kıvam arttırıcı, jelleştirici, stabilize edici ve emülsiyon oluşturuca özelliklere sahip gıda hidrokolloidlerinin üretim sırasında ilavesine ihtiyaç duyulduğu bildirilmektedir [8, 34]. Bitkisel protein içeren hamburger geliştirmeyi amaçlayan bir çalışmada, mısır ve acı bakla bazlı bir karışım tasarlanarak, elde edilen ürün protein içeriği, kalitesi ve duyuşsal özellikleri değerlendirilmiştir. Ürünlerin geneli kesilmesi zor, sert, kuru, koyu kahverengi, homojen olmayan renk dağılımı gibi duyuşsal sonuçlar verirken, %50 kinoa ve %50 acı bakla içeren ürün duyuşsal değerlendirme ve protein sindirilebilirliği açısından en kabul edilebilir ürün olarak nitelendirilmiştir [35].

2.5 Tohumlar

Bitkisel tohumlar ve kanola, ayçiçeği gibi bitkiler özellikle yağ üretimi açısından önemli hammaddelerdir [36]. Bu yüzden, protein içeriği bakımından zengin olan posaların protein ekstraktı olarak kullanılması ve verimliliği birçok araştırmaya konu olmuştur [37-39]. Bu kaynaklar, sürdürülebilirlik ve kombine üretim ile atık değerlendirme esaslı kaynaklar olarak avantaja sahiptirler. Ayçiçeğinden ekstrakte edilen proteinlerin izolatlarının protein konsantrasyonları yaklaşık %95, unun protein içeriği yaklaşık %65 ve lifli konsantrasyonları ise yaklaşık %45 seviyelerine ulaşmaktadır [43]. Ayrıca bu proteinlerin, soya proteine benzer derecede su tutma, emülsifiye özelliği ve köpürme/hacim verme gibi fonksiyonel özelliklere sahip olduğu, sıcaklığa bağlı olarak iyi derecede jelleşme özelliği de gösterdiği ifade edilmektedir [44-46].

Ayçiçeğine benzer olarak, keten, kanola ve kenevir gibi diğer tohumlu bitkilerin protein izolatlarının da protein içeriği, temel ayrıştırma işlemlerinden sonra yaklaşık %90 seviyelerine ulaşmaktadır [47]. Bununla birlikte, modifiye edici katkıları ve polisakkarit karışımları takviyeleri ile artan jelleşme özellikleri, iyi derecedeki emülsifiye ve köpürme özellikleri ile şarküteri benzeri et analoglarının üretimi için uygun protein kaynakları olarak gösterilmektedir [48-51]. Farklı konsantrasyon bitki proteinlerinin (soya, bezelye, bakla, pirinç ve ayçiçeği) et emülsiyonu model sistemlerinde et yerine etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada, pirinç ve bakla proteinlerinin aksine soya, bezelye ve ayçiçeği proteinlerinin, yüksek emülsiyon stabilitesi ve iyi yağ dağılımına sahip kohezif bir protein ağı sağladığı bildirilmektedir [52].

2.6 Mısır

Mısır protein ekstraktlarından prolamin sınıfında yer alan zein, en çok bilinen proteinlerden olup, gıda endüstrisinde çok iyi fonksiyonel özelliklere sahip olması nedeniyle hali hazırda kullanılmaktadır [53-56]. Mısırın hammadde olarak kullanıldığı et analogları üretimi çalışmalarında ise ekstraktın ek işlemler uygulandığında kırmızı ve tavuk etlerinin fibriller dokusunun yansıtılabileceği ve tekstürel olarak ürünlerin kalitesinin artırılabilirliği belirtilmiştir [57-58]. Mısırın prolamin proteini olan zeinden lifli et analogu tipi ürünler üretmek amacıyla farklı üretim yöntemlerinin kullanıldığı bir çalışmada, zeinin tavuk etine benzer bir doku geliştirebildiği, ekonomik ve işlevsel fizibilite açısından lifli et analoglarının yapılandırılmasında büyük potansiyel sergilediği bildirilmiştir [58]. Ancak zein liflerinin su tutma kapasitesini iyileştirme yollarının belirlenmesine ek olarak, soya yokluğunda zein liflerinin fiziksel ve reolojik özelliklerinin daha fazla karakterize edilmesi gerektiği de vurgulanmıştır [58].

Tablo 1 Önemli protein kaynaklarının protein ve esansiyel amino asit içerikleri [8, 40-42]

	Yumurta	Biftek	Balık	Soya		Buğday	Bezelye	Lupin	Mısır	Ayçiçeği Çekirdeği	Fıstık	
			Sazan	İzolat	Konsantrasyon	Un	Un				Un (Az Yağlı)	
Protein içeriği %	12.4	21.91	17.8	83.3	63.63	37	9.61	23.12	36.17	9.42	20.78	33.8
mg/g üründeki esansiyel amino asit içeriği												
Histidin	2.83	6.99	5.25	23.03	15.78	12.68	14	5.86	10.3	2.87	6.32	8.54
İsolösin	6.16	9.97	8.22	42.53	29.42	22.81	20	9.83	16.15	3.37	11.39	11.88
Lösin	10.5	17.43	14.5	67.83	49.17	38.28	50	16.8	27.43	11.6	16.59	21.91
Lizin	8.32	18.52	16.4	53.27	39.29	31.29	11	17.71	19.33	2.65	9.37	12.13
Metiyonin	4.18	5.71	5.28	11.3	8.14	6.34	7	1.95	2.55	1.97	4.94	4.15
Fenilalanin	6.6	8.65	6.96	45.93	32.78	24.53	37	11.51	14.35	4.63	11.69	17.52
Triptofan	1.66	1.44	2	11.16	8.35	6.83	-	1.59	2.89	0.67	3.48	3.28
Treonin	5.94	8.75	7.82	31.37	24.74	20.42	18	8.13	13.31	3.54	9.28	11.58
Valin	7.34	10.87	9.19	40.98	30.64	23.46	23	10.35	15.1	4.77	13.15	14.18

2.7 Mantarlar

Mantarlar, lezzet, düşük doymuş yağ içeriği, yüksek lif ve protein içeriği ile yüzyıllardır birçok kültürde sevilerek tüketilmektedir [59]. İçeriğinde yer alan yüksek protein ve diğer besleyici bileşenler ile et analogları üretiminde kullanım için de önemli bir potansiyel kaynaktır. Mantarların et analogu üretiminde kullanımı üzerine yapılan araştırmalarda *Lentinus edodes*, *Coprinus comatus*, *Pleurotus ostreatus* ve *Colocybe indica* gibi birçok yenilebilir mantar türü denenmiştir [60-61]. Yapılan çalışmalarda mantarın fiziksel yapısı gereği ve etsi aroma özellikleri nedeniyle ete benzer ürün üretiminde ideal bir kaynak olduğu bildirilmektedir [59, 61-62]. İstiridy mantarı (*Pleurotus ostreatus*) ilavesinin ekstrüzyon işlemi ile tam yağlı soya ve izole soya proteini bazlı analog burger köftelerinin kalite özelliklerine etkileri karşılaştırıldığı bir çalışmada istiridy mantarının analog burger köftelerine eklenmesinin genel kaliteyi iyileştirdiği ve analog burger köftesi için potansiyel soya alternatifi olarak kullanılabileceği bildirilmiştir [63].

2.8 Algler

Karasal bitki kaynaklarının yanında, algler de denizel alternatif protein kaynaklarıdır. Algler geleneksel olarak, başta Uzakdoğu ülkeleri olmak üzere birçok ülkenin tüketim alışkanlıklarında önemli bir yere sahiptir [64]. Makro algler arasında yer alan, *Porphyra* spp., *Pyropia* spp. *Palmaria palmata*, *Ulva* spp., gibi kırmızı ve yeşil alglerin ve mikro alglerin kuru ağırlık yüzdesi bakımından incelendiğinde protein oranının çoğu protein kaynağına göre yüksek olduğu görülmektedir [65-68]. Örneğin, Spirulina olarak bilinen *Arthrospira platensis* ve ticari birçok varyasyonu olan yeşil mikroalg *Chlorella* kuru ağırlıkta %70 lere varan protein içeriğine sahip olup, insan beslenmesi için gerekli olan ve vücutta sentezlenmesi mümkün olmayan tüm esansiyel amino asitleri de bünyelerinde taşımaktadır [69-71]. Yumurta ile kıyaslanabilir ölçüde iyi kalite protein içeriğine sahip olan bu mikro algler, bu sebeple et analogları üretiminde kullanılabilecek potansiyeli yüksek alternatif protein kaynaklarıdır. Grahl vd. [72] Spirulina ve çeşitli et ikamelerinin uygulamalarını geliştirmek için farklı oranda Spirulina biyokütlesi ve ekstrüzyon parametreleri kullanarak yüksek nem ekstrüzyon yöntemi ile üretilen et analoglarının organoleptik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada et analogu üretiminde bir yenilik olarak, yüksek Spirulina içeriklerinin umut verici olduğu ve tat profili ile potansiyel eşleşen çeşnilerin daha fazla araştırılması gerektiği bildirilmiştir. Diğer taraftan, mikro alglerin gıda endüstrisinde hali hazırda besin kalitesini artırıcı, renk verici, antioksidan ve kıvam artırıcı olarak kullanılması da bu kaynakların cazibesini artırmakta, yeni alternatif mikro alg türlerinin fibriler dokunun elde edilmesi yanı sıra, renk ve kıvam artırılması amacıyla et analoglarında kullanım potansiyelleri de araştırılmaktadır [73-74].

Et analoglarının gelecekte rağbet gören ve güvenli ürünler olarak yer alması için; bitkisel kaynakların hammadde olarak kullanımı üzerine sindirilebilirlik, biyoyararlanım, bazı ön işleme teknikleri uygulanması

gerekliliği ile enerji, zaman, verim ve sürdürülebilirlik açısından daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [69, 75-79].

3 Et analogları üretiminde kullanılan yardımcı maddeler

Et analoglarının üretimi için en önemli içerik proteindir. Kullanılan hammadde proteinin işlendikten sonraki fonksiyonel özellikleri, et analoglarının üretiminde kullanılacak yardımcı katkı maddelerinin türünü ve miktarını etkilemektedir. Örnek olarak, fibriler dokuya sahip biftek veya tavuk eti gibi lifli kas görüntüsü için protein kaynağının özellikleri ve kullanılan nemin miktarı önemli iken [80-83], kıyım, köfte veya şarküteri ürünlerinde kullanılacak et analoglarının üretiminde bağlayıcı, renklendirici ve jelleşme özelliği kazandırıcı yardımcı katkı maddeleri ile lezzet artırımı için baharat kullanımı ön plana çıkmaktadır [8].

3.1 Yağlar

Yağ, et ve et ürünlerinde aroma, tekstür, sululuk ve çiğneme hissi gibi parametrelere doğrudan etkisi olan majör bir bileşendir [8]. Et analoglarının üretiminde ise yağlar bağlayıcı ajanlar olarak ve son üründe besleyicilik ve biyoyararlanımı artırma amacıyla da kullanılmaktadır [9, 84-85]. Bunların yanında, elastikiyet kazanımı, kesme işlemlerine duyarlılık ile vegan sosis, vegan burger veya vegan köfte gibi emülsifiye ürünlere has karakteristik özelliklerin oluşması ve daha sağlıklı fabrikasyon ürünlerin üretilmesi açısından yağ seçimi oldukça önemlidir [84, 86].

Et analoglarının üretiminde başlıca hindistan cevizi yağı, kakao yağı, soya fasulyesi yağı, mısır yağı, ayçiçek yağı, kanola yağı, susam yağı, avakado yağı, aspir yağı, palm yağı ve yerfıstığı yağı kullanılmaktadır [85, 87]. Bunlardan hindistan cevizi, kakao ve avakado yağı gibi koyu kıvamlı yağlar, et analoglarında gerçek ete benzer tekstür ve çiğneme hissinin geliştirilmesi amaçlarına hizmet etmektedir [85]. Et analoglarının yapısının duyuusal algı ile ilişkilendirildiği bir çalışmanın formülasyonunda yer alan ayçiçek yağının sertlik, gözenekli yapı ve çiğnenebilirlik gibi özellikleri doğrudan etkilediği ve değerlendirmede, bu faktörlerin beğeni üzerinde önemli belirleyiciler olarak belirlendiği bildirilmiştir [88].

Bitkisel yağlar kolestrolsüz olması, doymamış yağ asitleri açısından zengin olması ve çeşitli fonksiyonel özelliklere sahip olması nedeniyle avantaj sağlarken, gerçek etin aroma ve lezzetini artıran hidrokarbon, alkol, aldehit ve sülfürlü bileşikler gibi çözünebilir uçucuların eksikliği nedeniyle son ürün kalitesine etki eden önemli bir dezavantaja da sahiptir [89].

3.2 Renklendiriciler

Renk genel olarak tüketicide ilk olumlu algıyı bırakması açısından önemli görülmektedir [90]. Özellikle et, sarkoplazmik proteinlerin (miyogloblin vb.) biyokimyasal ve metabolik reaksiyonları sonucu oluşan oksimiyogloblin gibi bileşenler ile ilişkili olarak kırmızı-pembe tonlarında cezbedici bir renge sahiptir [91-92]. Bu nedenle genel olarak ana bileşen olan protein ekstraktının renksiz veya kaynağına göre etten farklı renklerde olmasıyla üretilen et analoglarında

arzu edilen rengin elde edilememesi durumunda renklendiriciler kullanılmaktadır [93].

Renk verici yardımcı katkıları arasında doğal olması ile ön plana çıkan kırmızılahana, havuç, kırmızıbiber, nar meyve tozu, pancar suyu özü, elma özleri ve algler gibi bitkilerin ekstraktları kullanılmaktadır [72, 85, 87, 93-94]. Bunların yanında, biyoteknolojik kökenli boyalar da fabrikasyon üretimi mevcut olan ve et analoglarının üretiminde renklendiriciler olarak kullanılan ürünler arasındadır [85]. Bu boyalar arasında leghaemoglobin, et analoglarında arzu edilen kırmızı tonları sağlaması nedeniyle sıklıkla kullanılmaktadır [95-97]. Ancak, renklendirici kullanımında pigment bozulması, oksitlenme reaksiyonları, istenilen seviyenin üzerinde gerçekleşen Maillard reaksiyonları, et analogu ve renklendirici madde arasındaki pH uyumsuzluklarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu durumda ise maltodekstrin ve hidratlı aljinat gibi renk tutucular ile renk göçünün kontrolü sağlanabilmektedir [98-99].

3.3 Aroma arttırıcılar

Doğal hammaddelerin kullanımı ile tam olarak arzu edilen lezzetin yakalanamaması veya bitkisel hammaddeden gelen saponin ve izoflavonlar gibi bileşenlerin acı/hoşa gitmeyen lezzetlerinin baskılanması için işlemenin farklı aşamalarında aroma arttırıcılar kullanılabilir [99-101]. Doğal aroma arttırıcılar arasında en bilinenler acı, ekşi, tatlı ve tuzlu tatları bir arada bulunduracak şekilde baharat kullanımıdır (Tablo 2) [93]. Bu baharatlar arasında başlıca bilinen ve en çok kullanılanlar; fesleğen, kekik, karabiber, kekik, kimyon, hindistan cevizi, zencefil ve karanfil olarak sıralanabilmektedir [85, 102]. Fıstık bazlı et analoglarının kabulünde etkili bir faktör olan duyuşal özelliklerin geliştirildiği bir çalışmada, ticari bir et aromasının yanı sıra lezzet arttırıcılar olarak sarımsak, domates, karabiber ve tuz kullanılmıştır. Çalışmada lezzet arttırıcı ilavesinin tüketici beğenisindeki etkisi vurgulanmıştır [28]. Bununla beraber, hammaddenin yapısal özellikleri ve uygulanan ısıl işlem parametrelerine bağlı olarak gerçekleşen Maillard reaksiyonları, lipid oksidasyonları ve tiaminin ısıl olarak yıkımı ile oluşan uçucu bileşenler, üründe etsi aromayı geliştirilebilmektedir [102].

Doğal aroma katkılarının yanında bazı basit şekerler, amino asitler, glikoproteinler, monosodyum glutamat ve tuzun bir karışımı ile sentetik et aroması geliştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır [103]. Fakat sentetik aromaların, et analogu kombinasyonu ile uyumsuzluğu sonucu istenmeyen aroma gelişimi, dayanım sürelerinin değişkenliği ve insan vücudunda birikerek oluşturabilecekleri zararlı etkiler (kanserojenik, mutajenik ve teratojenik etkiler) kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [102].

3.4 Bağlayıcılar ve tekstüre edici ajanlar

Özellikle emülsiyon tipi et analogları formülasyonlarında stabilizörler, jelleştirici maddeler, koyulaştırıcılar ve kalınlaşmayı sağlayan maddeler kullanılarak ürünlerin dokusal özellikleri iyileştirilmektedir [8]. Et endüstrisinde aljinat, kazein, fibrinojen, trombin, transglutaminaz, karagenan, peynir altı suyu proteini konsantresi, nişasta, keçiyoynuzu zamkı, guar gam ve selüloz son ürünlerin

tekstürel özelliklerini, su tutma kapasitelerini ve son ürünlerin görünümünü iyileştirmek için hali hazırda etkili şekilde kullanılmaktadır [58, 104-106]. Bu katkıları et analogları üretiminde ise, farklı hammaddelerin denenmesi ve iyileştirme çalışmalarında kullanılmakta, özellikle, fibriler yapının elde edilmesi, yağ dağılımının düzenlenmesi, jelleşme özelliği ve matriks yapısının iyileştirilmesi odak noktası olarak araştırılmaktadır [58, 107-108]. Konu ile ilgili bir çalışmada bağlayıcı ajanların (karragenan, kazein, ksantan gam vb.) farklı konsantrasyonların, %5 doymuş yağ ile oluşturulan mantar bazlı sucuk analoglarının kalite özellikleri ve besinsel özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bağlayıcı madde olarak karragenan ve ksantan gamı ile hazırlanan numunelerde tekstürel özelliklerde önemli iyileşme gözlenmiştir [109].

Tablo 2. Nohut nugget bileşenleri [20]

Hammadde	%	Hammadde	%
Su	63.50	Yağ	3.20
Nohut unu	30-10	Tavuk baharatı	4.0
Tekstürize bitkisel protein	10-30	Bal	2.5
Yulaf ezmesi (su ile 1:4.5 oranında mix)	34	Soya protein izolatu	2.0
Palm stearin	11.5	Soğan tozu	1.0
Buğday unu	4.0	Sodyum tripolifosfat	0.5
		Tuz	0.5

4 Et analogları üretim teknolojileri

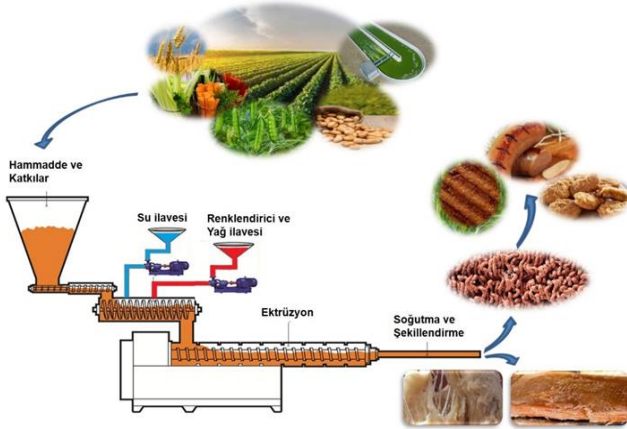
Et analogları üretiminde en temel nokta, eti andıran duyuşal özellik/dokusal profilin uygun teknikler vasıtası ile oluşturulmasıdır. Et analogları üretiminde hammaddenin fizikokimyasal özellikleri, protein içeriği/özellikleri ve oluşturulacak et analogunda istenen dokusal/dyuşal özelliklere göre; başta ekstrüzyon tekniği olmak üzere, hücre kültürü, eğirme, shear cell ve couette hücre tekniği, dondurarak yapılandırma tekniği ile 3D gıda yazıcısı uygulamaları, fermente et analogları, hidrokoloidler ve bitki proteinleri kombinasyonunun oluşturulması gibi birçok teknik kullanılmaktadır [9, 110].

4.1 Ekstrüzyon yöntemi

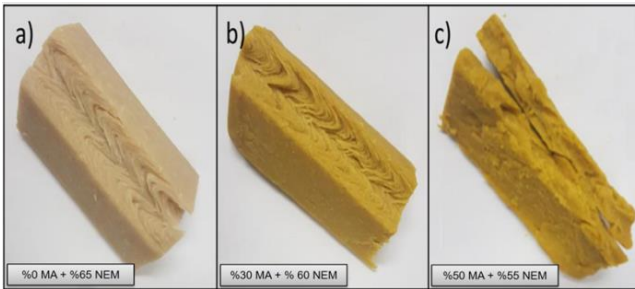
Et analoglarının üretimi genel olarak ekstrüzyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Ekstrüzyon, hammaddelerin kısa bir süre yüksek sıcaklık, basınç ve kesme kuvvetlerine maruz kaldığı termomekanik bir işlemdir [111]. Tekstürizasyon et analogları üretiminin temelini oluşturmakta, genel olarak karıştırma [108, 112], ısıtma [28] ve düşük ya da yüksek nemde ekstrüze etme [113] aşamalarını içermektedir. Bu parametrelerin değişimi ile yüksek/düşük nem, tek/çift vida ekstrüzyon tekniği gibi birçok ekstrüzyon işleme yöntemi

uygulanabilmektedir. Günümüzde et analogları üretiminde daha çok çift vidalı ekstrüde cihazlar yer almakta, kullanılan bitkisel protein kaynağına göre uygulanan düşük ve yüksek nem ekstrüzyonları ile et analogları üretimi gerçekleştirilmektedir [8, 114].

Yüksek nem ekstrüzyon teknolojisi (%40'tan daha fazla nem) ile et analoglarının üretiminde; çiğneme, sululuk ve sertlik gibi özellikleri arzu edilen seviyelere ulaşmakta lifli, sert ve kesmeye dirençli, gerçek et görüntüsüne sahip et analogları üretimleri gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 2-3) [29, 114-116].



Şekil 2. Yüksek nem ekstrüzyon teknolojisi



Şekil 3. Hetotrofik olarak kültür edilmiş *Auxenochlorella protothecoides* mikroalginden (MA) farklı kuru ağırlık (KA) oranlarında kullanılarak yüksek nem ekstrüzyonu ile üretilen et analoglarının renk ve tekstürel yapılarındaki değişimler a) % 0 MAKA ve % 65 Nem, b) % 30 MAKA % 60 Nem, c) % 50 MAKA ve %65 Nem [74].

Düşük nem ile ekstrüzyon işleminde kullanılan nem miktarı genel olarak %35 veya daha düşük oranlardadır. Bu işleminde daha düzgün ve homojen yapıya sahip, ancak lifli ve tam et görüntüsünden yoksun son ürünler elde edilmektedir [117]. Dolayısıyla düşük nem ekstrüzyonu ile tekstürize edilen bitkisel proteinler, tam anlamıyla et analogları olarak kullanılmak yerine daha çok kıyma ve kıyma karışım ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [114, 118]. Bu çok işlevli teknik, gıda kalitesi ve üretkenliği işleme boyunca tutarlı olduğu için yaygın kullanılmaktadır. Sistem kolaydır, su ve enerji tasarrufu sağlanmakta ve çeşitli hammaddeler kolaylıkla işlenebilmektedir. Buna rağmen Maillard reaksiyonu, karamelizasyon, hidroliz ve pigmentlerin bozulması nedeniyle meydana gelebilecek renk değişiklikleri

teknikğin olumsuz yanlarındandır ve uygun üretim planının oluşturulması elzem hale gelmektedir [9].

4.2 Hücre kültürü yöntemi

Canlı bir hayvan dokusundan alınan kas hücrelerinin serum takviyeli in vitro koşullarda ve biyoreaktörlerde, önce kas proteinlerini, ardından doku oluşumunu sağlayacak şekilde kopyalanması, hücrelerin elektrik alanlar veya diğer araçlar ile birleştirilerek, hizalanması ile çok hücreli dokuların elde edilmesi işlemidir [119]. Hücre kültürü yönteminin geliştirilmesi için embriyonik kök hücreler, indüklenmiş pluripotent kök hücreler, mezenkimal kök hücreler ve uydu hücreler dahil olmak üzere farklı hücre tipleri [110, 120] ve progenitor hücreler veya fibroblastlar, miyoblastlar gibi çoğalabilen yetişkin hücreler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [121]. Yapılan bir çalışmada, geleneksel et üretimine göre 20 kat daha hızlı ve verimli bu teknolojinin ticarileştirilmesi ile, artan et talebinin daha düşük çevresel etkiyle karşılanabileceği bildirilmektedir [122].

Fakat günümüz teknolojisi ile etkili bir iskelet kası kültürü elde etmek mümkün olsa da donör hayvanların kontrollü yetiştirilmesi ile memeli hücre/doku kültürlerinin kalite kontrolünde zorluklar, biyokimyasal ve biyofiziksel kültür koşulları, kültürde kontaminasyonun veya hastalığın önlenmesinde zorluklar, üretim sürecinin ölçeklenebilirliği, optimizasyon zorluğu gibi dezavantajları bulunmaktadır [110].

4.3 Eğirme tekniği

Simüle et üretiminde kullanılan eğirme yönteminde, konsantre bitki proteini başka polimerlerle karıştırılarak; elektro-spin, hız, çözünürlük, viskozite, iletkenlik ve diğer bileşenlere bağlı olarak bir protein çözeltisi oluşturulmaktadır [123]. Tüm koşullar sağlandığında, liflerin eğildiği bir koni oluşmakta, polimerlerin içinde çözülmesi çözücü eğirme işlemi sırasında buharlaşarak uzaklaşmakta ve polimerlerden oluşan ince kuru lifler meydana gelmektedir [124]. Kutzli vd. [125] farklı protein içeriklerine sahip peynir altı suyu proteini izolatu ve soya proteini izolatu ile maltodekstrin karışımlarından elektro-eğirme yöntemi ile gıda sınıfı liflerin başarılı bir şekilde üretildiğini bildirmektedir. Çalışmada, elektro çekim sırasında maltodekstrin-protein dispersiyonlarının farklı davranışlarının bileşimlerine bağlı olduğu ve eğirme dispersiyonundaki protein türü ve içeriğinin, liflerin üretim hızını doğrudan etkilediği ifade edilmiştir.

Bu yöntem lif çapının tekdüzeligi ve ölçeklenebilir üretim açısından avantajlı iken, elektro-spin işlemi için çeşitli parametreleri kontrol etmenin zorluğu, yüksek oranda asit/alkali çözücü ve su kullanımı ile büyük atık üretimi gibi yönlerden dezavantajlıdır [126].

4.4 Shear cell ve couette hücre tekniği

Akışa bağlı yapılandırma kavramına dayanan bu teknikte, her ikisi de eş merkezli bir reometre konseptine dayanan bir Shear hücresi ve bir konik/silindirik şekilli cihaz olan Couette hücresinde, basit kesme ve ısının bir kombinasyonu ile proteinler lifli yapılar oluşturacak şekilde hizalanmaktadır [24, 126-128]. Bitkisel bazı proteinler ile yapılan çalışmalarda elde edilen liflerin, tavuk lifine benzer şekilde

mekanik mukavemete sahip olacak kadar iyi bir performans elde edildiği bildirilmiştir [9]. Bir Couette hücrelerinde basit kesme akışı ve ısı uygulaması ile bitki proteinlerinin granüler bir karışımına lifli yapısal desenler verilerek et analogu üretiminin modellendiği bir çalışmada sıcaklık 120 °C'de sabit tutularak işlem süresi ve dönüş hızı arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada liflilik 30 dakika ve 25 rpm'de optimum koşullara ulaşmış ve 30 mm kalınlığında et analogları üretilmiştir. Ayrıca, çalışma sonucunda tasarımdaki esneklik sebebiyle şu anda mevcut olmayan boyutlarda et alternatifi ürünlerin üretilmesine olanak tanımlanabileceğini bildirilmiştir [129]. Bununla birlikte, Shear hücrelerindeki kesme hızı, yarıçap boyunca koniler arasındaki giderek artan mesafe nedeniyle tüm protein numunesi hacmi boyunca sabit olmayışı ve yapılandırmanın ölçeklenebilirliğinin sınırlı kalışı, bu uygulamaları laboratuvar ölçeğinde testlerle sınırlamaktadır [24].

4.5 Dondurarak yapılandırma tekniği

Dondurarak yapılandırma veya dondurarak hizalamada, yapı oluşturmak için sulu bir protein çözeltisi dondurulmakta, buz kristallerinin oluşumuyla, hizalı, düzenli gözenekli ve birbirine bağlı lifli mikro yapı elde edilmektedir. Su/nem dondurarak kurutma ile uzaklaştırılmakta, bu da kuru, sert ve lifli protein kütesinin elde edilmesi ile sonuçlanmaktadır [108, 130-131]. Dondurarak yapılandırma tekniği ve farklı oranlarda buğday gluteni ile bezelye kullanılarak et analogları üretmeyi amaçlayan bir çalışmada, elde edilen ürünün fizikokimyasal ve duysal özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgularda, bezelye proteininin dahil edilmesinin, et analogunun viskoelastik özelliklerini, sertliği ve çignenebilirliği arttırdığı görülmüştür [131]. Yöntem ile işleme parametrelerine bağlı olarak doğru elastikiyet ve sertlikte tatmin edici bir et analogu üretilebilmekte fakat süre ve donma parametrelerinin dikkatli takibi ve optimizasyonu, yöntem için geliştirilmesi gereken yönler arasında yer almaktadır.

4.6 3D gıda yazıcısı

Bu teknoloji, temelde dokunun dijital olarak modellenmesini içermektedir [132]. Gıda sektöründe yaygınlaşan 3D baskının en ilginç uygulamalarından biri olan et analogu üretiminde, mürekkep püskürtmeli, mikro ekstrüzyon ve lazer destekli baskı gibi teknolojiler yoluyla doku iskeleti oluşturmak için 'biyobaskı' olarak adlandırılan uygulama gerçekleştirilerek, biyolojik materyallerin ve canlı hücrelerin kültürünün biriktirilmesi sağlanmaktadır [133]. Wang vd. [134] yumuşak dokulara sahip hibrit et analoglarının 3D baskısı için bitkisel ve hayvansal protein bazlı formülasyonlar oluşturmak amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, 3D baskı testleri için sırasıyla ana bitki proteini ve et kaynağı olarak bezelye proteini izolatu ve tavuk kıyması kullanmışlardır. Bu seçilen numuneler üzerinde, reoloji ve ileri ekstrüzyon testleri gerçekleştiren araştırmacılar 3 boyutlu bir tavuk nugget şekli elde etmek için ekstrüzyon tabanlı 3 boyutlu baskı yapmışlardır. Çalışma sonucunda araştırmacılar, bezelye protein izolatına %20 oranında tavuk kıyma ezmesi ilavesi ile daha iyi basılabilirlik ve lif yapısı elde edildiğini bildirmiştir. Şu an piyasada olmayan bu

teknikğin vejeteryan/vegan ve et tüketiminde dini kısıtlaması olan bireyler tarafından kabul görebileceği belirtilmekte, teknolojiye dair ana zorlukların ise, ölçeklenebilirlik süreci, üretim maliyeti, alerjenik durumlar, piyasaya arzda taşıma ve etiketleme olabileceği ifade edilmektedir [135].

4.7 Fermente et analogları

Fermentasyon yüzyıllardır kullanılan ve ürün kalite ve güvenlik özelliklerinde değişimler yaratan bir biyoprosedir. Son yıllarda ise bu ürünlere ek olarak biyoreaktörde bitkisel proteinlerin yeniden yapılandırılması ile et analogu oluşturmak için spesifik fonksiyonel proteinler üretilebilmektedir [9].

Atıkların fermentasyonu yoluyla elde edilen proteinlerin et analogu üretiminde kullanımını inceleyen bir çalışmada işlenmiş soya ürün atıkları fermentasyona (*Lactobacillus (L.) plantarum* ve *L. acidophilus*) tabi tutulmuştur. Fermente soya atığı proteinlerinden elde edilen et analoglarının, protein oksidasyon seviyesi, tekno-fonksiyonel, doku ve duysal özellikleri incelenmiş olup elde edilen ürünlerin uygun lif, bitki bazlı protein ve esansiyel amino asit kaynağı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca fermentasyon uygulamasının et analoglarının su tutma kapasitesini ve duysal özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra sertliği azaltma potansiyeli de bildirilmiş, hammaddelerin fermentasyona tabi tutulmasıyla et analoglarının uygun bir bileşeni haline getirilebildiği belirtilmiştir [136].

Ancak fermentasyonda kullanılan yöntem ve ortam koşullarına bağlı olarak, ürün geliştirmeye çok elverişli olan bu yöntem; karbon kaynakları için yüksek maliyetler, uzun kültür süresi, kontaminasyon olasılığı ve geri kazanım sürecindeki zorluklar dâhil olmak üzere belirli dezavantajlara da sahiptir.

4.8 Hidrokolloidler ve bitki protein kombinasyonları

Kolloidal bir solüsyonda stabil bir emülsiyon oluşturmak için su, bitkisel proteinler ve hidrokolloidlerin kullanıldığı bir sistemdir. Bu teknikte, bir lif oluşturmak için çoğunlukla sodyum aljinat ve metilselüloz gibi hidrokolloidler kullanılırken, et analogunun dokusal konfigürasyonunun da yapısal etkileşimlerden kaynaklanabilecek değişimler dikkatle takip edilmelidir [9].

Soya fasulyesi işleme atıklarından elde edilen katma değerli ürünlerden, hidrokolloidlerin eklenmesiyle istenen özelliklere sahip yeni formüle edilmiş glutensiz et analogu hazırlamak için ekstrüzyon yöntemini kullanan bir çalışmada, glutenin beş farklı hidrokolloid (guar gam, karragenan, ksantan gam, hidroksipropil nişasta ve çapraz bağlı tapyoka nişastası) ile kısmi ikamesi sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan hidrokolloidlerin konsantrasyona bağlı olarak analog özelliklerinin ayrı ayrı etkilediği bildirilmiştir. %1-7 hidrokolloid ilaveli et analogu numunelerinde, kayma hızı arttıkça viskozitenin azalarak psödoplastik davranış gösterdiği bildirilmiştir. Eklenen miktara bağlı olarak guar gam ve ksantan gamın, et analogunun dokusal özellikleri üzerinde hidroksipropil nişasta ve çapraz bağlı tapyoka nişastasından daha büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilerek, soya proteini izolatu bazlı et analoglarının, tüketici kabulünü kazanmak için gluten eklemeye ihtiyaç duymadan da hidrokolloid varlığında geliştirilebileceği bildirilmiştir [137].

5 Et analoglarının duyuşal, biyokimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri

Et analoglarının kabulünde en önemli etkenler; duyuşal özellikleri itibari ile eti aratmayacak şekilde tasarlanarak tüketim zevki vermesi, biyokimyasal özellikleri itibari ile besleyici açıdan yeterli olması ve gıda güvenliği açısından uygun özelliklere sahip olabilmesidir [9, 16, 31, 138].

Duyuşal özellikler üretim parametreleri ve katkı ilavesi ile şekillendirilebilmektedir. Örneğin genel görünümde lifli, sert, kas yapısı veya sulu kıyma benzeri yapı ve birçok tekstürel özellik üretim yöntemleri ile ilintili olarak değişkenlik göstermekte [139-140], renk, lezzet ve koku özellikleri ilave edilen katkıları aracılığı ile sağlanabilmektedir [10, 59, 81, 87, 94].

Et analogunun duyuşal açıdan olduğu gibi biyokimyasal açıdan da taklit ettiği hayvansal ürünün özelliklerini karşılaması gerekmektedir (Tablo 3). Et analoglarında protein, yağ, karbonhidrat, nem ve kül gibi temel besin öğeleri ile amino asit ve yağ asidi kompozisyonu kullanılan hammadde, katkıların türü ve miktarının yanında işleme sırasında kullanılan nem oranına göre kolaylıkla ayarlanabilmektedir [9, 16, 82, 141].

Her gıdada olduğu gibi et analoglarında da mikrobiyal özellikler gıda güvenliği açısından önem arz etmekte ve uygulanan işleme metotları mikroflora direkt etki göstermektedir. Et analoglarının üretim şekline göre bitkisel hammaddelerden protein ekstraktı yapıldığı için hammadde kaynaklı mikroflora devamlılığı sınırlanmaktadır.

Tablo 3. Et ve bitki bazlı burgerlerin besin değerleri açısından kıyaslanması [97]

Besinsel değerler (%)	Et bazlı burger*	Bitki bazlı burger*
Protein	17.96	18.01
Yağ	12.51	11.10
Karbonhidrat	2.09	8.37
Kül	1.79	2.52
Nem	65.91	60.91
Esansiyel Amino asit bileşimi (ham üründe mg/g)		
Histidin	5.82	5.91
İsolösin	5.55	5.08
Lösin	11.64	12.15
Lizin	13.91	9.28
Metiyonin	3.00	0.14
Fenilalanin	6.62	8.99
Triptofan	1.03	1.08
Treonin	6.86	5.72
Valin	6.12	5.59

*:ortalama değerleri ifade etmektedir.

Sonrasında işleme yöntemine de bağlı olarak katkıları ile harmanlanan et analogu hamuru ısıtılma tabii tutulduğundan, çoğu vejetatif organizma, maya ve küf tipik işleme koşulları altında yok edilmektedir [142-143]. Dolayısıyla, et analogu, biftek tarzında üretildiğinde gerçek ete benzer şekilde raf ömrüne sahip olabilmekte, gıda

güvenliği açısından hammadde kaynaklı kontaminasyon söz konusu olmadığı için daha güvenli olabilmektedir [144]. Diğer taraftan, şarküteri ürünleri şeklinde üretim söz konusu olduğunda, her iki şekilde de ısıtılma uygulandığından, et analogları ve gerçek et ürünlerinin benzer raf ömrüne ve güvenliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır [145].

6 Tüketici algısı ve gelecek vizyonu

Geleneksel et üretim ve tüketimine alternatif kaynakların arayışı aslında yeni bir konu değildir. Özellikle 1960'lı yıllarda taklit et, sahte et veya et analogları adı altında farklı et alternatifleri kullanılmaya başlanmıştır [146]. Ticari olarak ise 1982 yılında ilk etsiz burger ürünleri Birleşik Krallık'ta piyasaya sürülmüş ardından farklı yıllarda farklı ülkelerde de üretim ve tüketim gerçekleşmiştir [147]. Günümüzde ise Batı ülkelerinde lezzetli etsiz gıdalar olarak ifade edilen et analogları özellikle vegan beslenme tarzının yaygınlaşmasıyla sektörde yerini almakta, özellikle sanayileşmiş ülkelerde yaşam şekline bağlı olarak daha popüler duruma gelmektedir [10].

Tüketici gruplarının et analoglarına genel yaklaşımı, toplumların gelişmişlik ve eğitim düzeyine göre farklılık göstermektedir. Hoşgörülü, maliyet odaklı ve yeniliklere açık tüketici gruplarının et analogları konusunda ön yargılı olmadıkları, değişen yaşam tarzları ve beslenme alışkanlıklarıyla birlikte kabul edilebilirliğin yüksek olduğu görülmektedir [1]. Bununla birlikte et analoglarının kabulünde çevresel etkiler hakkında bilinç, sürdürülebilirlik ve etik konusunda farkındalığın ise daha arka planda olduğu hissedilmektedir [1, 81, 148-149]. Bu bağlamda, et analoglarının da içinde olduğu alternatif besin maddeleri hakkında farkındalık tam oluşmasa da, bu güncel konu ülkelerin de desteklediği birçok araştırma ve projeye konu olmaktadır [150]. Dolayısıyla, önümüzdeki zaman içerisinde tüketici de farkındalık oluşması muhtemel bu alternatif gıdaların algı ve kabul edilebilirliği üzerine çalışmalara gereksinim duyulmaktadır.

Son yıllarda kıymaya karıştırılan bitkisel kaynaklar, özellikle yarı et analogları olarak göze çarpan soya ve kıyma karışımı ürünlerin, tüketicinin gündelik hayatında yer almasıyla, bu ürünlere olan ön yargı önemli ölçüde azalmış, bunu gözlemleyen gıda üreticilerine ise yeni bakış açısı getirmiştir [151]. Örneğin Yeni Zelanda'da bazı şirketler et analogları konusunda atılım göstererek, kızartılarak gevreklenen bezelye proteininden yapılan "tavuk parçaları" üretimi ile bitkisel bazlı et ve peynir alternatiflerinin üretimi alanında faaliyet göstermeye başlamıştır [152]. Benzer şekilde makroalglerin Asya ülkelerinde yıllardır besin kaynağı olarak kullanılıyor olması ve makro-mikro alglerin birçok gıda ürünüde farklı amaçlarla yer alması bu hammaddelerden üretilen et analoglarına karşı önemli bir önyargının olmadığını göstermektedir. Yapılan çalışmalarda ürün özelliklerini iyileştirmek ve besleyici değerini artırmak adına makro ve mikro alglerin kullanıldığı fakat [153-154] özellikle mikroalglerin daha dar bir kullanım alanı olsa da, et analogları olarak farklı bitkisel ürünlerle kombinasyonlarının kullanılması için daha çok araştırmaya ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir [154]. Ayrıca mikroalglerin et analogları olarak tüketici kabulü üzerine yapılan bir araştırmada,

algerden elde edilen analogların genişleyen kabul görme potansiyelini olduğu belirtilmekte, özellikle tüketicilerin büyük bir çoğunluğunun hayvansal ürünlere alternatif olarak et analoglarının tüketimine daha ılımlı yaklaştıkları bildirilmektedir [155]. ABD, Çin ve Hindistan'da tüketicilerin et analoglarını kabul görme derecelerini ölçmeyi amaçlayan bir anket çalışmasında ise, özellikle Çin'in kabul düzeyinin çok yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu eğilimin sadece sağlıklı beslenme ile değil, aynı zamanda değişen kuşaklar, gıda kaynağı bilgilerine ulaşılması, hayvan refahı sorunları ve çevre üzerindeki etkilerden de kaynaklanabileceği belirtilen çalışmada, et analogları tüketiminin 2050 yılına kadar %73 artış göstereceği de ifade edilmiştir [156]. Kanadalı tüketiciler üzerine yapılan bir çalışmada da benzer şekilde, tüketiciler arasında et tüketiminin azalması veya et ikamesi seçiminin artış göstermesinin başlıca nedenlerinin, sağlık, et üretiminin çevresel etkisi, fiyat ve hayvan refahı ile ilgili endişeler olduğu ifade edilmektedir [157]. Ticari değeri çok yüksek olmayan bir fasülye türünün (*Mucuna pruriens*) farklı ekstrüzyon koşullarında işlenerek et analogu olma potansiyelinin belirlendiği bir çalışmada, tüketici panelistler tarafından sertlik, doku ve liflilik açısından yüksek beğeni alan ürün tuzluluk, sululuk ve çiğnenme özellikleri açısından ortalama bir beğeni alarak kabul gördüğü, ekstrüzyon koşullarının iyileştirilerek kabul edilebilirliğin daha da artırılacağı belirlenmiştir [139]. Buna ilave olarak, yer fıstığı bazlı bir et analogunun tüketici duyusal analiz sonuçları da farklı formülasyon ve işlem koşulları açısından değerlendirilmiş, elde edilen bulgularda soya bazlı analoglar kadar ilgi gören ürünler elde edildiği ancak tekstür geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulduğu rapor edilmiştir [28]. Yapılan tüm laboratuvar ve anket çalışmaları temelinde bu alanda yapılacak ürün geliştirme, kalite ve güvenlik parametrelerinin geliştirilmesi ile duyusal özellikler üzerine yapılacak çalışmaların gerekliliğine vurgu yapmaktadır.

7 Sonuç

Bitkisel protein kaynaklarından üretilen besinler, değişen tüketim alışkanlıklarıyla birlikte ön plana çıkmakta, yoğunlaştırılmış tek yönlü beslenme tiplerine alternatif olarak gün geçtikçe popüler hale gelmektedir. Bu kapsamda son yıllarda et analogları önemli bir ürün olarak yaygınlaşmaktadır. Et analogları çoğunlukla bitkisel kaynakların kullanıldığı, çeşitli işleme yöntemleri ve katkı ilavesi ile son ürüne et benzeri formun kazandırıldığı ve çoğu toplumun aşına olmadığı gıda maddeleridir. Bu nedenle et analogları ile ilgili belirsizliklerin ve bilgi eksikliklerinin giderilmesi, ete alternatif protein kaynakları ile ilgili teknolojik gelişmelerin belli bir seviyeye gelmesi gerekmektedir. Bunun sonucunda sürdürülebilirlik ve kabul edilebilirlik de sağlandığında, elde edilen ürünler beslenmenin önemli kaynakları arasında yerini alacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %2

Kaynaklar

- [1] C. Sun, J. Ge, J. He, R. Gan and Y. Fang, Processing, quality, safety, and acceptance of meat analogue products. *Engineering*, 7 (5), 674-678, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.10.011>.
- [2] A. Nardone, B. Ronchi, N. Lacetera, M. S. Ranieri, and U. Bernabucci, Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130 (1-3), 57-69, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011>.
- [3] P. R. Ehrlich and J. Harte, Opinion: to feed the world in 2050 will require a global revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (48), 14743-14744, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519841112>.
- [4] FAO, Climate change, agriculture and food security. *The State of Food and Agriculture*, Rome, 2016.
- [5] T. King, M. Cole, J. M. Farber, G. Eisenbrand, D. Zabarar, E. M. Fox and J. P. Hill, Food safety for food security: Relationship between global megatrends and developments in food safety. *Trends in Food Science & Technology*, 68, 160-175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.014>.
- [6] T. G. Benton, R. Bailey, A. Froggatt, R. King, B. Lee and L. Wellesley, Designing sustainable land use in a 1.5°C world: The complexities of projecting multiple ecosystem services from land. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 31, 88-95, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.01.011>.
- [7] T. He and C. Li, Harness the power of genomic selection and the potential of germplasm in crop breeding for global food security in the era with rapid climate change. *The Crop Journal*, 8 (5), 688-700. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.04.005>.
- [8] K. Kyriakopoulou, J. K. Keppler and A. J. van der Goot, Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. *Foods*, 10 (3), 600, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10030600>.
- [9] M. Singh, N. Trivedi, M. K. Enamala, C. Kuppam, P. Parikh, M. P. Nikolova and M. Chavali, Plant-based meat analogue (PBMA) as a sustainable food: A concise review. *European Food Research and Technology*, 247 (10), 2021. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03810-1>.
- [10] K. Kyriakopoulou, B. Dekkers and A. J. van der Goot, Plant-based meat analogues. In *Sustainable meat production and processing*. C. M. Galanakis, Eds. Academic Press, pp. 103-126, 2019.
- [11] M. Garcia-Vaquero and M. Hayes, Red and green macroalgae for fish and animal feed and human functional food development. *Food Reviews International*, 32 (1), 15-45, 2016. <https://doi.org/10.1080/87559129.2015.1041184>.
- [12] K. Hua, J. M. Cobcroft, A. Cole, K. Condon, D. R. Jerry, A. Mangott, C. Praeger, M. J. Vucko, C. Zeng, K. Zenger and J. M. Strugnell, The future of aquatic protein: Implications for protein sources in aquaculture diets. *One Earth*, 1 (3), 316-329, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>.

- [13] H. Nadeeshani, A. Hassouna and J. Lu, Proteins extracted from seaweed *Undaria pinnatifida* and their potential uses as foods and nutraceuticals. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1898334>.
- [14] P. Singh, R. Kumar, S. N. Sabapathy and A. S. Bawa, Functional and edible uses of soy protein products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7 (1), 14–28, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2007.00025.x>.
- [15] A. G. Tarone, L. H. Fasolin, F. D. A. Perrechil, M. D. Hubinger and R. L. Cunha, Influence of drying conditions on the gelling properties of the 7S and 11S soy protein fractions. *Food and Bioproducts Processing*, 91, 111–120, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.11.010>.
- [16] O. P. Malav, S. Talukder, P. Gokulakrishnan and S. Chand, Meat analog: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55 (9), 1241–1245, 2015. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.689381>.
- [17] C. Wu, Y. Hua, Y. Chen, X. Kong and C. Zhang, Effect of temperature, ionic strength and 11S ratio on the rheological properties of heat-induced soy protein gels in relation to network proteins content and aggregates size. *Food Hydrocolloids*, 66, 389–395, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.12.007>.
- [18] L. Zhu, P. Yin, T. Xie, X. Liu, L. Yang, S. Wang, J. Li and H. Liu, Interaction between soya saponin and soy β -conglycinin or glycinin: Air-water interfacial behavior and foaming property of their mixtures. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 186, 110707, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110707>.
- [19] J. H. Chiang, S. M. Loveday, A. K. Hardacre and M. E. Parker, Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues. *Food Structure*, 19, 100102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.11.002>.
- [20] F. A. A. Abdullah, D. Dordevic, E. Kabourkova, J. Zemancová and S. Dordevic, Antioxidant and Sensorial Properties: Meat Analogues versus Conventional Meat Products. *Processes*, 10(9), 1864, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10091864>.
- [21] C. N. Haidar, E. Coscueta, E. Cordisco, B.B. Nerli and L. P. Malpiedi, Aqueous micellar two-phase system as an alternative method to selectively remove soy antinutritional factors. *LWT*, 93, 665–672, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.025>.
- [22] L. Day, Wheat gluten: Production, properties and application. In *Handbook of Food Proteins*. G.O. Phillips and P.A. Williams Eds. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 267–288, 2011.
- [23] S. Barak, D. Mudgil and B. S. Khatkar, Influence of gliadin and glutenin fractions on rheological, pasting, and textural properties of dough. *International Journal of Food Properties*, 17, 1428–1438, 2014. <https://doi.org/10.1080/10942912.2012.717154>.
- [24] G. A. Krintiras, J. Göbel, A. J. Van der Goot and G. D. Stefanidis, Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a couette cell. *Journal of Food Engineering*, 160, 34–41, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.015>.
- [25] I. Zahari, F. Ferawati, A. Helstad, C. Ahlström, K. Östbring, M. Rayner and J. K. Purhagen, Development of high-moisture meat analogues with hemp and soy protein using extrusion cooking. *Foods*, 9, 772, 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9060772>.
- [26] U. Fresán, M. A. Mejia and W. J. Craig, K. Jaceldo-Siegl and J. Sabaté, Meat analogs from different protein sources: a comparison of their sustainability and nutritional content. *Sustainability*, 11 (12), 3231, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11123231>.
- [27] J. Yu, M. Ahmedna and I. Goktepe, Peanut protein concentrate: Production and functional properties as affected by processing. *Food chemistry*, 103 (1), 121–29, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.08.012>.
- [28] D. Rehrach, M. Ahmedna, I. Goktepe and J. Yu, Extrusion parameters and consumer acceptability of a peanut-based meat analogue. *International journal of food science & technology*, 44, 2075–2084, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02035.x>.
- [29] J. Zhang, L. Liu, Y. Jiang, F. Shah, Y. Xu and Q. Wang, High-moisture extrusion of peanut protein-/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure. *Food Hydrocolloids*, 99, 105311, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105311>.
- [30] J. Zhang, L. Liu, Y. Jiang, S. Faisal and Q. Wang, A new insight into the high-moisture extrusion process of peanut protein: From the aspect of the orders and amount of energy input. *Journal of Food Engineering*, 264, 109668, 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.015>.
- [31] M. Fiorentini, A. J. Kinchla and A. A. Nolden, Role of sensory evaluation in consumer acceptance of plant-based meat analogs and meat extenders: A scoping review. *Foods*, 9 (9), 1334, 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9091334>.
- [32] S. R. Nadathur, J. P. D. Wanasundara and L. Scanlin, *Sustainable Protein Sources*. Academic Press, USA, 2016.
- [33] S. Huang, L. M. Wang, T. Sivendiran and B. M. Bohrer, Amino acid concentration of high protein food products and an overview of the current methods used to determine protein quality. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58 (15), 2673–2678, 2018. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1396202>.
- [34] A. C. Y. Lam, A. Can Karaca, R. T. Tyler and M. T. Nickerson, Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality. *Food Reviews International*, 34, 126–147, 2018. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1242135>.
- [35] R. Chilón-Llico, L. Siguas-Cruzado, C. R. Apaza-Humerez, W. C. Morales-García and R. J. Silva-Paz, Protein Quality and Sensory Perception of Hamburgers Based on Quinoa, Lupin and Corn. *Foods*, 11(21), 3405, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11213405>.

- [36] D. B. Konuskan, M. Arslan and A. Oksuz, Physicochemical properties of cold pressed sunflower, peanut, rapeseed, mustard and olive oils grown in the Eastern Mediterranean region. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26 (2), 340-344, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.04.005>.
- [37] J. P. Wanasundara, Proteins of Brassicaceae oilseeds and their potential as a plant protein source. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51 (7), 635-677. 2011. <https://doi.org/10.1080/10408391003749942>.
- [38] J. P. Wanasundara, T. C. McIntosh, S. P. Perera, T. S. Withana-Gamage and P. Mitra, Canola/rapeseed protein-functionality and nutrition. *Oilseeds&fats Crops and Lipids*, 23 (4), D407, 2016. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016028>.
- [39] A. Chmielewska, M. Kozłowska, D. Rachwał, P. Wnukowski, R. Amarowicz, E. Nebesny and J. Rosicka-Kaczmarek, Canola/rapeseed protein-nutritional value, functionality and food application: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-21, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1809342>.
- [40] FoodData Central. <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/172423/nutrients>, Accessed 20 November 2021.
- [41] S. H. M. Gorissen, J. J. R. Crombag, J. M. G. Senden, W. A. H. Waterval, J. Bierau, L. B. Verdijk and L. J. C. van Loon, Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids*, 50, 1685–1695, 2018. *Amino Acids* (2018) <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2640-5>.
- [42] Y. Peng, N. Kersten, K. Kyriakopoulou and A. J. van der Goot, Functional properties of mildly fractionated soy protein as influenced by the processing pH. *Journal of Food Engineering*, 275, 109875, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109875>.
- [43] T. D. Alexandrino, R. A. Ferrari, L. M. de Oliveira, S. C. Rita de Cássia and M. T. B. Pacheco, Fractioning of the sunflower flour components: Physical, chemical and nutritional evaluation of the fractions. *LWT*, 84, 426-432, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.062>.
- [44] P. R. Salgado, S. E. Molina Ortiz, S. Petruccelli and A.N. Mauri, Functional food ingredients based on sunflower protein concentrates naturally enriched with antioxidant phenolic compounds. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89, 825–836, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11746-011-1982-x>.
- [45] M. A. Malik and C. S. Saini, Improvement of functional properties of sunflower protein isolates near isoelectric point: Application of heat treatment. *LWT*, 98, 411–417, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.009>.
- [46] M. A. Malik and C. S. Saini, Rheological and structural properties of protein isolates extracted from dephenolized sunflower meal: Effect of high intensity ultrasound. *Food Hydrocolloids*, 81, 229–241, 2018b. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.052>.
- [47] S. S. Teh, A. E. D. Bekhit, A. Carne and J. Birch, Effect of the defatting process, acid and alkali extraction on the physicochemical and functional properties of hemp, flax and canola seed cake protein isolates. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 8 (2), 92-104, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9168-x>.
- [48] J. H. Kim, N. V. Varankovich, A. K. Stone and M. T. Nickerson, Nature of protein-protein interactions during the gelation of canola protein isolate networks. *Food Research International*, 89, 408–414, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.018>.
- [49] F. O. Uruakpa and S. D. Arntfield, Rheological characteristics of commercial canola protein isolate- κ-carrageenan systems. *Food Hydrocolloids*, 18, 419-427, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2003.07.001>.
- [50] C. Larré, W. Mulder, R. Sánchez-Vioque, J. Lazko, S. Bérot, J. Guéguen and Y. Popineau, Characterisation and foaming properties of hydrolysates derived from rapeseed isolate. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 49, 40-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2006.02.009>.
- [51] Y. Y. Stark, Y. Wada and A. Wäsche, Chemical composition, functional properties, and bioactivities of rapeseed protein isolates. *Food Chemistry*, 107, 32-39, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.061>.
- [52] M. D. Santos, D. A. V. F. D. Rocha, O. D. Bernardinelli, F. D. Oliveira Júnior, D. G. de Sousa, E. Sabadini, R. L. da Cunha, M. A. Trindade and M. A. R. Pollonio, Understanding the Performance of Plant Protein Concentrates as Partial Meat Substitutes in Hybrid Meat Emulsions. *Foods*, 11(21), 3311, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11213311>.
- [53] J. Gu, Z. Xin, X. Meng, S. Sun, Q. Qiao and H. Deng, A “reduced-pressure distillation” method to prepare zein-based fat analogue for application in mayonnaise formulation. *Journal of Food Engineering*, 182, 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.026>.
- [54] E. Blanco, S. K. Smoukov, O. D. Velez and K. P. Velikov, Organic-inorganic patchy particles as a versatile platform for fluid-in-fluid dispersion stabilisation. *Faraday Discussions*, 191, 73-88, 2016. <https://doi.org/10.1039/c6fd00036c>.
- [55] S. Jeong, H. W. Kim and S. Lee, Rheological and secondary structural characterization of rice flour-zein composites for noodles slit from gluten-free sheeted dough. *Food Chemistry*, 221, 1539-1545, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.139>.
- [56] B. M. Smith, S. R. Bean, G. Selling, D. Sessa and F. M. Aramouni, Effect of salt and ethanol addition on zein-starch dough and bread quality. *Journal of Food Science*, 82, 613-621, 2017. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13637>.
- [57] J. Glusac, I. Davidesko-Vardi, S. Isaschar-Ovdat, B. Kukavica and A. Fishman, Gel-like emulsions stabilized by tyrosinase-crosslinked potato and zein proteins. *Food Hydrocolloids*, 82, 53-63, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.046>.
- [58] K. D. Mattice and A. G. Marangoni, Comparing methods to produce fibrous material from zein. *Food Research International*, 128, 108804, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108804>.

- [59] P. Kumar, M. K. Chatli, N. Mehta, P. Singh, O. P. Malav and A. K. Verma, Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (5), 923-932, 2017. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939739>.
- [60] P. Kumar, B. D. Sharma and R. R. Kumar, Optimization of the egg albumen content in analogue meat nuggets. *Indian Journal of Poultry Science*, 45 (2), 177-179, 2010.
- [61] X. Yuan, W. Jiang, D. Zhang, H. Liu and B. Sun, Textural, sensory and volatile compounds analyses in formulations of sausages analogue elaborated with edible mushrooms and soy protein isolate as meat substitute. *Foods*, 11 (1), 52, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods11010052>.
- [62] A. P. J. Trinci, Evolution of the Quorn® myco-protein fungus, *Fusarium graminearum* A3/5. *Microbiology (Reading)*, 140, 2181-2188, 1994. <https://doi.org/10.1099/13500872-140-9-2181>.
- [63] S. Y. Cho and G. H. Ryu, Effects of oyster mushroom addition on quality characteristics of full fat soy-based analog burger patty by extrusion process. *Journal of Food Process Engineering*, e14128, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14128>.
- [64] J. M. Lorenzo, R. Agregán, P. E. S. Munekata, D. Franco, J. Carballo, S. Sahin, R. Lacombe and F. J. Barba, Proximate composition and nutritional value of three macroalgae: *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *Bifurcaria bifurcate*. *Marine Drugs*, 15, 360, 2017. <https://doi.org/10.3390/md15110360>.
- [65] S. L. Holdt and S. Kraan, Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23, 543-597, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>.
- [66] L. Pereira, A review of the nutrient composition of selected edible seaweeds. In *Seaweeds: ecology, nutrient composition and medicinal uses*. V. H. Ponin, Eds. Nova Science Publishers, Hauppauge, pp. 30, 2011.
- [67] M. C. Taboada, R. Millán and M. I. Miguez, Nutritional value of the marine algae wakame (*Undaria pinnatifida*) and nori (*Porphyra purpurea*) as food supplements. *Journal of Applied Phycology*, 25, 1271-1276, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10811-012-9951-9>.
- [68] A. R. Angell, L. Mata, R. de Nys and N. A. Paul, The protein content of seaweeds: a universal nitrogen-to-protein conversion factor of five. *Journal of Applied Phycology*, 28, 511-524, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0650-1>.
- [69] M. L. Wells, P. Potin, J. S. Craigie, J. A. Rayen, S. S. Merchant, K. E. Helliwell, A. G. Smith, M. E. Camire and S. H. Brawley, Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*, 29, 949-982, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>.
- [70] J. M. Ballesteros-Torres, L. Samaniego-Moreno, R. Gomez-Flores, R. S. Tamez-Guerra, C. Rodríguez-Padilla and P. Tamez-Guerra, Amino acids and acylcarnitine production by *Chlorella vulgaris* and *Chlorella sorokiniana* microalgae from wastewater culture. *PeerJ*, 7, e7977, 2019. <https://doi.org/10.7717/peerj.7977>.
- [71] T. Bito, E. Okumura, M. Fujishima and F. Watanabe, Potential of Chlorella as a dietary supplement to promote human health. *Nutrients*, 12 (9), 2524, 2020. <https://doi.org/10.3390/nu12092524>.
- [72] S. Grahl, M. Palanisamy, M. Strack, L. Meier-Dinkel, S. Toepfl and D. Mörlein, Towards more sustainable meat alternatives: How technical parameters affect the sensory properties of extrusion products derived from soy and algae. *Journal of Cleaner Production*, 198, 962-971, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.041>.
- [73] M. P. Caporgno and A. Mathys, Trends in microalgae incorporation into innovative food products with potential health benefits. *Frontiers in Nutrition*, 5, 1-10, 2018. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00058>.
- [74] M. P. Caporgno, L. Böcker, C. Müssner, E. Stirnemann, I. Haberkorn, H. Adelman, S. Handschin, E. J. Windhab and A. Mathys, Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides* microalgae. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 59, 102275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102275>.
- [75] M. Karaś, A. Jakubczyk, U. Szymanowska, U. Złotek and E. Zielińska, Digestion and bioavailability of bioactive phytochemicals. *International Journal of Food Science & Technology*, 52 (2), 291-305, 2017. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13323>.
- [76] I. Joye, Protein digestibility of cereal products. *Foods*, 8 (6), 199, 2019. <https://doi.org/10.3390/foods8060199>.
- [77] A. G. A. Sá, Y. M. F. Moreno and B. A. M. Carciofi, Food processing for the improvement of plant proteins digestibility. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60 (20), 3367-3386, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1688249>.
- [78] M. Lonnie and A. M. Johnstone, The public health rationale for promoting plant protein as an important part of a sustainable and healthy diet. *Nutrition Bulletin*, 45 (3), 281-293, 2020. <https://doi.org/10.1111/nbu.12453>.
- [79] H. G. Zhu, H. Q. Tang, Y. Q. Cheng, Z. G. Li and L. T. Tong, Potential of preparing meat analogue by functional dry and wet pea (*Pisum sativum*) protein isolate. *LWT*, 148, 111702, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111702>.
- [80] H. Singh and F. MacRitchie, Application of polymer science to properties of gluten. *Journal of Cereal Science*, 33 (3), 231-243, 2001. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2000.0360>.
- [81] F. Wild, M. Czerny, A. M. Janssen, A. P. Kole, M. Zunabovic and K. J. Domig, The evolution of a plant-based alternative to meat. *Agro FOOD Industry Hi Tech*, 25 (1), 45-49, 2014.
- [82] S. Samard and G. H. Ryu, A comparison of physicochemical characteristics, texture, and structure

- of meat analogue and meats. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (6), 2708-2715, 2019. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9438>.
- [83] N. Sharima-Abdullah, C. Z. Hassan, N. Arifin and N. Huda-Faujan, Physicochemical properties and consumer preference of imitation chicken nuggets produced from chickpea flour and textured vegetable protein. *International Food Research Journal*, 25 (3), 1016-1025, 2018.
- [84] J. Dreher, C. Blach, N. Terjung, M. Gibis and J. Weiss, Formation and characterization of plant-based emulsified and crosslinked fat crystal networks to mimic animal fat tissue. *Journal of Food Science*, 85 (2), 421-431, 2020. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14993>.
- [85] L. Sha and Y. L. Xiong, Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 51-61, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>.
- [86] J. Dreher, M. König, K. Herrmann, N. Terjung, M. Gibis and J. Weiss, Varying the amount of solid fat in animal fat mimetics for plant-based salami analogues influences texture, appearance and sensory characteristics. *LWT*, 143, 111140, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111140>.
- [87] B. M. Bohrer, An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. *Food Science and Human Wellness*, 8 (4), 320-329, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.11.006>.
- [88] L. Godschalk-Broers, G. Sala and E. Scholten, Meat Analogues: Relating Structure to Texture and Sensory Perception. *Foods*, 11(15), 2227, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11152227>.
- [89] M. S. Arshad, M. Sohaib, R. S. Ahmad, M. Nadeem, T. Imran, A. M. U. Arshad, J. H. Kwon and Z. Amjad, Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. *Lipids in health and disease*, 17 (1), 223, 2018. <https://doi.org/10.1186/s12944-018-0860-z>.
- [90] C. Spence, On the psychological impact of food colour. *Flavour*, 4 (1), 1-16, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13411-015-0031-3>.
- [91] Y. Dai, J. Miao, S. Z. Yuan, Y. Liu, X. M. Li and R. T. Dai, Colour and sarcoplasmic protein evaluation of pork following water bath and ohmic cooking. *Meat Science*, 93(4), 898-905, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.044>.
- [92] B. Marcos, J. P. Kerry and A. M. Mullen, High pressure induced changes on sarcoplasmic protein fraction and quality indicators. *Meat Science*, 85(1), 115-120, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.12.014>.
- [93] J. He, N. M. Evans, H. Liu and S. Shao, A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19 (5), 2639-2656, 2020. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12610>.
- [94] S. Xia, Y. Xue, C. Xue, J. Xiaoming and J. Li, Structural and rheological properties of meat analogues from *Haematococcus pluvialis* residue-pea protein by high moisture extrusion. *LWT*, 154, 112756, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112756>.
- [95] R. Z. Fraser, M. Shitut, P. Agrawal, O. Mendes and S. Klapholz, Safety evaluation of soy leghemoglobin protein preparation derived from *Pichia pastoris*, intended for use as a flavor catalyst in plant-based meat. *International journal of toxicology*, 37 (3), 241-262, 2018. <https://doi.org/10.1177/1091581818766318>.
- [96] N. R. Rubio, N. Xiang and D. L. Kaplan, Plant-based and cell-based approaches to meat production. *Nature Communications*, 11 (1), 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20061-y>.
- [97] M. De Marchi, A. Costa, M. Pozza, A. Goi and C. L. Manuélian, Detailed characterization of plant-based burgers. *Scientific reports*, 11 (1), 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81684-9>.
- [98] M. W. Orcutt, A. Sandoval, T. J. Mertle, I. Mueller, P. A. Altemueller and J. Downey, U.S. Patent 12, 061,843, 2008.
- [99] K. Kołodziejczak, A. Onopiuk, A. Szpicer and A. Poltorak, Meat Analogues in the perspective of recent scientific research: A review. *Foods*, 11 (1), 105, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods11010105>.
- [100] K. Okubo, M. Iijima, Y. Kobayashi, M. Yoshikoshi, T. Uchida and S. Kudou, Components responsible for the undesirable taste of soybean seeds. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 56 (1), 99-103, 1992. <https://doi.org/10.1271/bbb.56.99>.
- [101] B. Wang, Q. Zhang, N. Zhang, K. H. Bak, O. P. Soladoye, Aluko, R. E., Z. Fu and Y. Zhang, Insights into formation, detection and removal of the beany flavor in soybean protein. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 336-347, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.018>.
- [102] X. Li and J. Li, The Flavor of plant-based meat analogues. *Cereal Foods World*, 65 (4), 2020. <https://doi.org/10.1094/CFW-65-4-0040>.
- [103] L. Webb, A. Fleming, L. Ma and X. Lu, Uses of cellular agriculture in plant-based meat analogues for improved palatability. *ACS Food Science & Technology*, 1 (10), 1740-1747, 2021. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00248>.
- [104] G. P. Hong and Y. L. Xiong, Microbial transglutaminase-induced structural and rheological changes of cationic and anionic myofibrillar proteins. *Meat Science*, 91 (1), 36-42, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.12.002>.
- [105] USDA, <https://www.fsis.usda.gov/food-safety/safe-food-handling-and-preparation/food-safety-basics/additives-meat-and-poultry> Accessed 24 November 2021.
- [106] S. Soto-Jover, M. Boluda-Aguilar, A. Esnoz-Nicuesa, A. Iguaz-Gainza and A. López-Gómez, Texture, oil adsorption and safety of the European style croquettes manufactured at industrial scale. *Food*

- engineering reviews, 8 (2), 181-200, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9130-2>.
- [107] Z. Forghani, M. H. Eskandari, M. Aminlari and S. S. Shekarforoush, Effects of microbial transglutaminase on physicochemical properties, electrophoretic patterns and sensory attributes of veggie burger. *Journal of food science and technology*, 54 (8), 2203-2213, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2614-8>.
- [108] B. L. Dekkers, R. M. Boom and A. J. van der Goot, Structuring processes for meat analogues. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 25-36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011>.
- [109] B. Arora, S. Kamal and V. P. Sharma, Effect of binding agents on quality characteristics of mushroom based sausage analogue. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(5), e13134, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13134>.
- [110] M. J. Post, Cultured meat from stem cells: Challenges and prospects. *Meat science*, 92 (3), 297-301, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.008>.
- [111] R. Zhang, S. A. Khan, J. Chi, Z. Wei, Y. Zhang, Y. Deng, L. Liu and M. Zhang, Different effects of extrusion on the phenolic profiles and antioxidant activity in milled fractions of brown rice. *LWT - Food Science and Technology*, 88, 64-70, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.042>.
- [112] V. L. Pietsch, R. Werner, H. P. Karbstein and M. A. Emin, High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics. *Journal of Food Engineering*, 259, 3-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.006>.
- [113] F. K. Schreuders, M. Schlangen, K. Kyriakopoulou, R. M. Boom and A. J. van der Goot, Texture methods for evaluating meat and meat analogue structures: A review. *Food Control*, 127, 108103, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108103>.
- [114] R. Osen, S. Toelstede, F. Wild, P. Eisner and U. Schweiggert-Weisz, High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. *Journal of Food Engineering*, 127, 67-74, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.023>.
- [115] J. Zhang, L. Liu, H. Liu, A. Yoon, S. S. Rizvi and Q. Wang, Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (20), 3267-3280, 2019. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1487383>.
- [116] F. Ferawati, I. Zahari, M. Barman, M. Hefni, C. Ahlström, C. Witthöft and K. Östbring, High-moisture meat analogues produced from yellow pea and faba bean protein isolates/concentrate: Effect of raw material composition and extrusion parameters on texture properties. *Foods*, 10 (4), 843, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10040843>.
- [117] S. Samard, B. Y. Gu and G. H. Ryu, Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (11), 4922-4931, 2019. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9722>.
- [118] G. Robin, *Extrusion cooking: Technology and applications*. NW: Wood Head Publishing Limited and CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [119] G. L. Garrison, J. T. Biermacher and B. W. Brorsen, How much will large-scale production of cell-cultured meat cost?. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100358, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100358>.
- [120] I. Datar and M. Betti, Possibilities for an in vitro meat production system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(1), 13-22, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.10.007>.
- [121] K. D. Fish, N. R. Rubio, A. J. Stout, J. S. Yuen and D. L. Kaplan, Prospects and challenges for cell-cultured fat as a novel food ingredient. *Trends in food science & technology*, 98, 53-67, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.005>.
- [122] V. Bodiou, M. Panagiota and M. J. Post, Microcarriers for upscaling cultured meat production. *Frontiers in nutrition*, 7(10), 2020. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00010>.
- [123] M. Nieuwland, P. Geerdink, P. Brier, P. Van Den Eijnden, J. T. Henket, M. L. Langelaan, N. Stroeks, H.C. van Deventer and A. H. Martin, Reprint of "Food-grade electrospinning of proteins". *Innovative food science & emerging technologies*, 24, 138-144, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.07.006>.
- [124] J. D. Schiffman and C. L. Schauer, A review: electrospinning of biopolymer nanofibers and their applications. *Polymer reviews*, 48 (2), 317-352, 2008. <https://doi.org/10.1080/15583720802022182>.
- [125] I. Kutzli, M. Gibis, S. K. Baier and J. Weiss, Electrospinning of whey and soy protein mixed with maltodextrin—Influence of protein type and ratio on the production and morphology of fibers. *Food hydrocolloids*, 93, 206-214, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.028>.
- [126] J. M. Manski, A. J. van der Goot and R. M. Boom, Formation of fibrous materials from dense calcium caseinate dispersions. *Biomacromolecules*, 8 (4), 1271-1279, 2007. <https://doi.org/10.1021/bm061008p>.
- [127] S. H. Peighambaridoust, A. J. Van Der Goot, R. J. Hamer and R. M. Boom, A new method to study simple shear processing of wheat gluten-starch mixtures. *Cereal chemistry*, 81 (6), 714-721, 2004. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.6.714>.
- [128] J. M. Manski, E. E. van der Zalm, A. J., van der Goot and R. M. Boom, Influence of process parameters on formation of fibrous materials from dense calcium caseinate dispersions and fat. *Food Hydrocolloids*, 22 (4), 587-600, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.02.006>.
- [129] G. A. Krintiras, J. G. Diaz, A. J. Van Der Goot, A. I. Stankiewicz and G. D. Stefanidis, On the use of the Couette Cell technology for large scale production of

- textured soy-based meat replacers. *Journal of Food Engineering*, 169, 205-213, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.021>.
- [130] F. I. Consolacion and P. Jelen, Freeze texturization of proteins: effect of the alkali, acid and freezing treatments on texture formation. *Food microstructure (USA)*, 5 (1), 33-39, 1986.
- [131] O. Yuliarti, T. J. K. Kosis and N. J. Yi, Structuring the meat analogue by using plant-based derived composites. *Journal of food engineering*, 288, 110138, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110138>.
- [132] A. Baiano, 3D printed foods: A comprehensive review on technologies, nutritional value, safety, consumer attitude, regulatory framework, and economic and sustainability issues. *Food Reviews International*, 38 (5), 986-1016, 2022. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1762091>.
- [133] S. V. Murphy and A. Atala, 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature biotechnology*, 32 (8), 773-785, 2014. <https://doi.org/10.1038/nbt.2958>.
- [134] T. Wang, L. Kaur, Y. Furuhashi, H. Aoyama and J. Singh, 3D Printing of Textured Soft Hybrid Meat Analogues. *Foods*, 11 (3), 478, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11030478>.
- [135] F. C. Godoi, S. Prakash and B. R. Bhandari, 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179, 44-54, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025>.
- [136] S. Razavizadeh, G. Alencikiene, A. Salaseviciene, L. Vaiculyte-Funk, P. Ertbjerg and A. Zabulione, Impact of fermentation of okara on physicochemical, techno-functional, and sensory properties of meat analogues. *European Food Research and Technology*, 247 (9), 2379-2389, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03798-8>.
- [137] P. Nanta, W. Skolpap and K. Kasemwong, Influence of hydrocolloids on the rheological and textural attributes of a gluten-free meat analog based on soy protein isolate. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45 (3), e15244, 2021. <https://doi.org/10.1111/jffpp.15244>.
- [138] J. E. Elzerman, A. C. Hoek, M. A. Van Boekel and P. A. Luning, Consumer acceptance and appropriateness of meat substitutes in a meal context. *Food Quality and Preference*, 22, 233-240, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2010.10.006>.
- [139] C. I. Omohimi, P. O. Sobukola, K. O. Sarafadeen and L. O. Sanni, Effect of process parameters on the proximate composition, functional and sensory properties. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 7 (4), 269-278, 2013.
- [140] N. Kitcharoenthawornchai and T. Harnsilawat, Characterization of meat analogue nugget: effect of textured vegetable protein. *Food and Applied Bioscience Journal*, 3 (2), 121-129, 2015. <https://doi.org/10.14456/fabj.2015.12>.
- [141] M. Asgar, A. Fazilah, N. Huda, R. Bhat and A. A. Karim, Nonmeat protein alternatives as meat extenders and meat analogs. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 9 (5), 513-529, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00124.x>.
- [142] R. Guy, *Extrusion Cooking: Technology and Applications*, G. Robin, Eds. CRC Press, England, 2001.
- [143] C. J. Steel, M. G. V. Leoro, M. Schmiele, R. E. Ferreira and Y. K. Chang, *Thermoplastic Extrusion in Food Processing. Thermoplastic Elastomers*, 265-290, 2012.
- [144] A. J. Tóth, A. Dunay, M. Battay, C. B. Illés, A. Bittsánszky and M. Süth, Microbial Spoilage of Plant-Based Meat Analogues. *Applied Sciences*, 11 (18), 8309, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11188309>.
- [145] P. Yadav, S. S. Ahlawat, G. Jairath, M. Rani and S. Bishnoi, Studies on physico-chemical properties and shelf life of developed chicken meat analogue rolls. *Haryana Veterinarian*, 54 (1), 25-28, 2015.
- [146] M. J. Sadler, Meat alternatives: market developments and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 250-260, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.003>.
- [147] L. M. Keefe, FakeMeat: How big a deal will animal meat analogs ultimately be?. *Animal Frontiers*, 8 (3), 30-37, 2018. <https://doi.org/10.1093/af/vfy011>.
- [148] A. C. Hoek, P. A. Luning, P. Weijzen, W. Engels, F. J. Kok and C. De Graaf, Replacement of meat by meat substitutes. A survey on person-and product-related factors in consumer acceptance. *Appetite*, 56 (3), 662-673, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.02.001>.
- [149] A. C. Hoek, J. E. Elzerman, R. Hageman, F. J. Kok, P. A. Luning and C. De Graaf, Are meat substitutes liked better over time? a repeated in-home use test with meat substitutes or meat in meals. *Food Quality and Preference*, 28 (1), 253-263, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.07.002>.
- [150] C. Hartmann and M. Siegrist, Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 61, 11-25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006>.
- [151] F. Jiang, P. Kongsaree, R. Charron, C. Lajoie, H. Xu, G. Scott and C. Kelly, Production and separation of manganese peroxidase from heme amended yeast cultures. *Biotechnology and Bioengineering*, 99 (3), 540-549, 2008. <https://doi.org/10.1002/bit.21590>.
- [152] K. Sutton, N. Larsen, G. J. Moggre, L. Huffman, B. Clothier, J. Eason and R. Bourne, Opportunities in Plant-Based Foods: Protein. Plant & Food Research Report Prepared For Ministry of Primary Industries and Plant & Food Research, 15748, 2018.
- [153] O. Parniakov, S. Toepfl, F. J. Barba, D. Granato, S. Zamuz, F. Galvez and J. M. Lorenzo, Impact of the soy protein replacement by legumes and algae based proteins on the quality of chicken rotti. *Journal of Food Science and Technology*, 55, 2552-2559, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3175-1>.

- [154] F. Boukid and M. Castellari, Food and beverages containing algae and derived ingredients launched in the market from 2015 to 2019: A front-of-pack labeling perspective with a special focus on Spain. *Foods*, 10 (1), 173, 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10010173>.
- [155] R. Weinrich and O. Elshiewy, Preference and willingness to pay for meat substitutes based on micro-algae. *Appetite*, 142, 104353, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.104353>.
- [156] C. Bryant, K. Szejda, N. Parekh, V. Deshpande and B. Tse, A survey of consumer perceptions of plant-based and clean meat in the USA, India, and China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 11, 2019. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00011>.
- [157] T. M. Ngapo, Meat analogues, the Canadian Meat Industry and the Canadian consumer. *Meat Science*, 108846, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2022.108846>.





Antalya ilindeki 4 ve 5 yıldızlı otel mutfaklarında uygulanan gıda güvenliği yönetimi sistemlerinin değerlendirilmesi

Evaluation of food safety management systems applied in the kitchen of 4 and 5 stars hotels in Antalya

Mihriban Ülkü Körk¹, Bedia Şimşek², İlhan Gün^{3*}

^{1,2}Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü,, 32100, Isparta, Türkiye

³Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Burdur Gıda Tarım ve hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, 15100, Burdur, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı Antalya’da dört ve beş yıldızlı otel işletmelerinde çalışan yöneticilerin ve personelin gıda güvenliği yönetim sistemleri hakkındaki bilgi ve uygulama seviyelerini değerlendirmektir. Araştırma kapsamına alınan 153 otel işletmesinin; 65’ i dört yıldızlı, 88’ i beş yıldızlıdır. Araştırma verileri Eylül-Kasım 2021 döneminde toplanmıştır. Toplanan veriler istatistik paket programı SPSS 28.0 ile analiz edilmiştir. Verilere frekans testleri ve Ki-Kare testleri uygulanmıştır. Çalışmaya katılan otel yöneticilerinin tamamı, işletmelerinin ISO 22000 (HACCP) Gıda Güvenliği Yönetim Sistemine sahip olduğunu bildirmiştir. Yönetici düzeyinde çalışan personelin HACCP sisteminin uygulanması esnasında en çok zorlandıkları basamağın kayıt ve dökümantasyon basamağı olduğu belirlenmiştir. Çalışmada gıda güvenliğinin yenilenme sıklığı işletmelerin % 49’ unda her yıl ve % 31.4’ ünde her ay, % 6.5’ inin ise hiç yenilemediği tespit edilmiştir. Personelin tamamının gıda güvenliği ve hijyen konusunda bilgilerinin olduğu saptanmıştır. Otel işletmelerinde çalışan mutfak personelinin % 96.2’ si düzenli hizmetiçi eğitim almaktadır. Personelin tamamı işe başlamadan önce sağlık kontrollerinden geçmekte olup, personelin % 57.7’ sinin yılda bir defa sağlık kontrolleri yenilenmektedir.

Anahtar kelimeler: Anket, Gıda güvenliği yönetim sistemi, HACCP, Kalite, Otel

1 Giriş

Otel işletmeleri, konuklarına restoran ve mutfak aracılığıyla yeme içme, konaklama hizmeti sunan tesislerdir. Konukların memnuniyeti açısından en büyük pay sahibi yiyecek içecek hizmeti veren departmanlardır [1]. Günümüzde gıda ürünlerinin üretiminin ve çeşitliliğinin artması ile güvenli ve sağlıklı gıda üretmekte zorunlu hale gelmiştir. Gıdaların güvenliğinin korunması amacıyla kalite kontrolleri yerini kalite güvenliğine bırakmıştır. Gıda Güvenliği Sistemleri; gıdanın tüm üretim işlemleri boyunca karşılaşılabileceği tüm tehlikelere karşı güvenilir bir şekilde üretiminin ve tüketiminin sağlanması için oluşturulmuş bir sistemdir [2, 3]. Dünyada güvenli ve kaliteli gıda üretimi için kullanılan sistemler: Gıda Güvenliği Sistemi (GHP, GMP,

Abstract

The aim of the study is to evaluate the levels of knowledge and implementation on food safety management systems of managers and staff in four and five-star hotel enterprises in Antalya. The research was included 153 hotel businesses; 65 of them are four-star, 88 of them are five-star. Research data were collected in September-November 2021 period. The collected data was analyzed with statistical package program SPSS 28.0. Frequency tests and Chi-Square tests were applied to data. All of the hotel managers participating in the study reported that their businesses had ISO 22000 (HACCP) Food Safety Management System. It has been determined that the most uncomfortable step working as manager, during the implementation of the HACCP system is the registration and documentation in phase. In the study, it was determined that the frequency of renewal of food safety was every year in 49 % of the enterprises and every month in 31.4 %, and 6.5 % of them never renewed. All of the staff were found to have information on food safety and hygiene. In hotel businesses, 96.2% of the kitchen staff working were regularly in service training. All of the staff undergo health checks before starting work, and 57.7 % of the staff renew their health checks once a year.

Keywords: Food safety management system, HACCP, Hotel, Survey, Quality

HACCP, ISO 22000), Kalite Güvence Sistemi (ISO 9000), Çevre Yönetim Sistemi (ISO 14001), İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Standardı (OHSAS 18001), Sosyal Sorumluluk Standardı (SA8000) dir [4]. HACCP sistemi gıdanın mikrobiyolojik açıdan kontrol edilebilmesini kalitesini ve kabul edilebilirlik olarak tamamını kapsamaktadır [5, 6].

Yiyecek içecek hizmeti veren otel mutfakları ve personelinin hijyen yönünden değerlendirildiği, gıda güvenliği ve personel bilgileri üzerine yapılmış farklı il ve ülkelerde çalışmalar bulunmaktadır. Ankara [7, 8], Tokat [9], Trabzon, Çanakkale, Gaziantep ve İzmir İli Çeşme İlçesi [10] gibi Türkiye’ nin farklı illeri ile Dubai, Almanya İspanya [11] gibi diğer ülkelerde bulunan dört ve beş yıldızlı oteller

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: igun@mehmetakif.edu.tr (İ. Gün)

Geliş / Received: 10.07.2022 Kabul / Accepted: 05.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1142963

ve bunların mutfaklarındaki durumu ortaya koyan araştırma çalışmaları bunlardan sadece birkaçıdır.

Turizm işletme belgesine sahip 682 adet 5 yıldızlı otelin % 49.85' i Akdeniz bölgesinde yer almakta olup [12], Antalya ili ve çevresi turizm açısından Türkiye'nin önemli tatil bölgelerinden biridir. Bu çalışmanın amacı Antalya ilinde hizmet veren dört ve beş yıldızlı otel mutfaklarında görevli yöneticilerin ve personelin gıda güvenliği ve yönetim sistemleri hakkındaki bilgi ve uygulama düzeyleri değerlendirmektir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Araştırmanın temel materyalini Antalya ilinde ve ilçelerinde faaliyet gösteren dört ve beş yıldızlı toplam 516 işletmede yönetici ve personel düzeyinde çalışan kişiler oluşturmaktadır. Araştırma kapsamına alınan 153 otel işletmesinin; 65'i dört yıldızlı, 88'i beş yıldızlıdır.

2.2 Metod

Araştırmada veri toplama yöntemi olarak anket yöntemi uygulanmıştır. Yönetici ve personel olmak üzere iki farklı anket formu düzenlenmiş ve Eylül-Kasım 2021 döneminde araştırma verileri toplanmıştır. Çalışmada yönetici düzeyinde 4'ü kişisel bilgi olmak üzere toplamda 24 soru, personel düzeyinde 5'i kişisel olmak üzere toplamda 30 soru yöneltilmiştir.

2.2.1 İstatistiksel analizler

Araştırmada elde edilen veriler Microsoft ofis programları kullanılarak derlenmiş ve SPSS (Statistical Package of the Social Sciences) versiyon 28.0.1.0 programı kullanılarak istatistik verileri elde edilmiştir. Öncelikle yönetici ve personel düzeyinde uygulanan anket çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. Toplanan veriler analiz edilirken frekans (f) ve yüzde (%) değerleri kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Yöneticilerden elde edilen bulgular

Çalışmamız da elde edilen cinsiyet, yaş, eğitim, hizmet süresi, otel yıldız sayısı, çalışan sayısı, yönetim türü verileri **Tablo 1**' de verilmiştir. Genellikle yönetici grupta gıda mühendisleri ve kalite müdürlerinin yer aldığı ve anketi değerlendirdikleri gözlenmiştir. Çalışmamızda otel mutfaklarında yönetici pozisyonunda çalışanlardan %63.4'ünün kadın olduğu belirlenmiştir.

Başkan [13] araştırmasında çalışmaya katılan kişilerin cinsiyetlerinin, %35' inin kadın ve %65' inin erkek olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmadaki yöneticilerin otel bünyesindeki pozisyonları genel müdür, departman müdürü ve kalite müdürüdür.

Araştırmamızda 25-35 yaş arası çalışan sayısı %62.7 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle araştırmada yer alan otel işletmelerinin yönetici pozisyonundaki genç nüfusun daha aktif görev aldığı anlaşılmaktadır. Şan [14] çalışmasında personelin %20.5'inin 25-29 yaş aralığında olduğunu tespit etmiştir. Genç nüfusun otel işletmelerinde yönetici pozisyonunda daha aktif olarak görev aldığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada yönetici konumundaki personelin eğitim durumunun yüksek oranda lisans düzeyinde 4 yıllık fakülte mezunu olduğu görülmektedir. Şan [14] çalışmasında personelin eğitim durumu değerlendirildiğinde %16.6'sının yükseköğrenim mezunu olduğunu belirtmiştir. Çalışmada yetkili personelin mutfak şefi ve kısım şefi olduğu görülürken, çalışmamızda kalite müdürü, gıda mühendisi, işletme müdürü ve işletme sahibinden oluştuğu belirlenmiştir. Bu durum, özellikle küçük işletmelerde yönetici pozisyonunda yer alan kişilerin eğitim seviyelerinin düşük olduğunu, 4 ve 5 yıldızlı otellerde eğitim düzeyi yüksek olan personelin istihdam edildiği görülmektedir.

Tablo 1. Yönetici personelin cinsiyet, yaş, eğitim, hizmet süresi; otel işletmelerinin yıldız sayısı, çalışan sayısı, yönetim türü sıklığının dağılımları

		Adet	Yüzde %
Cinsiyet	Kadın	97	63.4
	Erkek	56	36.6
	Toplam	153	100
Yaş Aralığı	20-25	23	15
	26-30	60	39.2
	31-35	36	23.5
	36-40	18	11.8
	+>41	16	10.5
	Toplam	153	100
Eğitim Durumu	Ortaokul	5	3.3
	Lise	12	7.8
	Yüksekokul	7	4.6
	Fakülte	124	81
	Diğer	5	3.3
Toplam	153	100	
Hizmet Süreleri	0-5	84	54.9
	6-10	42	27.4
	11-15	9	5.9
	16-20	7	4.6
	+>21	11	7.2
	Toplam	153	100
Otel Yıldız Sayısı	4 Yıldızlı	65	42.5
	5 Yıldızlı	88	57.5
	Toplam	153	100
Çalışan Sayıları	0-250	31	20.3
	251-500	52	34
	501-750	47	30.7
	751-1000	17	11.1
	+>1001	6	3.9
Toplam	153	100	
Yönetim Türü	Ulusal Zincir	34	22.2
	Uluslararası Zincir	19	12.4
	Grup	53	34.6
	Bağımsız	47	30.8
	Toplam	153	100

Otellerde çalışan sayısına bakıldığında, %54.9 gibi yüksek bir oranın en fazla 5 yıl süre ile çalıştığı görülmektedir (Tablo 1). Çalışanların hem genç hem de çalışma sürelerinin kısa olması otellerde görev alan yöneticilerin yeni mezun olduğunu düşündürmektedir. Bu tercihin önemli sebeplerinden biri genç mezunların, mezun olmadan önce gıda güvenliği hijyen eğitimine (%98.7) sahip olması olabilir.

Antalya ilinde bulunan oteller üzerine yapılan bu çalışmada personelin gıda güvenliği ve hijyen-sanitasyon eğitimleri kalite güvence sistemleri belgesi veren özel işletmeler (%37.3) ve özel firma yetkilisi (%32.7) tarafından gerçekleştirilmiştir (Tablo 2). Çiftçi [15] tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, mutfak personelinin %93.8'inin gıda güvenliği, hijyen-sanitasyon, beslenme ve sağlık konularında eğitim aldığı bildirilmiştir. Çalışma verilerine göre, yönetici pozisyonundaki mutfak personelinin gıda güvenliği, hijyen-sanitasyon, beslenme ve sağlık konularında eğitim alanların %41.0'ı iş yeri yöneticisinden, %8.6'sı beslenme uzmanından, %27.5'i özel bir firma yetkilisinden, %23'ü okul yıllarındaki derslerden eğitimlerini almış oldukları gözlenmiştir. Araştırma bulguları, Çiftçi [15]'nin elde ettiği sonuçlarla paralellik göstermektedir.

Araştırmaya katılan yöneticiler kritik kontrol noktası belirlerken karar ağacı oluşturmada zorluk çektiklerini bildirmişlerdir. Taylan [16], turizm işletmelerinde gıda güvenliği ve HACCP kavramları üzerine gerçekleştirdiği çalışmasında otel çalışanlarının kritik kontrol noktalarını belirlerken %37.5'inin karar ağacı oluşturmada zorlandıklarını söylemiştir. Bulgularımıza göre, yönetici pozisyonunda görev alan kişilerin, eğitim almış olmalarına rağmen uygulamada büyük sıkıntı çektikleri görülmektedir. Araştırmaya katılım sağlayan personelin aynı zamanda HACCP sisteminin uygulanması sırasında birçok aşamada önemli düzeyde sıkıntı duydukları Çizelge 4.2'de gösterilmektedir. Bunlar içerisinde en çok kayıt ve dökümantasyon basamağında (%72.5) yaşanan sıkıntılar dikkati çekmektedir.

Antalya ili 4 ve 5 yıldızlı otelleri üzerine yürütülen bu çalışmanın verileri Taylan [16] tarafından paylaşılan verilerle yakınlık göstermektedir. Araştırmacı HACCP sisteminin uygulanması esnasında en çok zorlanılan aşamaların %62.5 gözetim aşaması, %37.5 kritik limitlerin belirlenmesi, %37.5 kayıtların tutulması, %25 tehlike analizlerinin yapılması, %12.5 kritik kontrol noktalarının belirlenmesi olduğunu tespit etmiştir. Düzeltici işlemlerin belirlenmesinde hiçbir işletmenin zorlanmadığını belirtmiştir [15]. Araştırmacının verileri, çalışmamızla benzerlik göstermektedir.

Otel işletmelerinin sahip oldukları gıda güvenliği yönetim sistemleri belgeleri ve yenilenme sıklığı dağılımları Tablo 3'te verilmiştir. Otellerin tamamının ISO 22000 uygulayıcısı olduğu görülmekle birlikte, diğer yönetim sistemlerine de yüksek oranda sahip oldukları belirlenmiştir.

Başkan (2012)'ın çalışmasına göre otellerin %95'i HACCP veya ISO 22000 kullanmakta, %70'i ISO 14001 Çevre Yönetimi Kalite Güvence Sistemine sahip bulunmakta, %40'ı da İşçi Sağlığı ve Güvenliği Kalite

Güvence sisteminin bulunduğu bildirmektedir. Taylan [16] ankete katılan işletmelerin %87.5'i ISO 9001:2000, %62.5'i HACCP, %25'i ISO14001 kalite güvence belgelerine sahip olduklarını belirtmiştir. Çalışmada her üç belgeye de sahip olan işletme sayısının %25, HACCP ve ISO 9001:2000 belgelerine sahip işletme sayısının %50 olduğu belirtilmektedir. Günümüzde çoğu işletme HACCP gibi gıda güvenliğini sağlamaya yönelik sistemler kullanmaktadır.

Tablo 2. Yöneticilerin gıda güvenliği ve hijyen sanitasyon bilgileri ve HACCP uygulanabilirliği dağılımları

		Adet	Yüzde%
Gıda Güvenliği hijyen sanitasyon eğitimi	Evet	151	98.7
	Hayır	2	1.3
	Toplam	153	100
Gıda Güvenliği hijyen sanitasyon eğitimini nereden aldınız?	TSE	23	15
	Özel İşletme	57	37.3
	Özel Firma Yetkilisi	50	32.7
	Okul Eğitimi	23	15
	Toplam	153	100
KKN belirlemede zorlanılan yer	Karar ağacı oluşturma esnasında zorlanıyorum	52	34
	Kritik kontrol noktalarının tespiti için sistem seçerken zorlanıyorum.	19	12.4
	Kritik kontrol noktalarına karar verme esnasında zorlanıyorum	29	19
	Zorlanmıyorum	53	34.6
	Toplam	153	100
Tehlike ve risk analizleri basamağı	Evet	58	37.9
	Hayır	95	62.1
	Toplam	153	100
Kritik kontrol noktalarının belirlenmesi basamağı	Evet	63	41.2
	Hayır	90	58.8
	Toplam	153	100
Kritik limitlerin belirlenmesi basamağı	Evet	42	27.5
	Hayır	111	72.5
	Toplam	153	100
İzleme aşaması	Evet	14	9.2
	Hayır	139	90.8
	Toplam	153	100
Düzeltici faaliyetlerin belirlenmesi basamağı	Evet	10	6.5
	Hayır	143	93.5
	Toplam	153	100
Doğrulama basamağı	Evet	11	7.2
	Hayır	142	92.8
	Toplam	153	100
Kayıt ve dökümantasyon basamağı	Evet	111	72.5
	Hayır	42	27.5
	Toplam	153	100

HACCP sisteminin uygulanması esnasında hangi basamakta zorlandığı

Tablo 3. Otel işletmelerinin sahip oldukları gıda güvenliği yönetim sistemleri belgeleri ve yenilenme sıklığı dağılımları

		Adet	Yüzde %
ISO 9001	Evet	143	93.5
	Hayır	10	6.5
	Toplam	153	100
OHSAS 18001	Evet	136	88.9
	Hayır	17	11.1
	Toplam	153	100
ISO 14001	Evet	137	89.5
	Hayır	16	10.5
	Toplam	153	100
ISO 22000	Evet	153	100
	Hayır	0	0
	Toplam	153	100
ISO 1002	Evet	135	88.2
	Hayır	18	11.8
	Toplam	153	100
Gıda Güvenliği Sistemleri Yenilenme Sıklığı	Her Ay	48	31.4
	Üç Ayda Bir	4	2.6
	Altı Ayda Bir	16	10.5
	Her Yıl	75	49
	Yenilenmiyor	10	6.5
Toplam	153	100	

Antalya ilinde bulunan 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinin %94.1'i covid-19 salgını nedeniyle TSE'den (Türk Standardları Enstitüsü) güvenli turizm sertifikası almışlardır (Tablo 4). Covid-19 salgını için %84.3'ünde pandemi ekibi oluşturulmuştur. "Otelin pandemi ekibi var mı?" ve "pandemi ekibinde kimler bulunuyor?" sorularının dağılımları Tablo 4'te gösterilmektedir. Oluşturulan pandemi ekiplerinin %96.7'sinde gıda mühendisi, %88.9'unda ekip lideri, %76.5'inde kalite müdürü bulunmaktadır.

3.2 Personelden elde edilen bulgular

Antalya ilinde faaliyet gösteren 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinde çalışan personelin cinsiyet, yaş aralığı, eğitim durumu, çalıştığı departman ve hizmet süreleri Tablo 5'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde çalışan personelin %51.9'unun kadın, %48.1'inin erkek olduğu, yaş aralıkları incelendiğinde ise çoğunluğun 20-25 yaş arasında olduğu (%32.7), eğitim durumları incelendiğinde lise ve dengi okul mezunlarının (%36.5) diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Hizmet sürelerinin %38.5 0-5 yıl, çalıştığı departman görevinin ise %36.5 baş aşçı yardımcısı olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. Covid-19 salgını ile ilgili yöneltilen soruların dağılımları

		Adet	Yüzde %
TSE'den güvenli turizm sertifikası	Evet	144	94.1
	Hayır	9	5.9
	Toplam	153	100
Tüm turizm tesisini kapsayan prosedür	Evet	139	90.8
	Hayır	14	9.2
	Toplam	153	100
Tesis içerisinde pandemi ekibi oluşturulması	Evet	129	84.3
	Hayır	24	15.7
	Toplam	153	100
Eylem planı hazırlanarak tüm personelin pandemi eğitiminden geçirilmesi	Evet	123	80.4
	Hayır	30	19.6
	Toplam	153	100
İşletmede ortam sterilizasyonunun yapılması	Evet	118	77.1
	Hayır	35	22.9
	Toplam	153	100
Pandemi ekibi var mı?	Evet	141	92.2
	Hayır	12	7.8
	Toplam	153	100
Ekip Lideri	Evet	136	88.9
	Hayır	17	11.1
	Toplam	153	100
Gıda mühendisi	Evet	148	96.7
	Hayır	5	3.3
	Toplam	153	100
Kalite Müdürü	Evet	117	76.5
	Hayır	36	23.5
	Toplam	153	100
İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı	Evet	97	63.4
	Hayır	56	36.6
	Toplam	153	100
İş Yeri Hekim	Evet	81	52.9
	Hayır	72	47.1
	Toplam	153	100
İşletme Müdür	Evet	104	68
	Hayır	49	32
	Toplam	153	100
Misafir İlişkileri Müdürü	Evet	81	52.9
	Hayır	72	47.1
	Toplam	153	100
Ön Büro Müdürü	Evet	83	54.2
	Hayır	70	45.8
	Toplam	153	100

Genel olarak değerlendirildiğinde, genç personelin otel içi hizmet bölümünde, yaşı daha büyük olan tecrübeli personelin ise daha ziyade baş aşçı veya aşçı yardımcısı olduğu gözlenmiştir. Diğer çalışmalar incelendiğinde benzer

şekilde genç personelin daha fazla olduğu gözlenmektedir. Örneğin, Sargın [7] tarafından Ankara'daki dört ve beş yıldızlı otellerde çalışan yiyecek ve içecek personelinin hijyen bilgileri ve uygulamalarının incelendiği bir çalışmada personelin yaş aralıkları; 18-24 yaş arası %12.8, 25-31 yaş arası %25.5, 32-38 yaş arası %35.3, 39-45 yaş arası %24.5, 46 yaş üstü %1.9 olarak tespit edilmiştir. Personelin eğitim durumları okur-yazar %3.9, ilkokul mezunu %14.7, ortaokul mezunu %27.5, lise ve dengi okul mezunu %38.2 yükseköğrenim mezunu %15.7 olarak belirlenmiştir. Alanya bölgesinde yer alan 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinde HACCP gıda güvenlik sistemi uygulamalarının önündeki engellerin belirlenmesi üzerine yapılan bir uygulamada, mutfak personelinin %51.4' ünün ilköğretim mezunu, %42.1'inin lise mezunu, %6.5' inin ise üniversite mezunu olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada yüksekokul ve fakülte mezunu olan personel yüzdesinin, Eren [17]'in çalışmasından daha yüksek olduğu görülmektedir. Personelin çalışma departmanına bakıldığında baş aşçı yardımcısının sayısı, baş aşçı sayısının yaklaşık 2 katı olduğu görülmektedir. Diğer departmanlara bakıldığında, çeşitli alanlarda çalışan şeflerden oluştuğu görülmektedir.

Çiftçi [13] tarafından yapılan bir çalışmada, 592 mutfak personelinin dağılımı şöyle bulunmuştur: %5.1'i baş aşçı, %5.1'i baş aşçı yardımcısı, %7.3'ü şef sosiyer, %5.7'si balık şefi, %7.1 ızgara şefi, %7.4'ü sebze şefi, %6.3'ü çorba şefi, %12'si soğuk şefi, %9.1'i ve %35'i çoğunlukla otel işletmelerinde bulunan farklı kısım şefi, aşçı yardımcısı, stajyer, mutfak komisi vb.dir. Bu çalışmada baş aşçı ve aşçı yardımcılarını yüzdeleri Çiftçi [15]'nin çalışmasındaki yüzdelere göre daha yüksek bulunmuştur.

Personel hizmet süresi incelendiğinde 5 yıla kadar çalışanların oranı, 10 yıla kadar olanlardan yaklaşık 2 kat fazla olduğu görülmektedir. Hizmet süresi 21 yıl ve üzeri olan personelin 41 yaşından fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada, otel işletmelerinde çalışan personelin hizmet sürelerinin %8.8' inin 0-1 yıl arası, %16.7' sinin 1-5 yıl arası, %15.7' sinin 5.1-10 yıl arası, %58.8'inin 10,1 yıl üzeri olduğu saptanmıştır [7]. Diğer araştırma bulgularına baktığımızda otel işletmelerinde hizmet süresi 10 yıl üzerinde olanların oranı çalışmamızdan oldukça yüksektir. Bunun sebebi Antalya ilinde daha fazla personel sirkülasyonunun görülmesinden ve genç personel tercih edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

6331 sayılı iş sağlığı ve güvenliği kanununun 15. maddesi gereği, başta işverenin sorumluluğunda olmak üzere personelin sağlık raporu ile işe girmeleri zorunludur [18]. Araştırmada, mutfak personelinin hepsi (%100) işe alınırken sağlık kontrollerinden geçtiklerini bildirilmiştir. Bu sağlık kontrolleri incelendiğinde %86.6' i iç hastalıkları (akciğer filmi, sindirim sistemi, dolaşım sistemi, idrar-gaita kontrolleri) olduğu görülmektedir. Bu sağlık kontrollerinin sıklık derecesi incelendiğinde (Tablo 6), %57.7' si yılda bir defa, %38.5' inin altı ayda bir yapıldığı görülmektedir.

Gıda üretim veya servis alanlarında çalışan personelin, bulaşıcı hastalık taşımadığını özellikle Salmonella, Shigella, Streptococcus ve Staphylococcus gibi hastalık etmeni mikroorganizma taşıyıp taşımadıkları düzenli bir şekilde kontrol edilmelidir [19].

Tablo 5. Otel işletmelerinde çalışan personelin cinsiyet, yaş aralığı, eğitim durumu, çalıştığı departman ve hizmet süreleri dağılımları

		Adet	Yüzde%
Cinsiyet	Kadın	27	51.9
	Erkek	25	48.1
	Toplam	52	100
Yaş Aralığı	20-25	17	32.7
	26-30	9	17.3
	31-35	7	13.5
	36-40	9	17.3
	+>41	10	19.2
	Toplam	52	100
Eğitim Durumu	İlkokul	4	7.7
	Ortaokul	4	7.7
	Lise	19	36.5
	Yüksekokul	14	26.9
	Fakülte	11	21.2
Çalıştığı Departman	Toplam	52	100
	Başaşçı	10	19.2
	Baş Aşçı Yardımcısı	19	36.5
	Şef Sosiyer	3	5.8
	Kasap Şefi	3	5.8
	Sıcak Şefi	4	7.7
	Soğuk Şefi	7	13.5
	Kahvaltı Şefi	4	7.7
	Pasta Şefi	2	3.8
	Toplam	52	100
Hizmet Süresi	0-5 yıl	20	38.5
	6-10 yıl	11	21.1
	11-15 yıl	7	13.5
	16-20 yıl	4	7.7
	21 yıl ve üzeri	10	19.2
Toplam	52	100	

Çiftçi [15], yönetici pozisyonundaki mutfak personelinin sağlık kontrollerini incelediği çalışmasında mutfak personelinin %80.7 'sinin akciğer filmi, %29.7' sinin sindirim sistemi, %18.1' inin dolaşım sistemi, %78' inin idrar-gaita testi, %7.3'ünün görme testi, %3.1'inin işitme testi, %5'inin ise psikolojik kontrolden geçtiği tespit edilmiştir. Aynı çalışmada sağlık kontrolünden geçme sıklığı da incelenmiştir. Personelin %10.4' ünün ayda bir defa, %25.5' inin 3 ayda bir defa, %43.3' ünün 6 ayda bir defa, %20.8' inin yılda bir defa sağlık kontrolünden geçtiği saptanmıştır. Çiftçi [15] tarafından bildirilen veriler ile bizim sonuçlarımız birbirine benzerlik göstermektedir.

Tablo 6. Personelin sağlık kontrolünden geçme durumu, hangi sağlık kontrolünden ne sıklıkta geçtiğinin dağılımı

		Adet	Yüzde %
Herhangi bir sağlık kontrolünden geçtiniz mi?	Evet	52	100
	Hayır	0	0
	Toplam	52	100
Hangi sağlık kontrolünden geçtiniz?	Ağız-Dış	2	3.8
	Görme	3	5.8
	Duyuma	2	3.8
	Dahiliye	45	86.6
	Toplam	52	100
Hangi sıklıkta sağlık kontrolünden geçiyorsunuz?	Ayda Bir	1	1.9
	Üç Ayda Bir	1	1.9
	Altı Ayda Bir	20	38.5
	Yılda Bir	30	57.7
	Toplam	52	100.0

Antalya ilinde yapılan 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinde gıda güvenliği sistemlerinin yenilenme sıklığını her ay olarak belirtenlerin oranı %31.4, her yıl olarak belirtenlerin oranı %49 olmuştur. Konya’da faaliyet gösteren gıda işletmelerinin HACCP bilgi ve uygulama düzeylerinin belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, işletmelerin %20’sinin her ay, %30’unun üç ayda bir, %50’ sinin ise her yıl gıda güvenliği sistemlerini güncellediği belirtilmiştir [19].

Personelin HACCP, hijyen, gıda güvenliği hakkındaki bilgileri ve hizmetiçi alma durumlarının dağılımları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Personelin hizmet içi eğitim alma yüzdesi %96.2 olarak tespit edilmiştir. Kabacık [10]’ ın çalışmasına göre personelin %88.3’ ü hizmet içi eğitim aldığı görülmektedir. Personele “Gıda güvenliğinin gıdanın sağlıklı olarak tüketilmesi yani gıdanın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik açıdan temiz olmasının temin edilmesidir” şeklinde tanımlama yapılmıştır. Bu tanıma göre personelin HACCP kavramını bildiği ve tamamının gıda güvenliği hakkında yeterli bilgiye sahip olduğu belirlenmiştir (Tablo 7). Süt işletmelerinde HACCP ve Kalite Yönetim Sistemi uygulaması üzerine yapılan bir çalışmada personele “güvenli gıda deyince ne anlıyorsunuz?” sorusu yöneltilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre personel %40 sağlıklı ve güvenilir gıda üretimini sağlamak amacıyla gıdaların, üretim, işleme muhafaza ve dağıtımları esnasında gerekli kurallara uyulması ve önlemlerin alınması olarak tanımlarken, %60 gıdalarda meydana gelebilecek fiziksel, kimyasal, biyolojik ve her türlü zararlıların yok edilmesi için alınacak tedbirlerin tümü olarak tanımlamıştır [20, 21].

Ankete katılan personelin %94.2’ si gıda güvenliği ifadesini daha önce duyduklarını ifade etmiştir. Eren [17]’ in çalışmasına katılan personelin %27.9’ u HACCP kelimesini daha önce duymadıklarını söylemişlerdir. Erkan [21]’ ın araştırmasında personelin %99.42’ sinin HACCP kelimesini daha önce duyduğu görülmektedir.

Çalışmamızda personele “Hijyen; gıda kontrolünde gıdaların insan sağlığını tehdit eden mikrobiyolojik

bulaşmanın önlenerek gıda güvenliğinin artırılmasıdır” tanımı yapılmıştır ve personelin tamamı (%100) hijyen terimi hakkında yeterli bilgi sahibi olduklarını söylemişlerdir (Tablo 7).

Tablo 7. Personelin HACCP, hijyen, gıda güvenliği hakkındaki bilgileri ve hizmet içi alma durumlarının dağılımları

		Adet	Yüzde%
Düzenli hizmet içi eğitim veriliyor mu?	Evet	50	96.2
	Hayır	2	3.8
	Toplam	52	100
HACCP’ i Daha Önce Duydunuz mu?	Evet	49	94.2
	Hayır	3	5.8
	Toplam	52	100
Hijyen Nedir?	Evet	52	100
	Hayır	0	0
	Toplam	52	100
Gıda Güvenliği Nedir?	Evet	52	100
	Hayır	0	0
	Toplam	52	100

Otellerin hepsinde pandemi ekip lideri tarafından personele bilgilendirme yapılmıştır. Otel işletmeleri Covid-19 salgını sonrasında bazı önlemler almıştır. Bu önlemler arasında %65.4 oranında HACCP sistemini eksiksiz uygulamak bulunmaktadır (Tablo 8). Bununla birlikte, turizm, yiyecek ve içecek sektörü esas alındığında, pandemi sonrası daha farklı tedbirlerin alması gerektiği düşünülmektedir. Örneğin Bucak ve Yiğit [22] tarafından yapılan bir çalışmada, pandemi sonrası mutfakta yapılması gereken değişiklikler içerisinde mutfak düzeninde değişim, menü planlama ve Covid-19 tedbirlerine yönelik çalışmalar olmak üzere üç kategorinin değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Tablo 8. Covid-19 salgınında alınan önlemler

		Adet	Yüzde%
Pandemi ekibi tarafından bilgilendirme yapıldı mı?	Evet	52	100
	Hayır	0	0
	Toplam	52	100
Covid-19 sonucunda mutfakta alınan önlemler nelerdir?	HACCP sistemi eksiksiz olarak uygulanmıştır.	34	65.4
	Çalışma ortamı temizliği önem kazanmıştır	18	34.6
	Toplam	52	100

Personelin HACCP konusunda bilgi düzeyini inceleyen bir başka çalışmada, “hijyen nedir?” sorusuna personelin, %17.9’ u bir madde ya da cismin her türlü hastalık yapıcı etmeden arındırılması derken, %37.9’ u sağlıklı ortamın korunması ve her türlü hastalık etmeninin ortamdaki uzaklaştırılması demiştir [19]. Kalite yönetim sistemlerinin

uygulandığı işletmelerde, hizmet içi eğitimlerin sürekli sağlandığı veya konu ile ilgili işe girmeden önce belirli bir eğitimden geçen personelin hijyen kuralları ve uygulamaları ile ilgili bilgilerinin olduğu söylenebilir. Ancak belirli dönemlerde bilgilerin yenilenmesi amacıyla eğitimlerin belirli periyotlarda devam ettirilmesi gerekmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada Antalya ilinde bulunan 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinde çalışan yönetici ve personelin gıda güvenliği ve uygulamaları hakkında bilgi düzeylerini öğrenmek amacıyla, her iki gruba ayrı ayrı sorulardan oluşan bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir.

Yöneticilere yöneltilen sorulardan elde edilen bilgilere göre, kişilerin gıda güvenliği ve hijyen sanitasyon hakkındaki gerekli eğitimlere sahip oldukları, bu eğitimleri ve belgeleri özel işletmelerden aldıkları, HACCP sisteminin uygulanması konusunda yeterli bilgiye sahip oldukları, ama kritik kontrol noktalarının belirlenmesi aşamasında zorlandıkları tespit edilmiştir. Özellikle kritik kontrol noktalarının kayıt ve dökümantasyon basamağında yetersiz oldukları gözlenmiştir.

Personel düzeyinde cevaplanan sorular değerlendirildiğinde ise; personelin HACCP, gıda güvenliği ve hijyen kelimeleri hakkında bilgi sahibi oldukları, işe alınmadan önce ve işe alındıktan sonra belirli aralıklarla sağlık kontrollerinden geçirildikleri görülmektedir. Kilit noktada çalışan personelin belirli aralıklarla hijyen konusunda hizmet içi eğitimleri yeniden aldıkları belirlenmiştir.

Covid-19 salgını konusunda otel işletmelerinin kendilerine özgü önlemler aldıkları görülmektedir. Bu önlemler; TSE'den güvenli turizm sertifikası almak, pandemi ekibinin oluşturulması, tüm turizm tesisini kapsayan prosedürü oluşturmak ve personelin salgınla mücadele ve alınması gereken önlemlerle ilgili bilgilendirildikleri saptanmıştır. Ayrıca personel mutfaklarında HACCP sistemini eksiksiz bir şekilde uygulamaya çalışıldığı, ortam hijyeninin önem kazandığı görülmüştür.

Otel işletmelerinde çalışan yöneticilerin ve personelin gerekli hizmet içi eğitimi aldıkları ve gıda güvenliği, hijyen konusunda yeterli bilgiye sahip oldukları söylenebilir. Bununla birlikte personelin mutfakta gıda güvenliğini sağlama adına daha fazla eğitime ihtiyaç duyulmaktadır.

Ülkenin gıda güvenliği ile ilgili koymuş olduğu kuralları ve yaptırımları gıda güvenliğini tüketici sağlığını ve bağlantılı olarak üreticiyi ve ilgililerini koruyucu niteliktedir. Gıda güvenliği ile ilgili olarak bu konuda sürdürülebilirliği de sağlama sorumluluğuna sahiptir. Bu anlamda kurulu olan bu sistemin parçalarından birini de otel işletmeleri oluşturmaktadır. Ürünü tedarikten tüketiciye sunum aşamasına kadar hijyen kurallarını ve yasal yaptırımları, kalite güvence sistemlerini uygulamakta konaklama ile ilgili bu sektörün yetkisindedir. Uygulayıcı olarak karşımıza çıkan otel yönetici ve personelinin bu sistemi en iyi şekilde öğrenerek sürekliliği sağlayacak biçimde uygulaması önem kazanmaktadır. Bu anlamda yapılan bu çalışma ile bu konuda geçmiş uygulamalara göre zaman içerisinde önemli

iyileşme sürecinden geçtiği görülmüştür. Ancak gerek bilinç gerekse eğitimler konusunda çalışmaların sürdürülmesi denetimlerle daha iyiye gitmenin hedeflenmesi de bir gereklilik olarak tespit edilmiştir

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] A. Aktaş ve B. Özdemir, Otel İşletmelerinde Mutfak Yönetimi. Detay Yayıncılık, 276 s, Ankara, 2012.
- [2] N. Koçak, Yiyecek İçecek İşletmelerinde Gıda ve Personel Hijyeni. Detay Yayıncılık, 142s, Ankara, 2007.
- [3] S. S. Kırdar ve Ö. Kurşun, ISO 22000 gıda güvenliği yönetim sistemi. Türkiye 10. Gıda Kongresi, sayfa 125-128, Erzurum, 21- 23 Mayıs 2008.
- [4] M. Tayar. Gıda Güvenliği. T.C. Marmara Belediyeler Birliği Yayını, 360s, İstanbul, 2010.
- [5] F. Turantaş ve A. Ünlütürk, (Ed.) Tehlike Analizi ve Kritik Kontrol Noktaları (475-509). Mengi Tan Basımevi, 601s, İzmir, 2003.
- [6] F. Başer, A. Abubakirova, N. Şanlıer ve B. Çil, 4-5 yıldızlı otellerdeki servis ve mutfak personelinin gıda güvenliğine ilişkin bilgi, tutum ve davranışları: Türkiye ve Kazakistan karşılaştırması. Seyahat ve Otel İşletmeciliği Dergisi, 13(3), 23-37, 2016. <https://dergipark.org.tr/pub/soid/issue/26657/285469>
- [7] Y. Sargın, Ankara'daki dört ve beş yıldızlı otellerde çalışan yiyecek ve içecek personelinin hijyen bilgileri ve uygulamalarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 101s, Ankara, 2005.
- [8] N. Şanlıer ve A.T Hussein, Yiyecek içecek hizmeti veren otel mutfakları ve personelinin hijyen yönünden değerlendirilmesi: Ankara ili örneği. Kastamonu Eğitim Dergisi, 16(2), 461-468, 2008. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/819032>
- [9] S. Gün, Yiyecek-içecek hizmeti veren otel mutfaklarının gıda güvenliği ve hijyen yönünden incelenmesi: Tokat'taki 3 ve 4 yıldızlı otel işletmelerinin mutfak departmanlarına yönelik bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 2019.
- [10] M. Kabacık, Dört ve beş yıldızlı otel mutfaklarında çalışan personelin gıda güvenliği konusundaki bilgilerinin saptanması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [11] F. Bayram, Otel mutfaklarında çalışan mutfak personelinin gıda güvenliği konusundaki bilgi tutum ve davranışları. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [12] S. Aras, Otel işletmelerinde yönetim kontrol sisteminin işletme performansına etkisi: Türkiye'de faaliyet gösteren 5 yıldızlı otel işletmelerinde bir uygulama, Doktora Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Sosyal

- Bilimler Enstitüsü, Turizm İşletmeciliği Anabilim Dalı, Konya, 2019.
- [13] K. Başkan, Toplam kalite yönetimi ilkeleri ile konaklama işletmeleri performansı arasındaki ilişkilerin incelenmesi İstanbul ili 5 yıldızlı oteller örneği. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Balıkesir, 2012.
- [14] A. Şan, Yiyecek ve içecek işletmelerinde tehlike analizleri ve kritik kontrol noktaları sistemi: İstanbul-tarihi yarımada sistemine ilişkin analiz çalışması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2005.
- [15] B. Çiftçi, 5 Yıldızlı otellerde aşçılık eğitimi alan ve almayan yönetici pozisyonundaki mutfak personelinin gıda güvenliği konusundaki bilgi ve uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [16] V. S. Taylan, Turizm işletmelerinde gıda güvenliği ve HACCP: Kavramlar ve bir uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Antalya, Türkiye, 2004.
- [17] R. Eren, HACCP Gıda güvenlik sistemi uygulamalarının önündeki engellerin belirlenmesi ve çözüm önerileri: Alanya bölgesi 4 ve 5 yıldızlı otel işletmelerinde bir uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [18] Anonim, İş sağlığı ve güvenliği kanunu, Kanun No: 6331, Kabul tarihi: 20.06.2012, Sayı: 28339, Ankara, 2012
- [19] B. Dağnilak, Konya’da faaliyet gösteren gıda işletmelerinin HACCP bilgi ve uygulama düzeylerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
- [20] M. Pal, W. Gebregabiher and R. K. Singh, The role of hazard analysis critical control point in food safety, Beverage and Food World, 43 (4), 33-36, 2016.
- [21] F. Erkan, Ankara’da Faaliyet Gösteren Süt İşletmelerinin Sahip Oldukları HACCP ve Kalite Güvence Sistemleri, Yönetici ve Çalışanlarının Bilgi ve Uygulama Düzeylerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 110s, Isparta, 2018.
- [22] T. Bucak, ve S. Yiğit, The future of the chef occupation and the food and beverage sector after the COVID-19 outbreak: Opinions of Turkish chefs. International Journal of Hospitality Management, 92, 102682, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2020.102682>





CBS tabanlı nominal değerlendirme yönteminin değer haritalarının oluşturulmasında kullanımı: Foça/İzmir örneği

Usage of GIS-based nominal valuation method in creating value maps: The case of Foça/İzmir

Mert Kayalık^{1,*} , Zeynel Abidin Polat² 

^{1,2} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 35620, İzmir, Türkiye

Öz

TÜİK verilerine göre İzmir’de 2021 yılında yapılan konut satışı 86722’dir. Bu sayı Türkiye’deki tüm konut satışlarının %5.8’ine karşılık gelmektedir. İzmir bu oran ile Türkiye’nin en çok konut satışı yapılan üçüncü ili olmuştur. Bütün bu istatistikler dikkate alındığında, İzmir’de taşınmazların değerinin tekil değerlendirme yöntemleri ile belirlenmesi oldukça zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu çalışmanın amacı, bahsedilen emek ve zaman kaybına bir çözüm olarak önerdiğimiz toplu taşınmaz değerlendirme yöntemini İzmir’in Yenifoça mahallesinde uygulamaktır. Çalışmada, değerlemeye hız kazandıran stokastik yöntemlerden nominal değerlendirme yöntemi kullanılmıştır. Uygulamanın sonunda oluşan bina geometrilerine ait nominal değer haritası, bir model yardımı ile TL biriminde fiyatlara çevrilmiştir. Modelde, taşınmazların toplam piksel değerleri ve web tabanlı gayrimenkul sitesindeki satış fiyatları kullanılmıştır. Sitede satışta olan taşınmazlar, eğitim ve test verisi olarak iki gruba ayrılmıştır. 11 adet test verisinin model fiyatları, internet sitesindeki fiyatlarla 0.67 korelasyonlu olduğu belirlenmiştir. Bahsedilen model, kısıtlı veri seti ile test edilmesine rağmen kabul edilebilir doğrulukta bir katsayı ile çalışmıştır. Elde edilen sonuçlar ile nominal değerlendirme yönteminin uygulanabilirliği ortaya konmuş olup, gelecekte yapılacak toplu taşınmaz değerlendirme çalışmaları için önemli bir akademik kaynak literatüre kazandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Taşınmaz değerlendirme, CBS, Toplu, Stokastik, Nominal

1 Giriş

4721 sayılı Türk Medeni Kanununun 704 üncü maddesi kapsamında taşınmaz (gayrimenkul); arazi, tapu kütüğünde ayrı sayfaya kaydedilen bağımsız ve sürekli haklar (inşa/üst hakkı, kaynak hakkı, geçit hakkı) ile kat mülkiyeti kütüğüne kayıtlı bağımsız bölümler olarak tanımlanmaktadır [1, 2]. Ekonomik değeri ile geleceğe yönelik bir tür finansal güvence sağlayan taşınmaz, aynı zamanda vatandaşın mülkiyet hakkını kullandığı bir ortamdır [3]. Bu bağlamda düşünüldüğünde taşınmaz değerlendirme birçok kriterin bir arada düşünülmesini gerektiren teknik bir konudur. Gerek kamuda (toplulaştırma, hazineye ait malların satışı, değişimi (trampa), kiralınması, imar uygulamaları), gerek özel

Abstract

According to TUIK data, the number of residential sales in İzmir in 2021 is 86722. This count corresponds to 5.8% of all residential sales in Turkey. With this ratio, İzmir became the third province in Turkey with the highest sales of residential. When all these statistics are taken into account, it is quite laborious and time-consuming to determine the value of real estates in İzmir using singular valuation methods. The aim of this study is to apply the mass real estate valuation method, which we suggest as a solution to the loss of labor and time, in the Yenifoça neighborhood of İzmir. In the study, nominal valuation method, which is one of the stochastic methods that accelerates the valuation, was used. The nominal value map of the building geometries created at the end of the application was converted into prices in Turkish Lira (TL) with the help of a model. In the model, the total pixel values and the sales prices on the web-based site of the real estates were used. The real estates for sale on the site were divided into two groups as training and test data. It has been determined that the model prices of 11 test data have a 0.67 correlation with the prices on the website. The mentioned model ran with an acceptable accuracy coefficient, although it was tested with a limited data set. As a result, the applicability of the nominal valuation method has been revealed and an important academic resource has been brought to the literature for future mass real estate valuation studies.

Keywords: Real estate valuation, GIS, Mass, Stochastic, Nominal

sektörde (sermaye piyasası, kredilendirme, kentsel dönüşüm faaliyetleri) değerlemeye ihtiyaç duyulmaktadır [4, 5]. Tüm bu bahsedilen kamu ve özel sektör uygulamalarına ek olarak alım-satım uygulamalarında da ana odak taşınmaz değeridir. Satışlarda kullanılan taşınmaz değerleri piyasadaki nitelikli yapı talebinden kaynaklı sürekli değişiklik göstermektedir [6]. Bu açıdan taşınmaz değerlerinin belli periyotlarda güncellenmesi daha sağlıklı piyasa koşullarını oluşturacaktır. Ayrıca Türkiye’de yapılan taşınmaz değerlendirme çalışmalarında tarımsal amaçlı kullanıma sahip arazi değerlemelerinin yerine arsa, konut ve işyeri niteliğindeki taşınmazların değerlendirilmesine ağırlık verildiği görülmektedir [3, 7]. Geçmişten günümüze

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mert.kayalik@ikcu.edu.tr (M. Kayalık)

Geliş / Received: 19.09.2022 Kabul / Accepted: 14.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1177138

taşınmaz değerlemesi ve bu değerden edinilen vergi gelirleri gelişmiş toplumların en önemli ekonomik gelirlerini oluşturmaktadır [8]. Tüm dünyadaki çalışmalara rağmen ülkemizde ancak 1990'lı yılların sonlarında taşınmaz değerlemesinin önemi fark edilmiştir [9]. Merkezi ve yerel yönetimlerin ana gelir kaynağını oluşturan taşınmaz bazlı vergi değerlerinin güncel piyasa değerinin çok altında belirlendiği için toplanan vergilerde önemli kayıplar yaşanmaktadır. Piyasa değeri ile vergi değeri arasındaki farklılık, taşınmazların toplu değerlemesi ile giderilebilir. ABD Değerleme Vakfı (US Appraisal Foundation) toplu değerlemeyi "verilen bir tarihte, standart yöntemler ve genel veriler kullanarak ve istatistiki testler yardımıyla bir grup taşınmazın değerlendirilmesi süreci" şeklinde tanımlamıştır [10]. Bahsedilen toplu değerlendirme ile geniş alanı kapsayan çok sayıda taşınmaz tekil değerlendirme yöntemlerine göre daha kısa sürede ve daha az maliyet ile kıymetlendirilebilir. Ayrıca taşınmazların toplu değerlemesi, piyasa dinamiklerinin anlaşılması için oldukça önemlidir [11].

Son yıllarda ülkemizde taşınmaz değerlemesine ilişkin birçok akademik çalışma yapılmıştır. Erdem, yaptığı lisansüstü tezlerin içerik analizi çalışmasında taşınmaz değerlemenin çok farklı disiplinleri aynı paydada toplayan bir çalışma konusu olduğunu aktarmıştır [2]. Bu açıdan taşınmaz değerlendirme birçok meslek grubunun (ör. Harita mühendisi, Şehir plancısı, Finansçı) ortaklaşa çalışmasını gerektiren çok disiplinli bir konudur [12]. Literatürde taşınmaz değerlendirme ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, hem modern hem de stokastik (istatistiki) yöntemlerin sıklıkla kullanıldığı birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır. İlhan ve Öz, bahsedilen modern yöntemlere Gözbaşı ilçesi için yaptıkları çalışmada Yapay Sinir Ağları (YSA) ve Çoklu Regresyon Analizini (ÇRA) kullanarak taşınmaz değerlemesinde elde ettiği tahmin sonuçlarını karşılaştırmıştır [13]. Bu karşılaştırma sonucunda, YSA modelinin ÇRA'ya göre taşınmaz değerleri için daha iyi tahminde bulunduğu gözlemlenmiştir. Bir diğer önemli çalışma ise Ulvi ve Özkan tarafından yapılmıştır [14]. Çalışmada, taşınmaz değerlerinin tespiti için YSA ve Bulanık Mantık (BM) yöntemleri kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerin incelenmesi sonucunda YSA'nın daha az işlem adımına sahip olduğu belirtilmiştir. BM ise YSA'ya kıyasla uzman kullanıcılara ihtiyaç duymaktadır. Çalışmanın sonunda YSA modeli ile hesaplanan değer, piyasa değerine daha yaklaşıktır için, uygun yöntem olarak seçilmiştir. Bahsedilen çalışmaların dışında Stokastik yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma da bulunmaktadır. Bu bağlamda, Yağmahan ve Gülgen çalışmalarında Mardin ili Midyat ilçesi Bahçelievler mahallesinde bulunan 324 yapısız parselin taşınmaz değer haritasını üretmişlerdir [15]. Bahsedilen taşınmaz değer haritası literatürdeki diğer çalışmalara paralel olarak farklı faktörlerin anketle belirlenen ağırlıklarda puanlaması ile elde edilmiştir. Bir diğer önemli çalışma ise Doldur ve Alkan tarafından yapılmıştır [16]. Çalışma Nevşehir ili Avanos ilçesi özelinde iki farklı değer modelinin kıyaslanması sürecini ele almaktadır. Farklı faktör puanları ve ağırlıklandırma yöntemlerinin kullanıldığı modeller oluşturulduktan sonra her bir parselin TL biriminde değeri

belirlenmiştir. Bulunan taşınmaz değerlerinin rayiç bedellerle karşılaştırılması sonucunda, çalışma alanına sadık kalınarak yapılan öznel puanlamadan edinilen ikinci modelin daha yüksek uyumluluk oranına sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Bu sonuç ile birlikte literatürde paylaşılan puan ve ağırlıkları doğrudan kullanmak yerine her çalışmada o bölgeye özgü bir puanlamanın ve ağırlıklamanın yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Mete ve Yomralıoğlu ise web ortamında açık kaynak erişimi olan bulut CBS tabanlı bir toplu taşınmaz değerlendirme uygulaması yapmıştır [17]. Bahsedilen uygulama ile verilerin depolanması, analizi ve paylaşımının daha etkin ve hızlı hale geldiği ifade edilmiştir. 25 farklı kriterin kullanıldığı İstanbul ilinin tamamı için yapılan çalışmanın sonunda 10 m çözünürlüklü değer haritası oluşturulmuştur. Farklı istatistiksel testlerle tutarlı olduğu ifade edilen değer haritası, çevresi ile karşılıklı sorgulanabilecek arsa değerlerini anlaşılır bir ara yüz ile kullanıcıya sunmaktadır. Bu sayede görselleştirilen gerçek zamanlı verilerin düşük maliyetlerle çoklu kullanıcıların erişimine açıldığı aktarılmaktadır. Tüm bu bahsedilen masaüstü CBS uygulamalarına ek olarak Döner ve Alkan mobil CBS destekli bir taşınmaz değerlendirme çalışması yapmıştır [18]. İstanbul ili, Kağıthane ilçesi, Emniyet Evler mahallesinde yapılan uygulamada mobil cihazlar ile sahadan toplanan taşınmaz verileri büroda taşınmaz değer haritası haline getirilmiştir. Üretilen değer haritası yine herhangi bir CBS yazılımına gerek duymaksızın web-tabanlı uygulama ile internet üzerinden kullanıcılara sunulmaktadır. Yomralıoğlu vd. söz konusu yöntemi kentsel alanlardaki imar uygulamalarından biri olan 18. madde uygulamasına uyarlamıştır [19]. Çalışmada parsellerin uygulama sonrası yeniden dağıtımlarında birim alan yerine birim parsel değerine göre dağıtımın yapılabileceği önerisinde bulunulmuştur. Yapılan çalışma, Grover ve Walacic'in yerel yönetimlerde daha fazla vergi geliri elde etmek amacıyla taşınmazların alanları doğrultusunda emlak vergisi toplamak yerine değere dayalı emlak vergisi toplama önerisi ile örtüşmektedir [20]. Parselasyona ek olarak trampa ve hazine mallarının satışında da stokastik yöntemler kullanılmalıdır [21].

Taşınmaz değerlemesinin yukarıda bahsedilen avantajlarından faydalanmak için öncelikle dağıtım ve muğlak yapıdaki mevzuat karmaşasına çözüm bulmak gerekmektedir. Bahsedilen muğlaklığa bir örnek olarak; mevzuatta taşınmazın bedel tespitine istinaden dikkate alınacak objektif ölçütlerden bahsedilmesi, ancak söz konusu objektif ölçütlerin ne olduğu ya da ilgili objektif ölçütlerin nasıl ve ne oranda dikkate alınacağı ile ilgili herhangi bir açıklamanın bulunmaması verilebilir. Uygulamada karşılaşılan eksikliklere ise kurumların bünyesindeki kıymet takdir komisyonlarının değerleri ile mahkemelerin atadığı bilirkişilerin değerleri arasındaki farklılık örnek olarak verilebilir. Sosyoekonomik problemleri beraberinde getiren farklılık, kurumlardaki konunun uzmanı olmayan meslek grupları ve yetersiz bilgiye sahip teknik/ıdari personelce yapılmasından kaynaklanmaktadır [9]. Aynı taşınmaz için farklı kurumlar tarafından hesaplanan taşınmaz değerleri birkaç kata kadar farklılık göstermektedir. Bu subjektifliğin giderilebilmesi için Erdem, taşınmaz değerlendirme alanını

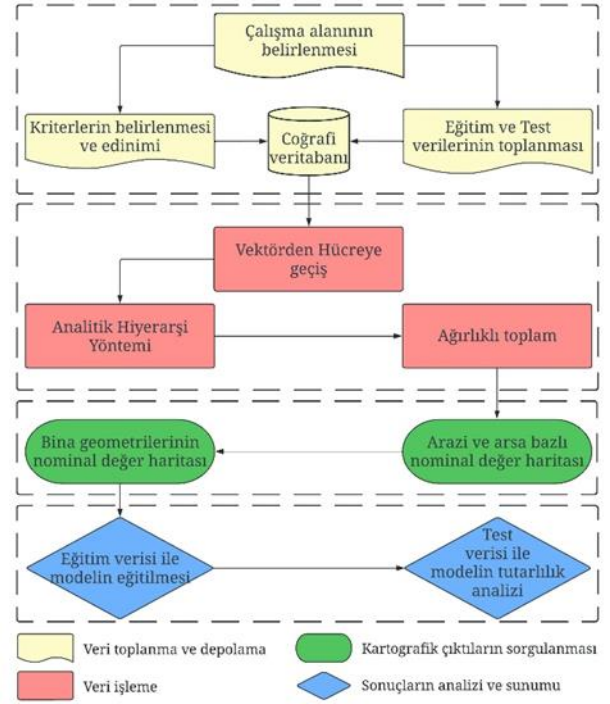
düzenleyecek çerçeve bir yasa tasarısının hazırlanması önermektedir [22]. Önerilen yasanın açık ve net mevzuatlarla denetleyici kurumların gözetiminde (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Coğrafi Bilgi Sistemleri Genel Müdürlüğü, Belediyeler) koordine şekilde uygulanması, taşınmaz değerlendirme alanı için oldukça hayatidir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada Yenifoça mahalle sınırlarında bulunan taşınmazların piksel tabanlı toplu değerlemesi yapılmıştır. Açık kaynak olarak indirilen mekânsal veriler sayesinde bölgenin toplu değerlendirilmesi kısa bir sürede tamamlanmıştır. Her bir faktörün, değer haritası üzerindeki etki oranını belirlemek için Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinin bir bileşeni olan Analitik Hiyerarşi Yöntemi (AHY) kullanılmıştır. Sözel veriler yardımıyla matematiksel modellerin kurulabildiği AHY, taşınmaz değerlemesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir [23]. AHY ağırlıkları literatürde genel kabul görmüş, uzman görüşleri alınarak yapılan ağırlıklara paralel olarak yazarlar tarafından belirlenmiştir. Belirlenen ağırlıklarda 12 adet faktör, CBS ortamında alt alta toplanmış ve nihai değer haritasına ulaşılmıştır. Elde edilen değer haritası, taşınmazın piyasa fiyatını belirlemek için bir araç olarak kullanılmıştır. Çalışmanın devamında nominal değerlerin gerçek taşınmaz fiyatına dönüştürüldüğü bir model önerilmiştir. Web ortamından alınan taşınmaz fiyatlarının bazıları ile model eğitilirken bazıları ile modelin tutarlılığı kontrol edilmiştir. Kontrol sonucunda web tabanlı fiyatlar ile modelden üretilen taşınmaz fiyatlarının %67 oranında tutarlı olduğu görülmüştür.

2.1 Aşamalı şekilde işlem adımları

Çalışmaya ‘Nominal taşınmaz değerleri, gerçek piyasa fiyatlarına dönüştürülebilir mi?’ sorusu ile başlanmıştır. Bahsedilen soruya yanıt bulmak için ilk olarak çalışma alanı belirlenmiştir. Devamında analiz kriterleri belirlenmiş olup, analizi tamamlamak için gerekli olan vektör veya raster formatındaki veriler toplanmıştır. Hem modelin eğitiminde (33 adet) hem de kontrolünde (11 adet) kullanılacak olan toplam 44 adet taşınmaz fiyatı, ‘Sahibinden’ isimli gayrimenkul ilan sitesi aracılığıyla edinilmiştir. Tüm işlemler raster yüzeyler üzerinden yapılacağından vektör formatındaki tüm mekânsal veriler raster verisine dönüştürülmüştür. Ardından her bir faktörün göreceli ağırlığını belirlemek için Excel üzerinden AHY süreci yönetilmiştir. Karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan AHY ile öznellik ortadan kalkmaktadır [24]. Ağırlıkları oranında alt alta toplanan faktörlerden arazi ve arsa bazlı nominal değer haritası elde edilmiştir. Çalışmanın devamında nominal değer haritası, yapılarla göre kesilerek bina geometrilerine ait değer haritası elde edilmiştir. Son aşamada ise daha büyük veri alt kümesine sahip eğitim verisi ile model eğitilmiştir. Eğitilen modelin tutarlılığını test verileri ile kontrol ederek uygulama uygulamalandırılmıştır. Çalışmanın sonunda internet üzerinden toplanan fiyatlarla, modelden üretilen taşınmaz fiyatlarının uyumlu olduğu anlaşılmış olup, modelin başka bölgelerde de kullanılabilir olduğu paylaşılmıştır. Tüm bu anlatılan işlemlerin özetlendiği iş akış diyagramı Şekil 1’de sunulmuştur.



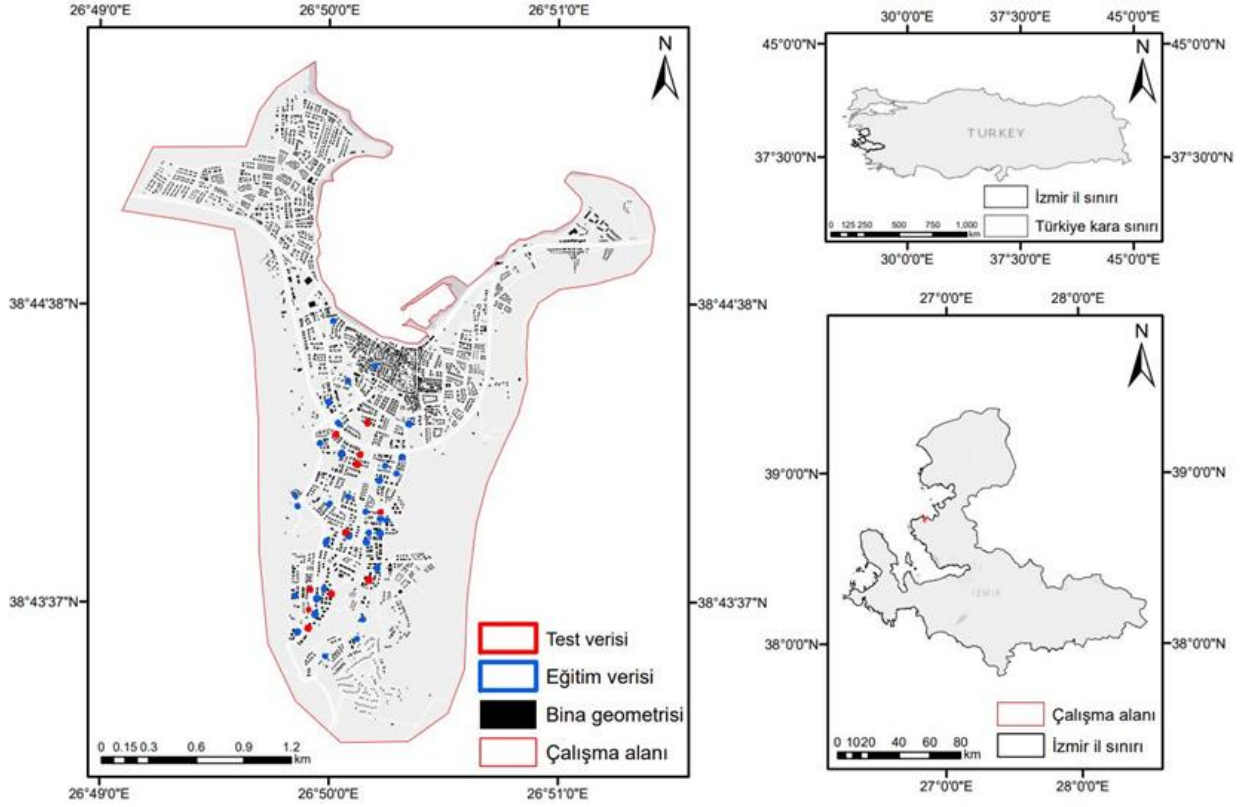
Şekil 1. İş akış diyagramı

2.2 Çalışma alanı

Kuzeyinde Ege denizi, batısında ve güneyinde bağlı olduğu Eskifoça ilçesi, doğusunda Aliğa ilçesi bulunan Yenifoça mahallesi çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çalışma alanı, 540 ha yüzölçümüne, 4.5 km kıyı şeridinde sahiptir. Özellikle yaz aylarında yerli ve yabancı turistlerin ziyaret ettiği Yenifoça, eski dönemlere ait taş evleri ile oldukça önemli tarihi ve kültürel kalıtlara sahiptir. Bölgede yaşayan kişi sayısı bahsedilen turizmde kaynaklı yaz ve kış aylarında farklılık göstermektedir. Kışın 15-20 bin kişinin yaşadığı Yenifoça'nın nüfusu, yazın 50-60 binlere ulaşmaktadır. Yerleşimin deniz kenarına yakın, topografyayla uyumlu olarak hilal şeklinde ilerlediği görülmektedir. İzmir Kent rehberinden alınan yapı niteliğindeki toplam taşınmaz sayısı 6447'dir. Bölgedeki geniş doğal ve kentsel sit alanlarının dışında kalan taşınmazlar oldukça değerlidir. Uygulamada faktör olarak kullanılan 2 okul, 2 sağlık hizmeti, 2 cami, 1 garaj, 11 adet yerel-12 adet zincir olmak üzere toplamda 23 adet market bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen model aracılığıyla fiyatları bulunabilen tüm taşınmazların gösterildiği çalışma alanı Şekil 2'de paylaşılmıştır.

2.3 Taşınmaz değerlendirme yöntemleri

Günümüzde taşınmazın kıymetlendirilmesi aşamasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yüzden değerlemeye ait tek bir yöntem vardır diyemeyiz [4]. Bahsedilen farklı metodlardan dolayı taşınmaz değerlemenin henüz bir model oturtulmadığı söylemi bu alana yönelik en büyük eleştirilerdendir [15]. Bahsedilen eleştirilere rağmen her yaklaşımın kendine ait avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [11]. Ayrıca yöntemlerin doğru uygulanması durumunda birbirine yakın taşınmaz değerlerinin bulunması



Şekil 2. Çalışma alanı

beklenen bir sonuçtur. Söz konusu taşınmaz değerlendirme metodları Şekil 3'te gösterildiği gibi 3 ana, 13 alt başlık ile sınıflandırılmıştır.

Genel olarak taşınmaz değerlendirme yöntemleri üç ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar Geleneksel, Stokastik ve Modern yöntemlerdir. Sahada en çok kullanılan Geleneksel yöntemler, birçok detayın aynı anda düşülmesini gerektirmektedir. Bu sebeple bölgesel değerlemelerde yetersiz kalmaktadır. Özellikle büyük kentlerin taşınmaz değerlemesi hedeflendiğinde zaman alan tekil değerlendirme yöntemlerinin kullanılması çok mantıklı olmayacaktır. Çünkü tekil değerlemelerde yoğun saha çalışması sürecin alışılmış bir parçasıdır. Bahsedilen saha çalışması uygulamayı oldukça yavaşlatmakta, zaman ve maliyet kaybına uğratmaktadır. Tekil taşınmaz değerlendirme yöntemlerinden en yaygın kullanılanı ise emsal (karşılaştırma) yöntemidir [6, 16, 25]. Stokastik ifadesi olasılık ve istatistik kelimelerinden oluşmaktadır. Toplu

taşınmaz değerlendirme uygulamalarında sıklıkla kullanılan stokastik yöntemler, bilgisayar kullanımını gerektiren istatistiksel modellere dayanmaktadır [17]. Bilgisayar altyapısının doğru bir şekilde kullanılması durumunda geniş alanları kapsayan birçok taşınmazın aynı anda değerlendirilmesi mümkün hale gelmektedir. Stokastik yöntemlerin en yaygın kullanılanı ise nominal değerlendirme yöntemidir. Nominal değerlendirme yönteminin çalışma mantığı taşınmazların birbiri arasında değer dağılımlarını belirlemektir. Yani her çalışmanın sonunda değerli, değersiz, ya da ara değerlere sahip taşınmazların bulunması beklenen bir sonuçtur. Diğer bir deyişle nominal değerlendirme kullanılarak taşınmazların kıyaslanabilir puanları belirlenir [26]. Her geçen gün büyük gelişme gösteren Modern yöntemler ise taşınmaz değerlendirme alanındaki son zamanların en popüler yöntemlerini oluşturmaktadır. Tüm bu bilgilerden hareketle bahsedilen uygulama, Stokastik yöntemler ana başlığı altındaki nominal değerlendirme yöntemi(*) ile yürütülmüştür.



Şekil 3. Taşınmaz değerlendirme yöntemlerinin ana ve alt başlıkları

2.4 CBS ve CBS'nin taşınmaz değerlemede kullanımı

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), vektör ve raster formatındaki grafik verilere ek olarak tamamlayıcı boyuttaki öznetelik verilerinin toplanması, depolanması, işlenmesi ve anlamlı bir bilgiye dönüştürülüp sade şekilde kullanıcıya sunulması sürecini yöneten bir bilgi sistemidir [35]. Büyük bir pratiklik sağlayan CBS ile mekânsal veri tipleri bir arada kullanılabilir. Bunun yanında CBS, veriler arası anlamlı ilişkiler kurarak yerinde kararlar vermemizi sağlar. CBS, Kamusal uygulamalardan [27], tarımsal uygulamalara [28], yer seçiminden [29], akıllı şehir/kampüs uygulamalarına [30] kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Tüm bu bahsedilen alanlara ek olarak taşınmaz değerlendirme alanında da kullanılıp fayda sağlanan eşsiz bir teknolojik platformdur [4, 31, 32]. Yağmahan ve Gülgen, taşınmaz değerlemede hızlı ve tutarlı sonuçlara ulaşabilmek ve birçok farklı veri formatını bir arada işleyebilmek için CBS sisteminin kurulumunun ve kullanımının kaçınılmaz olduğu vurgulamaktadır [15].

Tüm bu sebeplerden dolayı çalışmada kullanılan mekânsal faktörlerin analizi ve sunumu sürecinde CBS etkin bir şekilde kullanılmıştır. Mevcut çalışmanın CBS ile entegrasyonu ESRI firmasının ürünü olan ArcGIS yazılımı ile sağlanmıştır.

2.5 Kriterlerin seçimi ve hazırlanması

Değer haritasının oluşturulmasında kullanılacak olan faktörlerin seçimi çalışmanın en önemli aşamalarından biridir. Bu sebeple çalışmada kullanılan 12 kriter, titizlikle seçilmiştir. Bu süreçte işlenecek kriterler herhangi bir altlık haritadan sayısallaştırarak, kurumlarla birebir iletişime geçerek ya da açık kaynak veri portalından indirerek edinilebilir. Bu çalışmada yukarıda bahsedilen üç yöntemle de veri edinilmiştir. Örneğin bina geometrileri, İzmir Büyükşehir Belediyesi Harita ve CBS Daire Başkanlığı'ndan temin edilirken; kıyı kenar çizgisi, halihazır haritadan sayısallaştırılmıştır. Kullanılan diğer faktörler ise NASA SRTM, OpenStreetMap, Google Haritalar gibi açık veri kaynaklarından indirilmiştir. Kullanılan kriterler il/eyalet bazında farklılık gösterse de lokal/yerel bazdaki standardizasyonu oldukça önemli bir araştırma konusudur. Yalpur ve Ünel, İç Anadolu Bölgesinde parsel değerine etki eden ana faktörlerin standartlaştırılmasını amaçlayan bir çalışma yapmıştır [3]. Bahsedilen kriterlerin standartlaştırılması sürecinde çok sayıda gayrimenkul

değerleme uzmanı ve kamu görevlisi ile anket yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonunda en önemli 10 kriter sıralanmıştır. Elde edilen kriterlerin bölge bazlı değil ülke genelinde geçerliliğinin olduğu vurgulanmıştır. Ancak yine aynı çalışmada, bir taşınmaz değerlendirme değeri etkileyen kriterlerin bölgeden bölgeye ve kişiden kişiye değişkenlik gösterdiğinin altı çizilmiştir. Buna ek olarak Torun vd. yaptıkları çalışmada taşınmaz değerlendirme kriterlerin çokluğunun ve bu kriterlerin yöresel, bölgesel ve tercihlere göre değişkenlik göstermesinin dikkat edilmesi gereken bir husus olduğunu vurgulamaktadır [8]. Bu değişkenlik taşınmaz değerlendirme çalışmalarında kesin bir modelin tarifini zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak mevcut çalışmada hem faktörlerin belirlenmesi hem de belirlenen faktörlerin ağırlıklandırılması kısmında yukarıda bahsedilen benzeri çalışmalar referans alınmıştır. Tablo 1'de kullanılan faktörler ve faktörlerin ağırlıkları paylaşılmıştır. Paylaşılan ağırlıkların uyumlu olduğunu gösteren tutarlılık oranı Saaty'nin direktiflerine paralel olarak 0.1'den küçük (0.003) çıkmıştır [33].

Çalışmaya 'Kıyı kenar çizgisine yakınlık' faktörünün dahil edilmesi ile benzeri çalışmalarda bölgenin kendine has coğrafi özelliklerine dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Ayrıca dünyanın neresine gidilirse gidilsin kıyı kenar çizgisine yakın taşınmazlar her zaman daha değerlidir. İmar planlarında kamu kullanımına ayrılmış olan Düzenleme Ortaklık Payından (DOP) oluşturulan Sosyal donatı alanlarına (yol, yeşil alan, okul, karakol, ibadet yeri, sağlık tesisi gibi) yakınlık da, taşınmazın değerini arttıran diğer faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Çevreyolu/Otoyollar taşınmazlar için bir gürültü kaynağı iken, cadde ve sokak niteliğindeki yollara yakınlık taşınmazın değerini arttıran bir faktördür [16]. Gürültü ve ses kirliliği insanların sağlık durumunu olumsuz etkilediğinden taşınmazın değerini düşürür [34]. Ancak çalışma alanında herhangi bir otoyol bulunmadığından 'Anayollara yakınlık' faktörü sadece taşınmazın değerini arttırması boyutuyla ele alınmıştır. Çalışma alanındaki topografik yapının yani eğim verisinin uygulamaya dahil edilmesi ile daha doğru taşınmaz değerlerine yaklaşılmıştır. Eğimli bir parselde inşaat için kullanılacak alan önemli ölçüde azalacağından, 'Eğim' kriteri değere olumsuz bir etmen olarak alınmıştır. Buna ek olarak Eshot, 130 km uzunluğundaki raylı ulaşım hizmeti İzban ile entegre çalışan bir toplu taşıma aracıdır.

Tablo 1. Tercih edilen faktörler

Faktörler	Faktör numarası	Değersiz	Değerli	Ağırlık	Açıklama
Eğitim kurumlarına yakınlık	F1	Min	Maks	0.108	Ortaokul ve Spor lisesi
İbadet merkezlerine yakınlık	F2	Min	Maks	0.030	Camiler
Sağlık hizmetlerine yakınlık	F3	Min	Maks	0.143	Poliklinik/Sağlık ocağı
Marketlere yakınlık	F4	Min	Maks	0.137	Yerel ve Zincir marketler
Mahalle merkezine yakınlık	F5	Min	Maks	0.047	Garaj/Otogar
Yeşil alanlara yakınlık	F6	Min	Maks	0.109	Park ve Rekreasyon alanı
İtfaiye istasyonuna yakınlık	F7	Min	Maks	0.041	-
Jandarma birimine yakınlık	F8	Min	Maks	0.041	-
Anayollara yakınlık	F9	Min	Maks	0.093	Cadde ve Sokak
Eshot duraklarına yakınlık	F10	Min	Maks	0.115	-
Kıyı kenar çizgisine yakınlık	F11	Min	Maks	0.092	Sahil şeridi
Eğim	F12	Maks	Min	0.045	SYM'den Eğim'e

Kişi başına toplu taşıma yolculuk ve kişi başı raylı sistem oranlarının çok yüksek olduğu İzmir’de İzban ve Eshot duraklarına yakın olan taşınmazların değerli olduğu herkes tarafından bilinen bir gerçektir. Bu paralelde ‘Eshot duraklarına yakınlık’ değeri arttıran bir bileşen olarak çalışmaya dahil edilmiştir.

2.6 Model

Taşınmazların nominal değerlerini bulmak her zaman yeterli olmayabilir. Ayrıca nominal değerler kolayca piyasa fiyatına dönüştürülebilir [35]. Bu sebeple çalışmada nominal değeri, kullanılabilir piyasa fiyatına dönüştürmek için bir model önerilmiştir. Modelin kurulmasındaki bir diğer motivasyon ise toplu değerlendirme uygulamasından edinilen nominal değerlerin, çevrimiçi emlak sitesindeki fiyatlarla benzer dağılım göstermesidir. Yani çalışma alanındaki kıyı kenar çizgisinden uzaklaştıkça hem ortalama piksel değerlerinin hem de web tabanlı taşınmaz fiyatlarının azaldığı görülmüştür. İlk olarak, raster tabanlı değer haritasındaki piksel değerleri, bindirme analizi (overlay analysis) ile vektör formatındaki taşınmazlara işlenmiştir. Devamında bina geometrilerine ait ortalama piksel değerlerinin alanlar ile çarpılmasından ortaya çıkan toplam piksel değerleri, ilgili taşınmazların öznelik tablosuna eklenmiştir. Bu işlemin asıl sebebi, bir taşınmazın en önemli özelliklerinden olan alan bilgisinin çalışmaya dahil edilmesi gerektiğindedir. Üretilen nominal değer haritası 1 m çözünürlüklü olduğundan ortalama piksel değeri ile alanın doğrudan çarpılmasında herhangi bir sakınca yoktur. Ardından, gayrimenkul ilan sitesi aracılığı ile 02.06.2022 tarihinde satışta olan tüm taşınmazların fiyatları kaydedilmiştir. Çalışma alanında olup, mevcutta satışta bulunan taşınmaz sayısı 44 tür. Bahsedilen sayının az olduğu düşünülse de, satışta bulunan taşınmazların çalışma alanında homojen dağılımı olması planlanan model için verilerin kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Bahsedilen 44 taşınmazın fiyatları web tabanlı siteden alınıp CBS ara yüzündeki ilgili bina geometrilerine öznelik olarak eklenmiştir. Literatürdeki benzeri model çalışmalarında verinin %70-80’i eğitim verisi olarak kullanılırken, %20-30’u test verisi olarak kullanılmaktadır [36]. Bu bilgiden hareketle mevcut veri 33 (eğitim) ve 11 (test) olarak iki gruba ayrılmıştır. Bahsedilen 33 eğitim verisi seçilirken modeli çevrelemesine ve homojen dağılmasına özen gösterilmiştir. Modelin amacı eğitim verisini kullanarak test verisini kontrol edebileceğimiz bir katsayı elde etmektir. Bunun için taşınmaz fiyatlarını, bina geometrilerine ait toplam piksel değerlerine bölerek bir nominal katsayı elde edilmiştir. Tüm eğitim verilerinden gelen nominal katsayıların ortalaması ile çalışma alanına ait ortalama nominal katsayı elde edilmiştir.

Konuyla ilgili örnek bir hesaplama,

1. adım(Eğitim):

- Bir taşınmazın gayrimenkul ilan sitesindeki fiyatı: 990000 TL
- Aynı taşınmazın Toplam Piksel Değeri (TPD): 58.762 (ortalama piksel değeri(0.71661) * alan(82 m²))

- Bahsedilen taşınmazın nominal katsayısı: $990000 / 58.762 = 16847.62 \text{ TL/TPD}$
- Benzeri şekilde nominal katsayısı bulunan 33 taşınmazdan hareketle bölgeye ait 30205.0175 ‘ortalama nominal katsayısı’ elde edilmiştir.

2. adım(Test):

- Test verisindeki bir taşınmazın model fiyatı: 1701947 TL (toplam piksel değeri(56.3465) * ortalama nominal katsayı(30205.0175))
- Bahsedilen test verisinin gayrimenkul ilan sitesindeki fiyatı: 1900000 TL
- Aynı işlem 11 test verisine uygulanarak modelin tutarlılığı yorumlanmıştır.

Modelde bahsedilen ‘ortalama nominal katsayı’ ifadesi ‘Mühendislik hizmetleri ücret cetveli yöresel katsayılar’ ifadesini akıllara getirebilir. Söz konusu cetvelde nasıl değerli olan yerin yöresel katsayısı fazla ise planlanan modelde de değerli olan bölgenin ‘ortalama nominal katsayısı’ yüksek olacaktır. Yani yapılan çalışmada her ilçe için farklılık gösteren yöresel katsayılarından hareketle, mahalle bazlı farklılık gösteren bir ‘ortalama nominal katsayıdan’ bahsedilmektedir. ‘Ortalama nominal katsayıyı’ belirlerken hangi mahalleden kaç adet örnek alınacağı, çalışma alanının yüzölçümüne bağlıdır.

2.7 Modelin web ortamındaki fiyatlarla tasarlanması

Modelin eğitilmesi ve test edilmesi için en doğru taşınmaz fiyatları web ortamından elde edilmiştir. Bunun sebebi bahsedilen gayrimenkul sitesinin gerçeğe en yakın taşınmaz fiyatlarını barındırmasındandır. Ayrıca çoğu satışta sitede duyurulan fiyat üzerinden yapılması söz konusu fiyatların modelde kullanılması fikrinin güçlendirmektir. Modelde kullanılacak diğer veri kaynakları ise; kamulaştırma bedeli, rayiç değer, tapu değeri, emlak değeri, sigorta değeridir. Fakat bu bahsedilen taşınmaz değerleri bilim dışı yöntemlerle hesaplanıp duyurulmaktadır. Örneğin kamulaştırmada, devleti zarara uğratmamak için planlanan kamu yatırımının bulunduğu taşınmaza oldukça düşük değerler verilmektedir. Bu sebeple söz konusu çalışma için kamulaştırma bedeli kullanılabilir değildir. Bunun yanında tespit edilmesi oldukça güç olup, beyan tarihindeki değeri yansıtan rayiç değer (sürüm değeri) kullanılabilir bir kaynak değildir. Çünkü rayiç değer çoğunlukla piyasa fiyatının oldukça altındadır. Tapuda kayıtlı olan değerlere bakacak olursak, tarafların daha az vergi/harç ödeme talebinden kaynaklı taşınmazlara ait doğru beyanlar bulunmamaktadır. Bu sebeple tapu değeri de herhangi bir hesaplamada kullanılamaz. Belediyelerin emlak servisinden alınan emlak vergi değerleri ise, belediyelerin ‘aynı sokaktaki taşınmazlar aynı emlak değerine sahiptir’ tutumundan kaynaklı kullanılabilir değildir. En nihayetinde taşınmazlar aynı bölge ya da sokakta bulunsalar dahi her birinin sahip olduğu sayısız farklılık aynı değerde oldukları fikrini çürütmektedir. Bahsedilen emlak değer farkı çok az olabilir ama asla aynı olduğu varsayılmaz. Çünkü her taşınmaz bulunduğu konum ve sahip olduğu özellikler (yapını yaşı, cephesi vs.) itibarıyla eşsizdir [37]. Son olarak sigorta değerine bakacak olursak, taşınmazın m² bilgisi ile

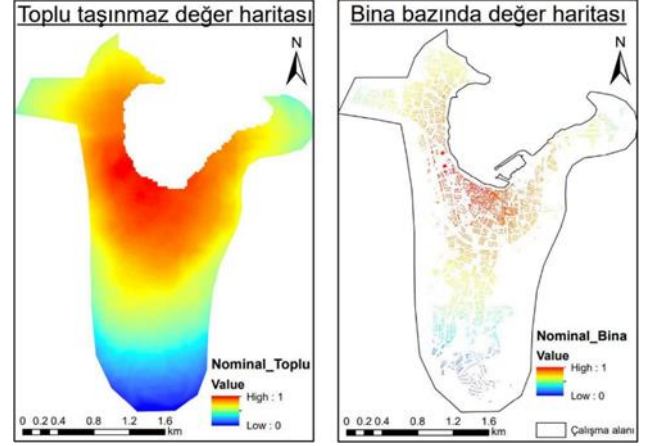
bağlantılı olup dosya sonunda daha az para ödemek için daha az m² bilgisi ile süreç yürütülebilmektedir. Evin sadece 1 odasını sigortalatıp diğer odaları bahse konu etmeyen birçok sigorta dosyası hazırlanmaktadır. Bu yüzden sigorta değeri de diğer değerler gibi söz konusu model için kullanılabilir değildir. Tüm bu bahsedilenlerden hareketle, üretilen nominal değer TL biriminde taşınmaz fiyatlarına dönüştürülmesi için web ortamındaki taşınmaz fiyatları kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Taşınmazın alım satım sürecinden bilfiil sorumlu olan malik taşınmazın gerçek değerini öğrenmek ister. Bu istekten yola çıkarak bölgedeki taşınmazlar 12 farklı kriter ile toplu şekilde kıymetlendirilmiştir. Çalışmadaki her bir vektör veriyi raster formatına dönüştürmek için 'Öklid mesafesi yöntemi' kullanılmıştır. Bahsedilen yöntemde taşınmazın bulunduğu hücre değerleri söz konusu 12 faktöre olan uzaklık-yakınlık ilişkisine göre puanlandırılmaktadır. Çıktı haritaları yapılan literatür taramasından hareketle 1 m çözünürlükle üretilmiştir. Mete ve Yomralıoğlu, En iyi en kötü yöntemi kullanarak çözünürlüğün arazi değeri üzerindeki etkisini iki farklı ilçe özelinde araştırmış olup, en ideal piksel boyutunu 10 m olarak paylaşmıştır [26]. Yine aynı çalışmada, geniş alanların değer haritaları için 50 metre çözünürlüklü piksel boyutu kabul edilebilirken, dar alanda yapılan değer haritası çalışmaları için 1 m çözünürlüklü çıktılarının üretilmesi beklendiği paylaşılmıştır. Maksimum piksel değerinin 1 (kırmızı renkte), minimum piksel değerinin 0 (mavi renkte) olduğu 12 faktörün değer haritaları Şekil 4'te sunulmuştur.

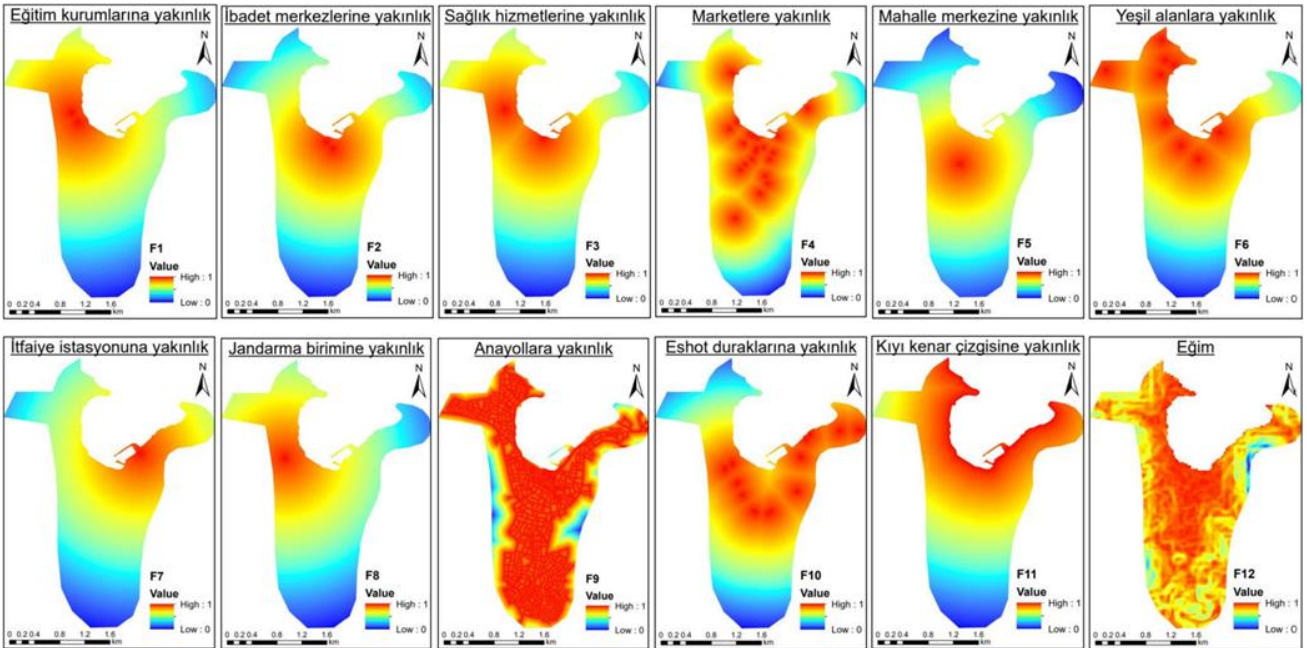
Her bir faktöre ait değer haritasının, yazarlar tarafından belirlenen ağırlıklarda alt alta toplanması ile hücre tabanlı taşınmaz değer haritası elde edilmiştir. Bahsedilen değer haritası yine 0 ile 1 arasında yeniden puanlandırılmış olup 1 metre çözünürlükle üretilmiştir. Alt alta toplama işleminin

sonunda değerlemeye uzak kişilerin dahi kolaylıkla anlayabileceği sayısal, kartografik bir harita elde edilmiştir. Çalışmanın devamında, üretilen taşınmaz değer haritası vektör formatındaki bina geometrileri ile kesilmiştir. Böylece toplu taşınmaz değer haritasına ek olarak, her binanın (6447 adet) nominal değer haritası da elde edilmiştir. Bahsedilen geçiş Şekil 5'te gösterilmiştir.

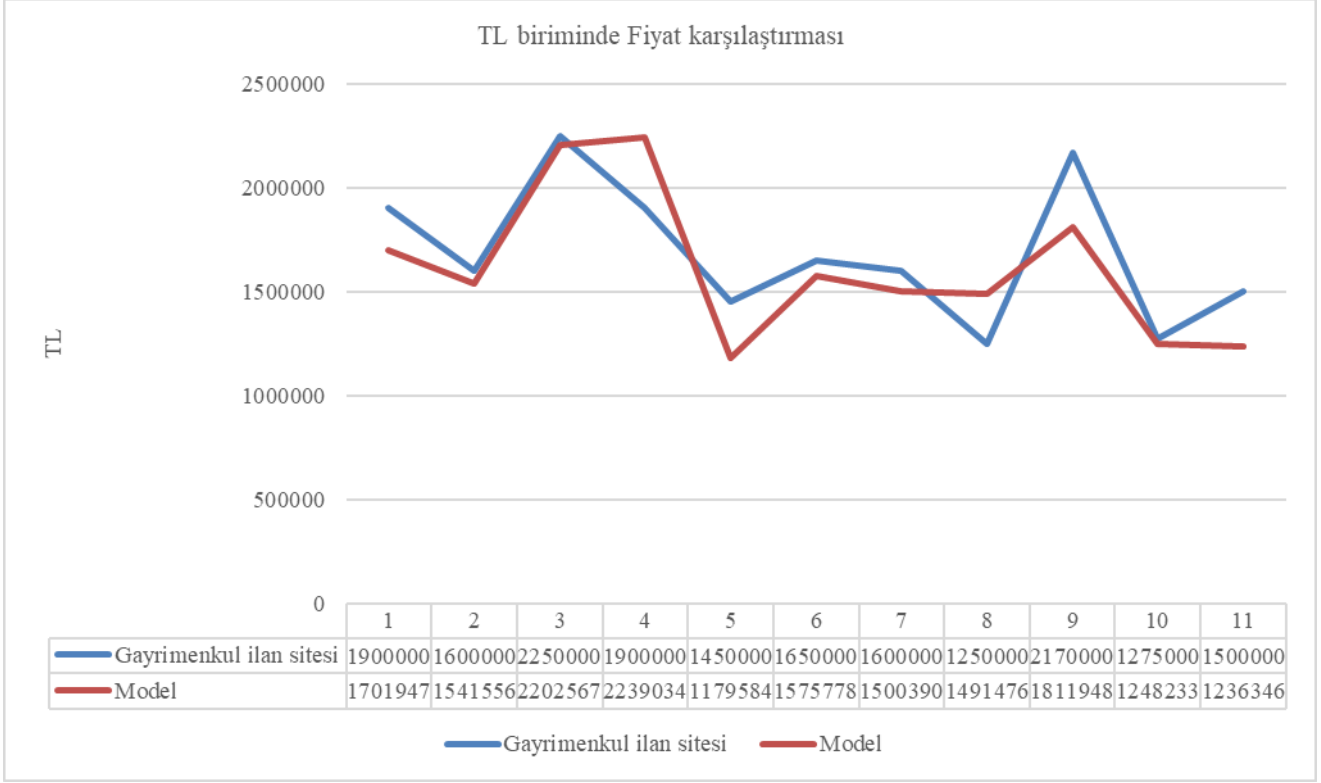


Şekil 5. Toplu taşınmaz değer haritasından Bina bazında değer haritasına geçiş

Nominal değer haritaları likidite (kolaylıkla paraya çevrilebilir) özellikteki sayısal sonuçlar olduğundan TL biriminde fiyatlara çevrilerek taşınmazlara öznitelik olarak eklenebilmektedir. Bahsedilen geçişin yapılabilmesi için kurulan Model sayesinde gerçek taşınmaz değerleri bilinen gayrimenkullerden, taşınmaz fiyatı bilinmeyen ya da satışta olmayan taşınmazların fiyatlarına geçiş yapılabilmektedir. Bu sayede binlerce taşınmazın aynı yöntem ile eş zamanlı olarak fiyatı belirlenebilmektedir. Buda değerlemede ki emek tekrarına ve tekrarlı veri üretimine son vermektedir.



Şekil 4. Faktörlerin değer haritaları

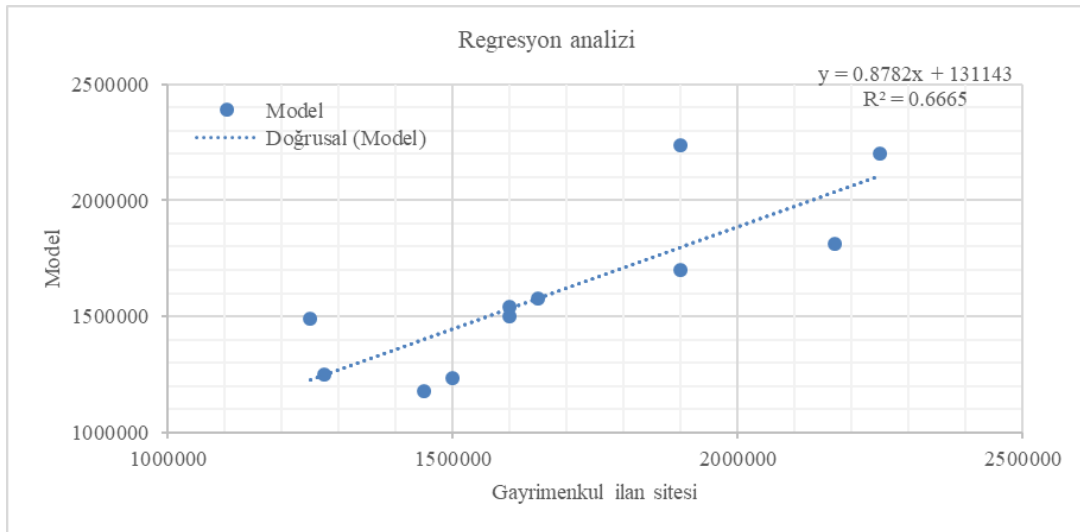


Şekil 6. Gayrimenkul ilan sitesi ve Model fiyatları (TL)

Model fiyatları ile gayrimenkul ilan sitesindeki fiyatların karşılaştırılmasından elde edilen grafik, Şekil 6'da sunulmuştur. Grafik incelendiğinde az sayıdaki veri setine rağmen çok yakın taşınmaz fiyatlarının bulunduğu net şekilde görülmektedir. En az fiyat farkına 26.767 TL ile 10. taşınmaz sahipken, en çok fiyat farkına 358.052 TL ile 9. taşınmaz sahiptir. Tüm test verilerine ait fiyat farkının ortalaması ise 74.194 TL'dir Daha çok veri setinin kullanılması ile daha yakın fiyatların bulunacağı açıktır.

Modelin sonuçlarını daha anlamlı hale getirmek için regresyon analizi yapılmıştır. Şekil 7'de sunulan analizde model fiyatları ile gayrimenkul ilan sitesi fiyatları arasında

' $y = 0.8782 \cdot x + 131143$ ' yani 'Model = $0.8782 \cdot \text{Gayrimenkul ilan sitesi} + 131143$ ' denklemi ve $0.6665 R^2$ değeri elde edilmiştir. Yani modelin tahmin ettiği 11 taşınmaz fiyatı ile, internette satışta olan yine aynı 11 taşınmazın satış fiyatları 0.6665 korelasyonla uyumlu bulunmuştur. 12 adet faktörü kullanarak, sınırlı sayıda fiyat verisi ile kurulan modelden çıkan bu korelasyon katsayısı oldukça yüksek bir doğruluk vermiştir. Model, daha fazla veri ile piyasanın manipüle edilmediği bir dönemde kurulursa daha yüksek (+1'e yakın) korelasyon katsayılarına ulaşılacaktır [38].



Şekil 7. Modelin regresyon analizi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada nominal değerlendirme yöntemi ele alınmıştır. Vektör formatındaki mekânsal bilgiler, çalışmanın temel veri kaynağını oluşturmuştur. Çalışmadaki kriterlerin ağırlıklandırma işleminin kendi içinde kontrol edilebilir olan AHY ile yapılması, uygulamanın sonuçlarını güvenilir kılmaktadır. Çalışmanın sonunda toplu değerlemesi yapılan taşınmazlar önerilen yeni bir model ile TL biriminde fiyatlandırılmıştır. Yani gayrimenkul ilan sitesinde bulunan fiyatlar yardımıyla nominal değerden TL'ye geçiş süreci tamamlanmıştır. Bahsedilen süreçte gerçek taşınmaz fiyatları bilinen gayrimenkulleri kullanarak taşınmaz fiyatı bilinmeyen ya da satışta olmayan taşınmazların fiyatları hesaplanmış, diğer bir deyişle fiyatlar tüm bölgeye yayılmıştır. Söz konusu fiyatların hesaplanması, bölgenin fiyat aralığının (min, maks, ortalama) belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Model sayesinde tüm taşınmazların fiyatlarını bilen vatandaş, daha doğru yatırım hareketleri gösterecektir. Bu model ve hesaplamaların farklı özellikteki mahallelerde uygulanabilir olduğu, kontrol için kullanılan taşınmaz fiyatları ile modelin fiyatlarının %67 oranında uyumlu olmasıyla görülmüştür. Ancak taşınmazların zaman içinde değerlerinde değişimler olacağından nominal değer haritasının, ve modeli eğitip test ederken kullanılan taşınmaz fiyatlarının belli periyotlarda güncellenmesi ile daha doğru taşınmaz fiyatları piyasaya duyurulacaktır. Son olarak bu işlemin düzenli aralıklarla yapılması halinde bölgedeki taşınmaz fiyat değişimi tespit edilebilir. Hazırlanan fiyat değişim haritaları ile bölgenin ne yöne gelişim gösterdiği izlenebilir. Tüm bu anlatılanlardan hareketle bugüne kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak hesaplanan nominal değerlerin bir model ile piyasaya entegrasyonu sağlanmış olup, literatüre katkıda bulunulmuştur.

Teşekkür

Yazarlar birçok vektör verisini sağlayan Google Haritaların ve ArcGIS'i üreten ESRI'nin desteğini kabul ediyor.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] U. Çağatay ve V. Tecim, Avrupa birliği ve e-devlet öncelikleri açısından CBS tabanlı değerlendirme haritalarının üretimi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1 (1), 15–28, 2009.
- [2] N. Erdem, Türkiye'de taşınmaz değerlendirme alanında yapılan lisansüstü tezlerinin içerik analizi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 6 (1), 112–126, 2018. <https://doi: 10.21541/apjes.332681>.
- [3] S. Yalçın ve F. B. Ünel, Multivariate statistical analysis application to determine the characteristics of legal, physical, locational, and neighbourhood factors affecting the parcel value to be used mass real estate valuation approaches. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7 (1), 32–42, 2021.

- [4] A. Özen and A. Şiş, Taşınmaz değer haritası üretiminde konumsal analiz - Bolu örneği. 4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences, pp. 142–147, Samsun, Türkiye, November 22-24 2019.
- [5] N. Erdem, Türkiye taşınmaz değerlendirme sisteminin etkinliğinin araştırılması. *Geomatik Dergisi*, 4 (1), 1–13, 2019. <https://doi: 10.29128/geomatik.418870>.
- [6] S. Döner ve R. M. Alkan, CBS destekli taşınmaz mal değer haritalarının oluşturulması. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 18-22 Nisan 2011.
- [7] N. Erdem, Türkiye için bir taşınmaz değerlendirme sistemi yaklaşımında UML tabanlı değerlendirme modeli tasarımı. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7 (3), 414–423, 2019. <https://doi: 10.21541/apjes.426080>.
- [8] M. K. Torun, M. Yanalak ve D. Z. Şeker, Taşınmaz değer haritalarının coğrafi bilgi sistemleri ile üretilmesi. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 12. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 11-15 Mayıs 2009.
- [9] M. Alkan ve F. Özfidan, Taşınmaz değerlemesine yönelik coğrafi bilgi sistemi tasarımı ve uygulaması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (2), 334–344, 2016.
- [10] Kadastro Dairesi Başkanlığı, Tapu ve Kadastro Modernizasyon Projesi Taşınmaz Değerleme Bileşeni. Taslak politika geliştirme raporu, sayfa 1-37, 8 Ocak 2016.
- [11] E. Jahanshiri, T. Buyong, and A. R. M. Shariff, A review of property mass valuation models. *Pertanika Journal of Science and Technology*, 19 (S), 23–30, 2011.
- [12] F. B. Ünel ve Ş. Yalçın, Türkiye'de taşınmazların değerini etkileyen kriterlere yaklaşım. *Geomatik Dergisi*, 4 (2), 112–133, 2019. <https://doi: 10.29128/geomatik.499681>.
- [13] A. T. İlhan ve S. Öz, Yapay sinir ağlarının gayrimenkullerin toplu değerlemesinde uygulanabilirliği: Gölbaşı ilçesi örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2 (2), 160–188, 2020.
- [14] C. Ulvi ve G. Özkan, Taşınmaz değerlemede yapay zekâ tekniklerinin kullanılabilirliği ve yöntemlerin karşılaştırılması. *Geomatik Dergisi*, 4 (2), 134–140, 2019. <https://doi: 10.29128/geomatik.501042>.
- [15] G. Yağmahan ve F. Gülgen, Taşınmaz değerlemede coğrafi bilgi sistemlerinin kullanılması: Mardin Midyat örneği. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, Eskişehir, Türkiye, 18-21 Eylül 2018.
- [16] M. Doldur ve R. M. Alkan, Nominal değerlendirme yöntemi ile CBS destekli taşınmaz değer haritalarının oluşturulması: Avanos/Nevşehir örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (4), 846–863, 2021. <https://doi:>




- 10.35414/akufemubid.888502.
- [17] M. O. Mete ve T. Yomralıoğlu, Açık kaynaklı bulut CBS yardımıyla kitlesel taşınmaz değerlendirme uygulaması. *Harita Dergisi*, 165, 28–42, 2021.
- [18] S. Döner, CBS destekli taşınmaz mal değer haritalarının oluşturulması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [19] T. Yomralıoğlu, R. Nişancı ve B. Uzun, Raster tabanlı nominal değerlendirme yöntemine dayalı arsa-arazi düzenlemesi uygulaması. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye, 2-6 Nisan 2007.
- [20] R. Grover and M. Walacik, Property valuation and taxation for fiscal sustainability - Lessons for Poland. *Real Estate Management and Valuation*, 27 (1), 35–48, 2019. [https://doi: 10.2478/remav-2019-0004](https://doi.org/10.2478/remav-2019-0004).
- [21] U. Çağatay, Kentsel taşınmaz değerlendirme haritaları ve uygulama alanları üzerine bir değerlendirme. *Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1 (1), 25–41, 2012.
- [22] N. Erdem, Türkiye taşınmaz değerlendirme sistemini yeniden yapılandırılmasına yönelik bilimsel çalışma ve öneriler üzerine bir değerlendirme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (1), 159–170, 2018. [https://doi: 10.28948/ngumuh.386408](https://doi.org/10.28948/ngumuh.386408).
- [23] T. Alkan ve S. S. Durduran, Turizm kentlerinde taşınmaz değerlemenin CBS ve AHP yöntemi yardımıyla incelenmesi: Alanya kenti örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (1), 178–187, 2020. [https://doi: 10.28948/ngumuh.760816](https://doi.org/10.28948/ngumuh.760816).
- [24] F. B. Ünel and Ş. Yalpır, Determination of the locational, physical and legal status of parcels using the AHP method and GIS in real estate valuation. *Electrical Engineering and Information Technology*, 63, 369–378, 2014. [https://doi: 10.2495/ceeit140461](https://doi.org/10.2495/ceeit140461).
- [25] T. Yomralıoğlu and R. Nişancı, Nominal asset land valuation technique by GIS. *FIG Working Week 2004*, pp. 1–9, Athens, Greece, May 22-27 2004.
- [26] M. O. Mete and T. Yomralıoğlu, Creation of nominal asset value-based maps using GIS: A case study of Istanbul Beyoglu and Gaziosmanpasa Districts. *Journal for Geographic Information Science*, 7 (2), 98–112, 2019. [https://doi: 10.1553/giscience2019_02_S98](https://doi.org/10.1553/giscience2019_02_S98).
- [27] T. Yomralıoğlu, R. Nişancı ve B. Uzun, Raster tabanlı nominal değerlendirme yöntemine dayalı arsa-arazi düzenlemesi uygulaması. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 11. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye, 2-6 Nisan 2007.
- [28] S. Engindeniz ve G. Ö. Çoşar, Tarım arazilerinin değerlemesinde coğrafi bilgi sisteminden yararlanma olanakları. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 48 (3), 283–290, 2011. [https://doi: 10.20289/euzfd.37475](https://doi.org/10.20289/euzfd.37475).
- [29] S. Yalcinkaya, S. Uzer, H. İ. Kaleli, F. Doğan, and M. Kayalık, Compost plant site selection for food waste using GIS based multicriteria analysis. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9 (10), 1908–1914, 2021. [https://doi: 10.24925/turjaf.v9i10.1908-1914.4614](https://doi.org/10.24925/turjaf.v9i10.1908-1914.4614).
- [30] I. H. Elghonaimy and W. E. Mahmoud, Sustainability and GIS application in operating smart campuses in the smart cities. 2nd Smart Cities Symposium, Bahrain, March 24-26 2019.
- [31] M. Işıklı, Coğrafi bilgi sistemleri ile taşınmaz değerlendirme. *Yapı Bilgi Modelleme*, 1 (1), 21–26, 2019.
- [32] E. Tunca ve T. Üstüntaş, Gayrimenkul değerlendirme modelinin oluşturulmasında çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması. TMMOB 6. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, Ankara, Türkiye, 23-25 Ekim 2019.
- [33] T. L. Saaty, The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- [34] E. H. Erbil, Taşınmaz mal değerlendirme amaçlı coğrafi bilgi sistemi tasarımı. 5. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 14-17 Ekim 2014.
- [35] T. Yomralıoğlu, A nominal asset value based approach for land readjustment and its implementation using geographical information systems. Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK, 1993.
- [36] O. S. Yılmaz, Flood hazard susceptibility areas mapping using Analytical Hierarchical Process (AHP), Frequency Ratio (FR) and AHP-FR ensemble based on Geographic Information Systems (GIS): a case study for Kastamonu, Türkiye. *Acta Geophysica*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00882-9>.
- [37] O. S. Yılmaz, F. Gülgen, and A. M. Ateş, Determination of the appropriate zone on dam surface for floating photovoltaic system installation using RS and GIS technologies, *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8 (1), 63–75, 2022. [https://doi: 10.26833/ijeg.1052556](https://doi.org/10.26833/ijeg.1052556).
- [38] Z. A. Polat, A. Memduhoğlu, M. Hacı ve H. Duman, Kentsel büyüme ile motorlu araç trafiği yoğunluğu arasındaki ilişkinin belirlenmesi: İstanbul örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2), 442–451, 2017. [https://doi: 10.28948/ngumuh.341275](https://doi.org/10.28948/ngumuh.341275).





Elektrikli araç şarj istasyonları için AHP yöntemi ile uygun yer seçimi: Konya örneği

Suitable site selection for electric vehicle charging stations with AHP method: The case of Konya

Tansu Alkan¹ , Ömer Faruk Atiz^{2,*} , Süleyman Savaş Durduran³ 

^{1,2,3} Necmettin Erbakan Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye

Öz

Elektrikli araçlar fosil yakıtlı araçlara göre hem ekonomik hem de çevre dostu araçlardır. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması için şarj istasyonu ağlarının kurulması gereklidir. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) sürdürülebilir yer seçiminde etkili olan birçok kriterin değerlendirilmesi için kullanılan bir tekniktir. Bu çalışmanın amacı Konya ilinde kurulacak EAŞİ için potansiyel yerlerin belirlenmesidir. EAŞİ yer seçiminde etkili olan kriterler tespit edilmiş ve ÇKKV yöntemlerinden biri olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak kriterlerin önem dereceleri belirlenmiştir. Mekânsal analizler Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla yapılmıştır. Uygunluk haritası elde edilmiş ve karar vericilere yeni kurulacak EAŞİ için uygun alanlar önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araç şarj istasyonu, Analitik Hiyerarşi Prosesi, Coğrafi Bilgi Sistemleri, Yer seçimi

1 Giriş

Elektrikli araçlar günümüzde fosil yakıtlı araçların yerini almaya başlamıştır. Ülkemizde elektrikli araç satışı 2022 yılının ilk altı ayı itibarıyla bir önceki yıla oranla yaklaşık üç kat oranda artmıştır [1]. Elektrikli araçların tercih edilme nedenleri incelendiğinde; çevre dostu olmasının yanı sıra yakıt tüketim maliyetlerinin düşük olduğu görülmektedir [2, 3]. Elektrikli araçların fosil yakıtlı araçlara göre en büyük eksikliği ise düşük menzile sahip olmalarıdır. Dolayısıyla şehir içi ve şehirlerarası trafikte yaygınlaşabilmesi için şarj istasyonu ağlarına ihtiyaç vardır. Dünyada elektrikli araç teknolojisinde yaşanan gelişmeler ülkemizde de karşılık görmeye başlamış ve pek çok kuruluş şarj istasyonu ağlarını kurmaya başlamıştır. Ülkemizde yasal mevzuat açısından da düzenlemeler getirilmeye başlamış olup Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Şarj Hizmeti Yönetmeliğini oluşturmuştur [4]. Yönetmeliğe göre şarj ağı işletmecileri lisans aldıktan sonra 6 ay içinde en az elli adet olmak üzere beş farklı ilçeyi kapsayan şarj istasyonu ağlarını kurmak zorundadır.

Şarj ağı işletmecileri elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) yerlerini hızlı ve doğru bir şekilde planlanmalıdır.

Abstract

Electric vehicles are both economical and environmentally friendly vehicles compared to fossil fuel vehicles. It is necessary to establish charging station networks for the widespread use of electric vehicles. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods are used to evaluate many criteria that are effective in the sustainable site selection of electric vehicle charging stations (EVCS). The aim of this study is to determine the potential locations for EVCS to be established in Konya. The criteria that are important for EVCS site selection were determined and the importance levels of the criteria were calculated using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, which is one of the MCDM methods. The spatial analyzes were done with Geographic Information Systems (GIS). The suitability map was obtained and the new suitable areas for EVCS were proposed to decision makers.

Keywords: Electric vehicle charging stations, Analytical Hierarchy Process, Geographic Information Systems, Site selection

EAŞİ yer seçimi için önemli olan pek çok kriter bulunmaktadır. Çok sayıda kriter bulunması durumunda ise karar verme süreci daha karmaşık hale gelmektedir. Karar vericilere destek olması bakımından Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri geliştirilmiştir. ÇKKV yöntemlerinden başlıcaları; AHP (Analytical Hierarchy Process), FAHP (Fuzzy AHP), TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution), ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality English) şeklinde sayılabilir [5].

Birçok alan için en uygun yer seçimi probleminde kriter ağırlıkları ÇKKV yöntemleri ile başarılı bir şekilde belirlenebilmektedir [6,7]. Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra mekânsal analizler ve sonuç haritalarının üretilmesi Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ile yapılabilmektedir. Uygun yer seçimi çalışmalarında kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ÇKKV yöntemlerinden AHP yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada da CBS tabanlı AHP yöntemi ile uygun yer seçimi metodolojisi izlenmiştir.

EAŞİ uygun yer seçimi konusunda yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Güler ve Yomralıoğlu [8], açık

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oatiz@erbakan.edu.tr (Ö. F. Atiz)

Geliş / Received: 14.10.2022 Kabul / Accepted: 26.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1189242

kaynak kodlu CBS yazılımı ve FAHP yöntemini kullanarak EAŞİ uygun yer seçimi için bir model geliştirmişler ve İstanbul ilinde seçilen bir bölge için uygulamışlardır. Erbaş vd. [9] Ankara ilinde yaptıkları çalışmada CBS tabanlı AHP-TOPSIS hibrit yöntemini kullanmışlardır. Sonuçta seçilen yerlerin mevcuttaki EAŞİ yerlerinden daha uygun olduğunu ortaya koymuşlardır. Sun [10], CBS tabanlı AHP yöntemini kullanarak Çin’de yaklaşık 1.5 milyon nüfusu olan bir bölge için EAŞİ en uygun yer seçimini araştırmıştır. Türkiye’de ÇKKV yöntemleriyle EAŞİ yer seçimi için yapılan çalışmaların genellikle metropol kentler olan İstanbul [11, 12] ve Ankara [9, 13] illerinde yapıldığı görülmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde özellikle çalışma alanlarının metropol kentler olduğu görülmektedir. Bu çalışmada Konya ili için CBS tabanlı AHP yaklaşımı kullanılarak EAŞİ için en uygun yerler incelenmiştir. Konya ilinde böyle bir çalışma yapılmamış olması ve EPDK Şarj Hizmeti Yönetmeliğine [4] göre şarj ağı işletmecilerinin en az beş farklı ilçede kurulum yapma zorunluluğu olması bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

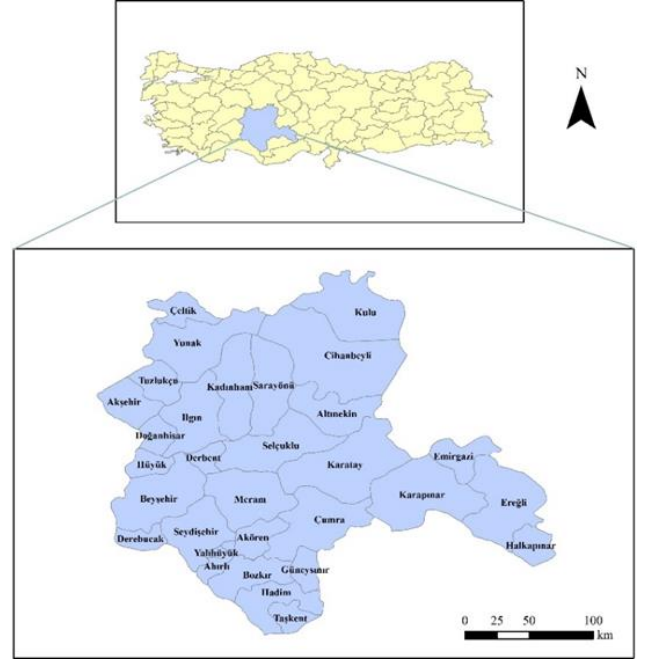
Konya, Türkiye’nin yüzölçümü bakımından en büyük şehri ve nüfus bakımından altıncı şehridir. İlin yüzölçümü yaklaşık 40.000 km²’dir ve 2021 yılı verilerine göre nüfusu 2.277.017’dir [14]. 31 tane ilçesi mevcuttur (Şekil 1).

Bu çalışmada, Konya ilinde EAŞİ için uygun yerlerin belirlenmesinde CBS tabanlı AHP yöntemi kullanılmıştır. Çalışmaya ait metodoloji Şekil 2’de verilmiştir.

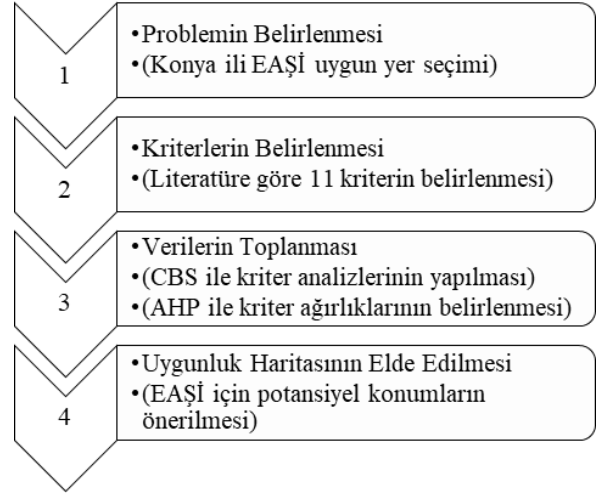
Çalışmada kullanılan kriterler literatürde yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir (Tablo 1). Bu kriterler coğrafi özellikler (K1), enerji (K2) ve kentsel özellikler (K3) olmak üzere üç ana kriter altında toplanmıştır. Coğrafi özelliklere ait alt kriterler; eğitim (K1.1), orman alanlarına yakınlık (K1.2), su kaynaklarına yakınlık (K1.3), fay hatlarına yakınlık (K1.4) ve heyelan alanlarına yakınlıktır (K1.5). Enerjiye ait alt kriterler; petrol istasyonlarına yakınlık (K2.1), trafo merkezlerine yakınlık (K2.2) ve mevcut EAŞİ yakınlıktır (K2.3). Kentsel özelliklere ait alt kriterler; nüfus yoğunluğu (K3.1), kamusal alanlara yakınlık (K3.2) ve ana yollara yakınlıktır (K3.3).

Kriterlerin değerlendirilmesinde erişilebilen mühendislerden ve şehir plancılardan görüş alınmıştır.

Alınan uzman görüşlerinin geometrik ortalaması alınarak ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanı



Şekil 2. Çalışma metodolojisi

Tablo 1. Kriterlerin literatürdeki tanımı ve yeri

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Tanım	[9]	[11]	[15]
K1	K1.1	EAŞİ maliyet ve işletme açısından düz bir zemine yerleştirilmelidir.	✓	✓	
	K1.2	EAŞİ kurulumu bitki örtüsünü olumsuz etkileyebilir, bu yüzden uzak olmalıdır.	✓	✓	✓
	K1.3	EAŞİ kurulumu su kaynaklarını olumsuz etkileyebilir, bu yüzden uzak olmalıdır.	✓	✓	✓
	K1.4	Deprem bölgeleri EAŞİ için tehlikelidir.	✓	✓	
	K1.5	EAŞİ heyelan tehlikesi olan bölgelere yerleştirilmemelidir.	✓	✓	
K2	K2.1	Hibrit araçlar petrol ürünleri kullandığı için EAŞİ petrol istasyonlarına yakın olmalıdır.	✓	✓	
	K2.2	Enerji ihtiyacı açısından EAŞİ trafo merkezlerine yakın olmalıdır.	✓	✓	✓
	K2.3	EAŞİ ideal konumu diğer EAŞİ çok yakın olmamalıdır.	✓	✓	
K3	K3.1	EAŞİ araç talebinin yüksek olduğu nüfusun yoğun olduğu bölgelere yakın olmalıdır.	✓	✓	✓
	K3.2	EAŞİ araç talebinin yüksek olduğu kamusal alanlara yakın olmalıdır.		✓	
	K3.3	EAŞİ ulaşım hareketliliği için ana yollara yakın olmalıdır.	✓	✓	

2.2 Metod

AHP yöntemi ÇKKV yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemlerden biridir. İlk olarak Myers ve Alpert tarafından ortaya atılan bu yöntem Saaty tarafından geliştirilmiştir. AHP yöntemi ile nicel ve nitel verileri birlikte değerlendirmek, kriterlerin önem derecelerini belirlemek ve alternatifleri sıralamak mümkündür. AHP yönteminin işlem adımları şöyledir [16]:

Problemin Tanımlanması ve Hiyerarşik Yapının Oluşturulması: İlk olarak problem belirlenir ve bu probleme bağlı olarak hiyerarşik yapı oluşturulur. Amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatifler hiyerarşik yapıyı oluşturan unsurlardır.

İkili Karşılaştırma Matrislerinin Oluşturulması: Kriterler için $n \times n$ boyutunda ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. İkili karşılaştırma matrislerinde ikili karşılaştırma ölçeği (Tablo 2) kullanılarak kriterler değerlendirilir ve böylelikle kriterlerin birbirlerine göre önem dereceleri belirlenir.

Tablo 2. İkili karşılaştırma ölçeği [16]

Önem Ölçeği	Açıklama
1	Eşit önemlidir.
3	1. kriter 2. kriterden daha önemlidir.
5	1. kriter 2. kriterden çok daha önemlidir.
7	1. kriter 2. kriterine göre çok güçlü önemlidir.
9	1. kriter 2. kriterine göre mutlak üstün önemlidir.
2, 4, 6, 8	Ara değerler.

Kriterlerin Ağırlıklarının Hesaplanması: Oluşturulan ikili karşılaştırma matrislerinden sonra (Denklem (1)) kriter ağırlıklarını belirlemek için sentezleme işlemi yapılır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Her sütunun toplam değeri bulunur ve ikili karşılaştırma matrisindeki her eleman bulunduğu sütunun toplam değerine bölünür ve normalize edilmiş matris elde edilir (Denklem (2)). Bu matrisin her bir satırında bulunan değerlerin ortalaması alınır ve W ağırlık vektörü elde edilir (Denklem (3)). Bu vektör her bir kriter için hesaplanan ağırlıklardır.

$$c_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

Tutarlılık Oranının Hesaplanması: Tutarlılık Oranının (CR) hesaplanabilmesi için öncelikle Temel Değer (λ) adı verilen katsayının hesaplanması gerekir. Bunun için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi (A) ile elde edilen ağırlık vektörü (W) çarpılır. Bu çarpım sonucunda elde edilen vektör ile W ağırlık vektöründeki değerler karşılıklı

olarak bölünür ve aritmetik ortalama alınır (Denklem (4)). Böylelikle λ hesaplanmış olur.

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (4)$$

Temel değer katsayısı hesaplandıktan sonra Tutarlılık İndeksi hesaplanır (CI) (Denklem (5)). Tutarlılık Oranı (CR) ise, CI değerinin Tablo 3'te verilen Rassallık İndeksi (RI) değerine bölünmesi ile bulunur (Denklem (6)).

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

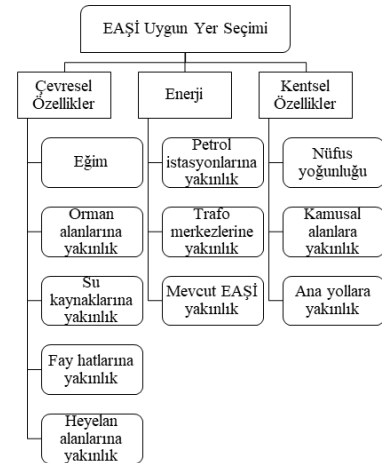
Tablo 3. Rassallık indeksi değerleri [17]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

İkili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup olmadığını test etmek için tutarlılık oranı hesaplanır. Saaty [16] bu oranının en fazla 0.10 olmasını önermiştir. Tutarlılık oranı 0.10'dan küçükse yapılan karşılaştırmalar tutarlıdır. Bu oranın 0.10'dan fazla olması durumunda ise yapılan karşılaştırmalar tutarsızdır.

3 Bulgular ve tartışma

Konya ilinde EAŞİ konumları için uygun yerlerin belirlenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada öncelikle EAŞİ konumunun belirlenmesinde etkili olan kriterler literatür incelenerek belirlenmiştir. Belirlenen kriterlere ait veriler açık veriler kullanılarak elde edilmiştir. ÇKKV yöntemleri içinde en fazla tercih edilen AHP yöntemi kullanılarak kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. AHP yönteminin uygulanmasında ilk adım hiyerarşik yapının oluşturulmasıdır. Şekil 3'te bu çalışma için oluşturulan hiyerarşik yapı verilmiştir.



Şekil 3. Kriterlere ait hiyerarşik yapı

Ana ve alt kriterler için ikili karşılaştırma matrisleri literatürde yapılan çalışmalar incelenerek ve uzman görüşleri alınarak oluşturulmuş ve her bir kriterin ağırlığı hesaplanmıştır (Tablo 4-7).

Tablo 4. Ana kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi

CR=0.06	K1	K2	K3	W
K1	1	1/5	1/7	0.0738
K2	5	1	1/3	0.2828
K3	7	3	1	0.6434

Tablo 5. Çevresel özelliklere ait ikili karşılaştırma matrisi

CR=0.07	K1.1	K1.2	K1.3	K1.4	K1.5	W
K1.1	1	1/5	1/3	3	3	0.1586
K1.2	5	1	1	3	3	0.3437
K1.3	3	1	1	3	5	0.3331
K1.4	1/3	1/3	1/3	1	1	0.0870
K1.5	1/3	1/3	1/5	1	1	0.0777

Tablo 6. Enerjiye ait ikili karşılaştırma matrisi

CR=0.03	K2.1	K2.2	K2.3	W
K2.1	1	5	9	0.7482
K2.2	1/5	1	3	0.1804
K2.3	1/9	1/3	1	0.0714

Tablo 7. Kentsel özelliklere ait ikili karşılaştırma matrisi

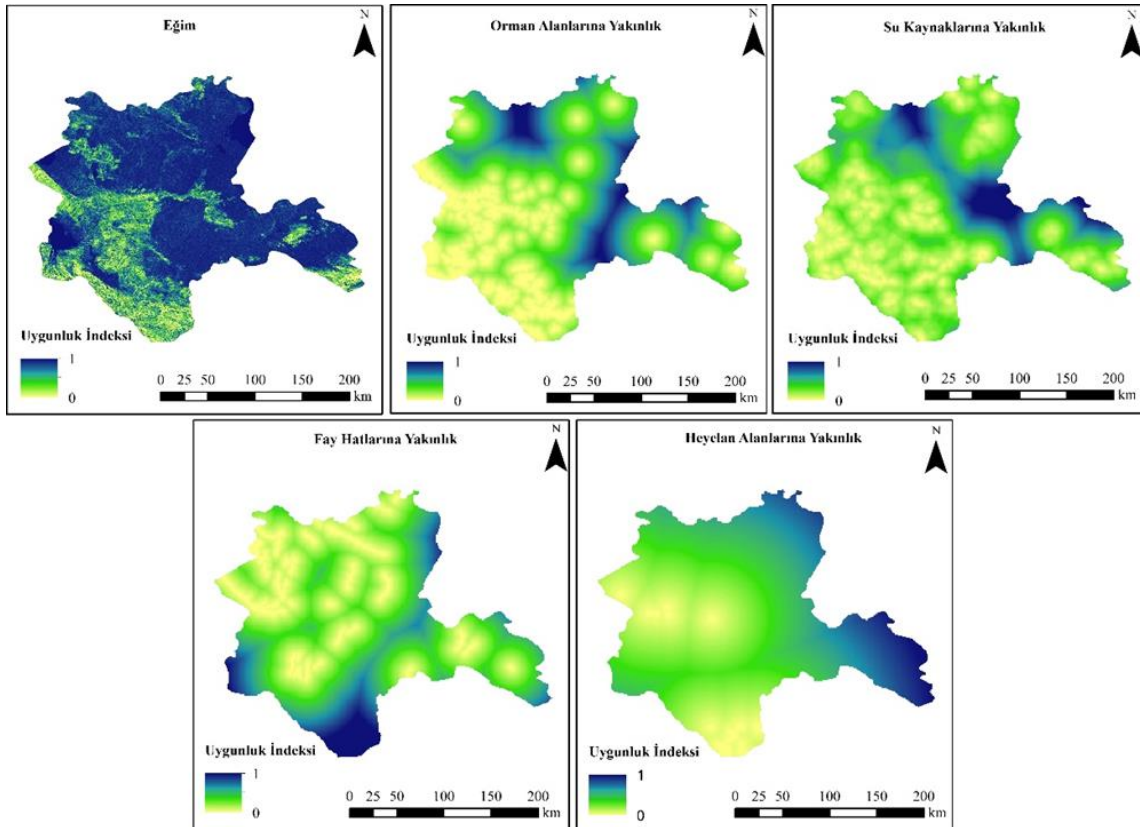
CR=0.03	K3.1	K3.2	K3.3	W
K3.1	1	1/3	1/5	0.1150
K3.2	3	1	1	0.4055
K3.3	5	1	1	0.4796

Oluşturulan ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılık oranı 0.10'dan küçüktür. Bu da elde edilen sonuçların tutarlı olduğunu göstermektedir. Kriter ağırlıklarını analizde kullanabilmek için ana ve alt kriterler arasında dönüşüm yapılmıştır. Uygunluk haritası üretilirken kullanılan ağırlıklar Tablo 8'de verilmiştir.

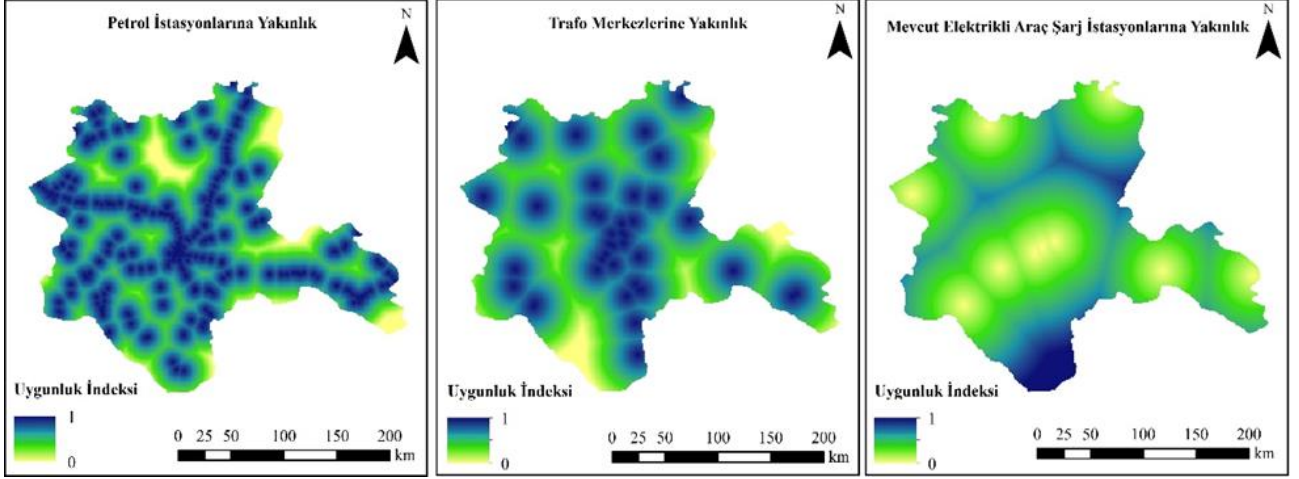
Tablo 8. Kriterlere ait dönüştürülmüş ağırlık

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Ağırlıklar	Dönüştürülmüş Ağırlıklar
K1 (0.0738)	K1.1	0.1586	0.0117
	K1.2	0.3437	0.0254
	K1.3	0.3331	0.0246
	K1.4	0.0870	0.0064
	K1.5	0.0777	0.0057
K2 (0.2828)	K2.1	0.7482	0.2116
	K2.2	0.1804	0.0510
	K2.3	0.0714	0.0202
K3 (0.6434)	K3.1	0.1150	0.0740
	K3.2	0.4055	0.2609
	K3.3	0.4796	0.3085

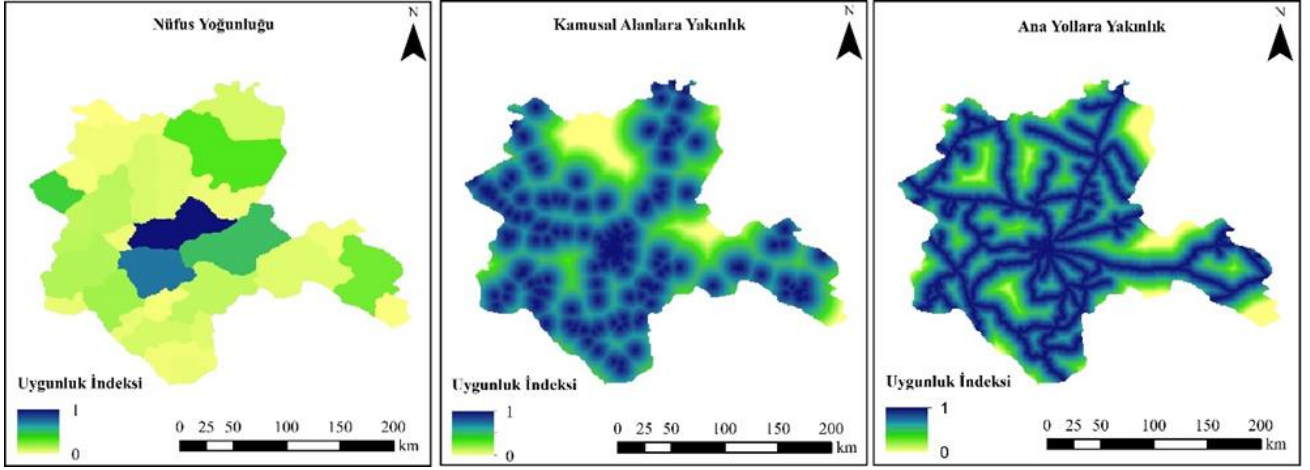
Kriterlerin dönüştürülmüş ağırlıkları incelendiğinde önem değeri en fazla olan kriter kentsel özelliklerden biri olan ana yollara yakınlık (0.3085). Bu kriteri 0.2609 önem derecesi ile yine kentsel özelliklerden kamusal alanlara yakınlık kriteri takip etmektedir. 0.2116 önem derecesi ile enerji kriterlerinden petrol istasyonlarına yakınlık kriteri en büyük üçüncü ağırlığa sahiptir. Çevresel özelliklerden fay hatlarına yakınlık (0.0064) ve heyelan alanlarına yakınlık (0.0057) kriterleri en düşük ağırlığa sahip kriterlerdir.



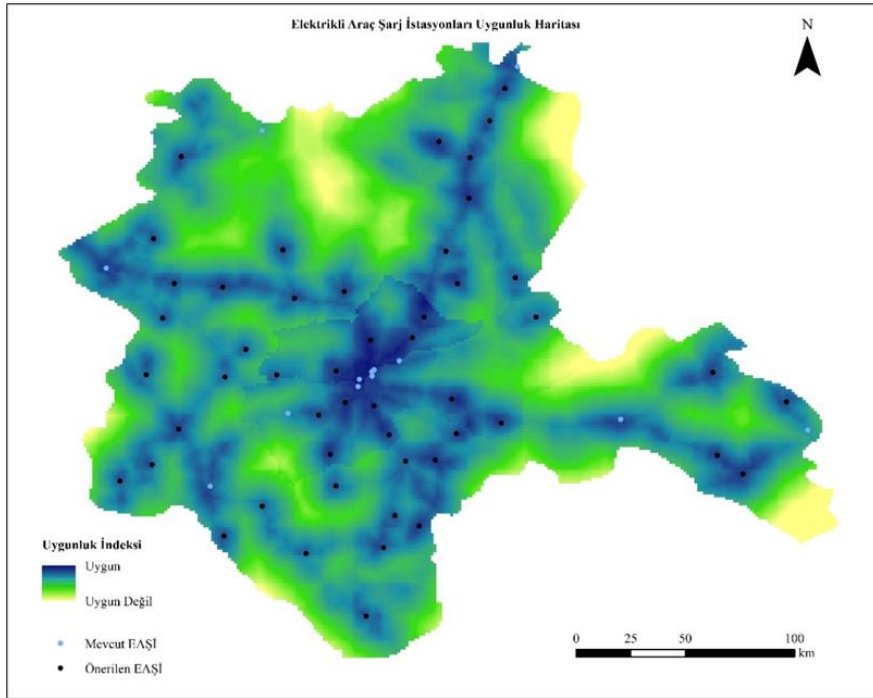
Şekil 4. Çevresel özellikler kriterlerine ait haritalar



Şekil 5. Enerji kriterlerine ait haritalar



Şekil 6. Kentsel özellikler kriterlerine ait haritalar



Şekil 7. EAŞİ uygunluk haritası

CBS ile kriterler analiz edilmiş ve uygunluk haritası üretilmiştir. ArcGIS 10.6.1 yazılımı kullanılarak yoğunluk, eğim ve mesafe analizleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kriterlerin karşılaştırılabilirlikleri ve uygunluk haritası üretiminde kullanılabilirliği için elde edilen haritalar 0-1 aralığında normalize edilmiştir. Uygunluk indeksinin 0'dan 1'e doğru olması uygunluğun arttığını göstermektedir. Kriterlere ait elde edilen analiz haritaları Şekil 4-6'da verilmiştir. Elde edilen analiz haritaları Tablo 8'de verilen dönüştürülmüş ağırlıklar dikkate alınarak ArcGIS 10.6.1 yazılımı ile ağırlıklı olarak birleştirilmiş ve üretilen uygunluk haritası Şekil 7'de verilmiştir.

Elde edilen uygunluk haritası incelendiğinde EAŞİ konumları için sarı renkli alanlar uygun olmayan, mavi renkli alanlar ise uygun olan alanları temsil etmektedir. Mevcut EAŞİ konumlarının uygun olan alanlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Konya'nın merkez ilçelerinden olan Selçuklu, Meram ve Karatay ilçeleri ile Seydişehir, Akşehir, Karapınar, Ereğli, Kulu ve Çeltik ilçelerinde elektrikli araçlar için şarj istasyonları yer almaktadır. Konya'nın geriye kalan 22 ilçesinde şarj istasyonu yoktur. Önerilen 50 tane EAŞİ ise yol ağları üzerinde ve petrol istasyonlarına yakın konumlarda yer almaktadır.

Uygun yer seçimi analizlerinde, elde edilen uygunluk haritasında kullanılan kriterler ve kriterlerin önem derecesi etkilidir. Bu çalışmada, ana yollara yakınlık, kamusal alanlara yakınlık ve petrol istasyonlarına yakınlık kriterleri en etkili kriterler olmuştur. Literatür incelendiğinde Bilgilioğlu [13] tarafından bulanık AHP kullanılarak Ankara'da gerçekleştirilen çalışmada da ana yollara ve petrol istasyonlarına yakınlık kriterlerinin etkili olduğu görülmektedir. İstanbul ili için bulanık AHP kullanılarak Kaya vd. [11] tarafından yapılan çalışmada önem derecesi en yüksek kriterler taksi sayısı ve taksi duraklarına yakınlık olmuştur. Erbaş vd. [9] tarafından bulanık AHP kullanılarak Ankara ilinde yapılan çalışmada, bu çalışmadan farklı olarak petrol istasyonlarına yakınlık kriteri önem derecesi en düşük kriterdir. Önem derecesi en yüksek kriter ise hizmet bölgesinde elektrikli araç sahipliği kriteri olmuştur. Zhao ve Li [15], Çin'de bulanık Delphi ve Hibrit ÇKKV yöntemlerine dayalı gerçekleştirildikleri çalışmada ana yollara yakınlık kriterini dikkate almamışlardır.

4 Sonuçlar

Çevre dostu olması özelliği ile elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması sürdürülebilir tüketim için önemlidir. Bu araçların yaygınlaşması beraberinde şarj istasyonu ağlarının oluşturulmasını gerektirir. Şarj istasyonları için en uygun yerlerin belirlenmesi çok kriterli bir problemdir. ÇKKV yöntemleri uygun yer seçimi problemlerinde kriterlerin değerlendirilmesi için kullanılan tekniklerdir. ÇKKV yöntemlerinin CBS ile entegrasyonu ile kriterler analiz edilebilmekte ve yer seçimi problemleri için uygun alanlar belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada, Konya ilinde yeni kurulacak EAŞİ için uygun alanlar belirlenmiştir. Yer seçimi probleminde etkili olan kriterler literatürde yapılan çalışmalar incelenerek tespit edilmiştir. Uzman görüşü alınarak değerlendirilen kriterlerin

AHP yöntemi ile ağırlıkları hesaplanmıştır. 11 kriter için CBS kullanılarak analizler yapılmış, kriter ağırlıkları kullanılarak uygunluk haritası elde edilmiş ve yeni kurulacak EAŞİ için uygun yerler önerilmiştir.

Bu çalışma, karar vericiler için rehber niteliğindedir. Ayrıca sürdürülebilir kent yönetimi açısından EAŞİ için uygun yerlerin belirlenmesi önemlidir. EPDK Şarj Hizmeti Yönetmeliği kapsamında oluşturulacak olan şarj istasyonu ağları için uygun yerlerin belirlenmesinde bu çalışmada kullanılan kriterlerin ve yöntemlerin yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 11

Kaynaklar

- [1] TEHAD (Türkiye Elektrikli ve Hibrid Araçlar Derneği), <https://www.tehad.org/2022/07/08/2022-yili-ilk-6-ayinda-satilan-elektrikli-ve-hibrid-otomobil-satis-rakamlari/>, Erişim tarihi 10 Ekim 2022.
- [2] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez and A. H. Strømman, Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17 (1), 53-64, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.
- [3] H. Özbay, C. Közkurt, A. Dalcalı ve M. Tektaş, Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3 (1), 34-50, 2020.
- [4] Resmi Gazete (2 Nisan 2022), <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/04/20220402-2.htm>, Erişim tarihi 10 Ekim 2022.
- [5] M. Velasquez and P. T. Hester, An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*, 10 (2), 56-66, 2013.
- [6] A. U. Akar, S. Yalpir, S. Sisman, G. Goktepel and E. Yel, A deterministic approach in waste management: delineation of potential territories in Turkey for industrial symbiosis of olive pomace, marble wastes and plastics by integrating fuzzy AHP to GIS. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02415-2>.
- [7] A. Saha and R. Roy, An integrated approach to identify suitable areas for built-up development using GIS-based multi-criteria analysis and AHP in Siliguri planning area, India. *SN Applied Sciences*, 3 (4), 1-17, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04354-5>.
- [8] D. Güler ve T. Yomralıoğlu, Açık kaynak kodlu CBS yazılımı ve bulanık analitik hiyerarşi yöntemini içeren elektrikli araç şarj istasyonu yer seçimi önerisi. *Harita Dergisi*, 163, 17-28, 2020.
- [9] M. Erbaş, M. Kabak, E. Özceylan and C. Çetinkaya, Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. *Energy*, 163, 1017-1031, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.140>

- [10] S. Linzhao, Site selection for EVCSs by GIS-based AHP method. 5th International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEEER 2020), vol. 194, 05051, E3S Web of Conferences, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019405051>.
- [11] Ö. Kaya, K. D. Alemdar and M. Y. Çodur, A novel two stage approach for electric taxi charging station site selection. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102396, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102396>.
- [12] Ö. Kaya, A. Tortum, K. D. Alemdar and M. Y. Çodur, Site selection for EVCS in Istanbul by GIS and multi-criteria decision-making. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 80, 102271, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102271>.
- [13] 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>.
- [14] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), https://www.tuik.gov.tr/indir/duyuru/favori_raporlar.xlsx, Erişim tarihi 12 Ekim 2022.
- [15] H. Zhao and N. Li, Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective. *Energies*, 9 (4), 1–22, 2016. <https://doi.org/10.3390/en9040270>.
- [16] T. L. Saaty, Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, 1 (1), 83-98, 2008.
- [17] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, 1980.





Taş kolon tasarım parametrelerinin konsolidasyona etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of stone column design parameters on consolidation

Firdevs Uysal^{1,*} , Abdulazim Yıldız² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
² Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

Öz

Taş kolon, yumuşak zeminin taşıma kapasitesini artırmak, yumuşak zemin konsolidasyonunu hızlandırmak ve zemin oturmasını azaltmak için kullanılan etkili bir zemin iyileştirme yöntemidir. Bu çalışmada, literatürde geçmiş bir laboratuvar çalışmasından alınan doğrulanmış bir sayısal model ve model parametreleri kullanılarak taş kolonun zamana bağlı davranışını değerlendirmek için bir dizi sayısal çalışma yapılmıştır. Taş kolon ile iyileştirilmiş yumuşak zemin birim hücre yaklaşımı kullanılarak Plaxis 2D ile modellenmiştir. Gerilme konsantrasyon oranı, permeabilite oranı ve çap oranının taş kolonun zamana bağlı oturma davranışı üzerindeki etkisini anlamak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, bu tasarım parametrelerinin konsolidasyonun hızlanması ve ortalama konsolidasyon hızının artması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Taş kolon, Yumuşak zemin, konsolidasyon, Sayısal modelleme, Birim hücre

1 Giriş

Problemlili zemin olarak nitelendirilen yumuşak ve gevşek zemin şartlarına sahip bölgelerde, geleneksel temel inşaatı yöntemlerinin ekonomikliğini kaybetmesi ve çevre faktörlerinin oluşturduğu çok sayıda sıkıntı ve bunların aşılmasındaki güçlükler sebebiyle yerinde zemin iyileştirme yöntemlerinin kullanılması önem kazanan konulardandır. Bu alanda çok sayıda alternatif iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Uygun yöntemin seçiminde amaca ulaşabilme, uygulanabilirlik, zaman ve ekonomi öncelikli tasarım kriterleridir.

Taş kolon, problemlili zeminlerin dayanımının artırılması ve oturmaların azaltılması için yaygın olarak kullanılan ekonomik ve çevre dostu zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Yöntemin uygulama kolaylığı, maliyetinin düşük olması ve performansı ile derin temel uygulamalarına alternatif bir yöntemdir. Taş kolon yönteminde zemin içine sıkıştırılmış granüler malzeme yerleştirilerek zeminin rijitliği artırılır ve dolaylı olarak zeminin kayma dayanımı artar ve sıkışabilirliği azalır [1]. Taş kolonlar düşey drenlere benzer bir şekilde çalışır. Zemin içindeki su yüksek enerji seviyesinden daha düşük enerji seviyesine doğru akış halindedir. Su, permeabilitesi yüksek taş kolon içinde zemine göre daha rahat hareket ettiği için taş kolon düşük

Abstract

The stone column is an effective ground improvement method that is used to increase the load-bearing capacity of soft soil and speed up the process of soft soil consolidation and decrease the settlement of soil. In this study, a series of numerical studies have been performed to evaluate the time-dependent behavior of stone column by using a validated numerical model and model parameters from a past laboratory study in literature. The soft soil reinforced with a stone column was modeled with Plaxis 2D using the unit cell concept. Parametric studies were conducted to understand the impact of stress concentration ratio, permeability ratio, and diameter ratio on the time-dependent settlement behavior of stone column. The numerical results indicate that these design parameters have a significant influence on the acceleration of the consolidation and increasing the average consolidation rate.

Keywords: Stone column, Soft soil, Consolidation, Numerical modeling, Unit cell

enerji potansiyeline sahiptir. Diğer bir ifade ile kolonların permeabilitesinin yüksek olması zemin içindeki drenaj yolunu kısaltarak ince daneli zeminlerin konsolidasyonunu hızlandırırken, sıvılaştırılabilir zeminlerin de sıvılaşma potansiyelini düşürmektedir [2]. Taş kolonların en etkili olduğu zeminler drenajsız mukavemeti 7-50kPa olan zeminlerdir [3]. Yöntem, özellikle hafif yapılar (çok katlı olmayan yapılar, dolgular vb.) altındaki zayıf zeminlerde tercih edilmektedir [4].

Geoteknik analiz ve tasarımlar çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal araştırmalar ile yapılmaktadır [5]. Özellikle son on yılda, taşıma kapasitesi, oturmalar ve zemin içindeki suyun hareketi gibi birçok konu sonlu elemanlar yöntemli ile araştırılmıştır. Taş kolonların sayısal analizi için iki boyutlu düzlem deformasyon, eksenel simetrik birim hücre ve üç boyutlu modelle yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Bunlardan eksenel simetrik birim hücre, kompozit zeminlerin performansını incelemek için pek çok araştırmacı tarafından kullanılan basitleştirilmiş bir kavramdır [7]. Bu kavramda aynı yüklemeye maruz birçok taş kolon tek bir kolon ile temsil edilir.

Bu çalışmada taş kolonların tasarım parametrelerinden gerilme konsantrasyonu (n), çap oranı ($N=d_o/d_c$) ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: firdevsuysal@ohu.edu.tr (F. Uysal)

Geliş / Received: 18.05.2022 Kabul / Accepted: 17.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1118184

permeabilite oranının (k_v/k_c) konsolidasyon miktarı ve hızına etkisi sayısal analizler ile parametrik olarak araştırılmıştır. Sayısal analizlerde laboratuvarda özel tasarlanan büyük ölçekli bir ödometre hücresi içinde gerçekleştirilen taş kolonlu deneyler modellenmiştir. Silindirik deney hücresi içindeki taş kolon Plaxis bilgisayar yazılımı ile birim hücre esas alınarak iki boyutlu (2D) olarak modellenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan sayısal modelin geometrisi, yükleme koşulları, yumuşak zemin ve rijit temel parametreleri Uysal vd. [8] tarafından taş kolonsuz olarak yapılan laboratuvar deneyleri ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış bilgiler bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle sayısal olarak modellenen laboratuvar çalışması detaylı olarak sunulmuştur. Ardından birim hücre kavramından bahsedilerek, sayısal çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak da laboratuvarda taş kolonlu ve kolonsuz olarak gerçekleştirilen deneyler sayısal olarak modellenerek modelin doğruluğu tespit edilmiş ve parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal analiz sonuçlarına göre gerilme konsantrasyonu, permeabilite oranı ve çap oranının taş kolon ile iyileştirilmiş zeminlerin konsolidasyon hızı ve miktarında oldukça etkili olduğu görülmüştür.

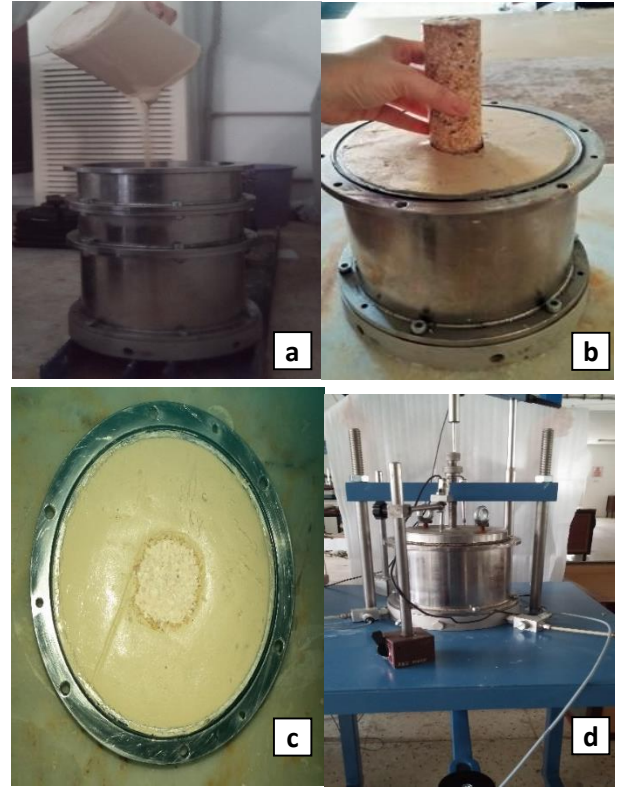
2 Deneysel çalışmalar

Bu bölümde izah edilen deneysel çalışma sayısal olarak modellenmiştir. Deneysel çalışmalarda yumuşak zemin içine inşa edilen tek bir taş kolonun zamana bağlı davranışı araştırılmıştır. Bu deneyler, özel tasarlanan büyük ölçekli bir ödometre hücresinde gerçekleştirilmiştir. Deney hücresi, 20cm çap ve 15cm yüksekliğe sahip silindirik bir hücredir. Deney hücresi standart ödometre yükleme çerçevesine benzer bir yükleme düzeneğine sahip olup, deney süresince kademeli yüklemeler yapılmıştır. Yumuşak zemin, kaolen kilinin yeniden yapılandırılması ile hazırlanmıştır. Bu amaçla etüvde tamamen kurutulmuş kaolen kiline, kaolen kilinin likit limitinin (%38) 1.5 katı olan %57 oranında su ilave edilmiştir. Kil ve su bir karıştırıcı yardımı ile homojen bir şekilde karıştırılarak akışkan bir zemin elde edilmiştir (Şekil 1.a). Yapısı bozulan bu akışkan zemine 30kPa değerinde bir ön yükleme yapılarak yeniden yapı kazanması sağlanmıştır. Bu yöntem literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda da kullanılmıştır [9,10].

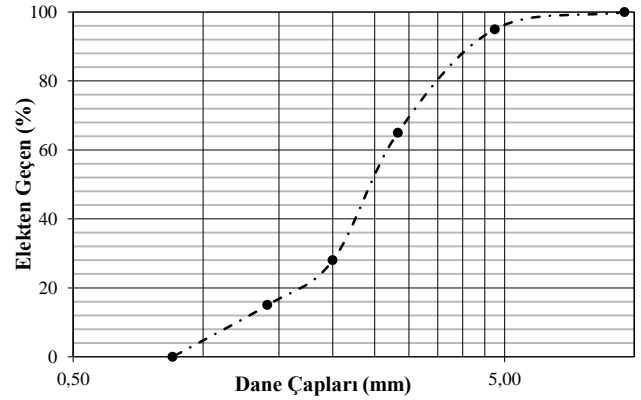
Deneysel çalışmada taş kolon imalatı için kullanılan granüler malzeme Mersin Taşucu Bolacalı taş ocağından getirilmiştir. Bu malzemenin dane büyüklüğü kolon çapı esas alınarak literatür araştırması sonucunda belirlenmiştir. Kolon malzemesinin dane büyüklüğü dağılım eğrisi Şekil 2’de verilmiştir. Taş kolonlar, granüler malzemenin homojen sıkıştırıldığından emin olmak ve yumuşak zeminde taş kolonların sıkıştırılmasıyla oluşacak örselenmeyi ortadan kaldırmak için dondurularak oluşturulmuştur (Şekil 1.b). Dondurulmuş kolon yöntemi literatürde yer alan uygulamalardandır [9,11]. Donmuş kolonların çapı 60mm ve yüksekliği ise 150mm’dir. Yoğunluğu 16.42kN/m^3 olacak şekilde plastik bir boru içine homojen olarak sıkıştırılan granüler malzeme su ile birlikte -15°C sıcaklığa sahip bir soğutucuda dondurulmuştur. Dondurulan bu kolon, deney hücresindeki ön konsolidasyonunu tamamlayarak yeniden yapı kazandırılmış yumuşak zeminin merkezine açılan kolon

ile aynı çaplı boşluk içine serbest olarak bırakılarak kolonun çözülmesi sağlanmıştır (Şekil 1.c). Erimiş kolon ve yumuşak zemine 30kPa değerinde bir günlük ön yükleme daha yapılarak kolon içindeki suyun tahliyesi sağlanmıştır.

Zemin ve kolon imalatı tamamlandıktan sonra üzerine poroz kâğıt yerleştirilmiş ve poroz kâğıt üzerine de zemindeki suyun tahliyesi için 10mm kalınlığında kum tabakası serilmiştir. Kum tabakasının üzerine model temel yerleştirilerek hücreye kademeli artışlarla sabit yüklemeler yapılmıştır (Şekil 1.d). Her bir yükleme aşaması boşluk suyu basıncı sönümlenene kadar sürdürülmüştür. Yükleme esnasında model temel üzerinde meydana gelen deplasmanlar zamana bağlı olarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Deney düzeneğinin oluşturulması



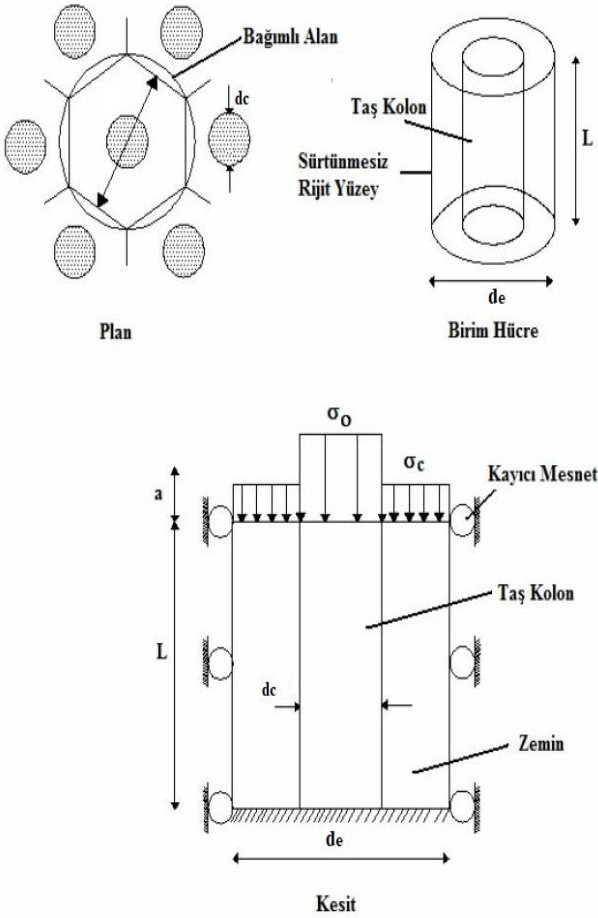
Şekil 2. Taş kolon malzemesinin dane büyüklüğü dağılımı

3 Sayısal analizler

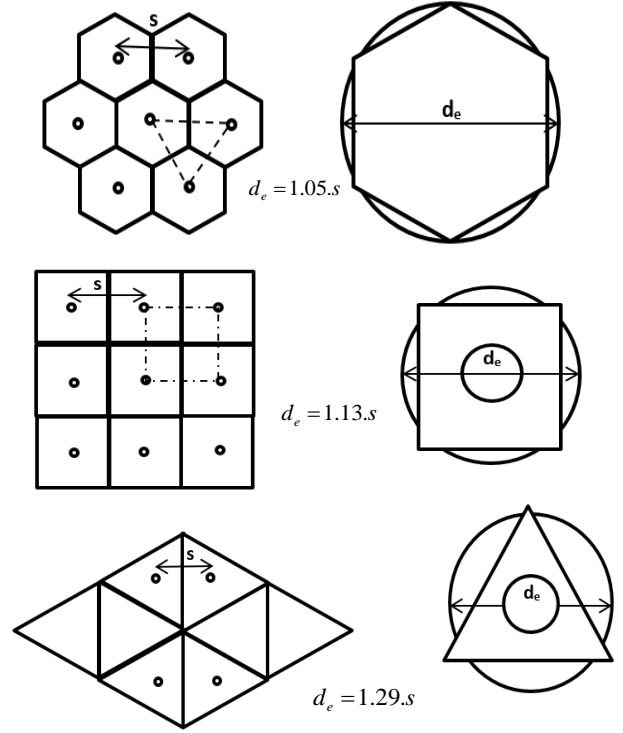
Bu kısımda öncelikle sayısal analizlerin temelini oluşturan birim hücre kavramından bahsedilmiştir. Ardından deneysel çalışmaların sayısal analizi detaylı olarak izah edilmiştir.

3.1 Birim hücre kavramı

Birim hücre, Barksdale ve Bachuc [3] tarafından sonsuz bir alana inşa edilmiş üniform yüklü grup taş kolonların analizi için önerilmiştir (Şekil 3). Bu yaklaşım, taş kolonların ampirik veya yarı ampirik tasarım yöntemlerinin çoğu tarafından esas alınmaktadır [6], [12-14]. Silindirik geometriye sahip birim hücre içinde zemin ve zeminin merkezinde tek bir taş kolon bulunur. Hücre boyutu taş kolonlar arası mesafe (s) ve kolonların yerleşim düzenine bağlıdır. s mesafesi taş kolon çapının 2-3 katı kadar değer alır. Taş kolonların yerleşim düzeni kolonun etkili olduğu bölgenin büyüklüğünü etkilemektedir. Bu etki bölgesi yaklaşık bir daireye benzetilir ve bu dairenin çapına efektif çap adı verilir (d_e) (Şekil 4). Birim hücre kavramında sınır koşulları etkisinin ihmal edilmesi, yükün sadece düşey yönlü tatbiki, kolonlar arası etkileşim ve grup etkisinin ihmal edilmesi gibi çeşitli kabuller yapılmaktadır. Bu kabullere rağmen birim hücrenin karmaşık problemlere basit çözümler getirmesi ve sonuçların makul olması yöntemin yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır [15].



Şekil 3. Birim hücre kavramı [3]

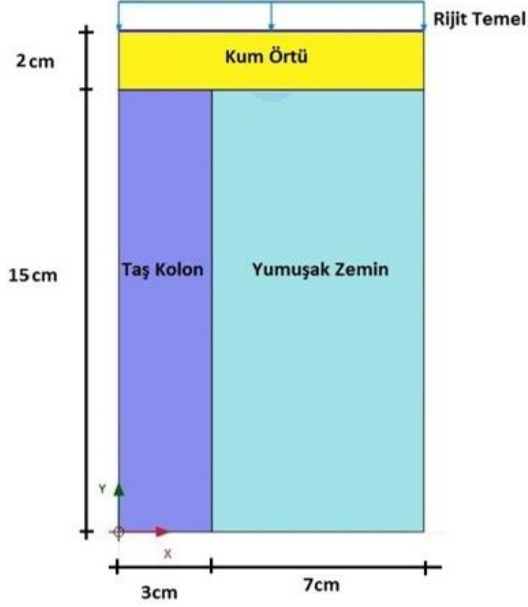


Şekil 4. Taş kolonların yerleşim düzeni ve eşdeğer daire

3.2 Model deneyin sayısal analizi

Bu bölümde, deneysel çalışmalar başlığı altında detayları verilen ve taş kolonlu olarak laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler sayısal olarak modellenmiştir. Bu çalışmada oluşturulan sayısal modelin geometrisi, yükleme koşulları, yumuşak zemin ve rijit temel parametreleri Uysal vd. [8] tarafından taş kolonsuz olarak yapılan laboratuvar deneyleri ile doğrulanmıştır. Doğrulanmış model parametreleri ve zemin özellikleri bu araştırmada da kullanılmıştır (Tablo 1-2). Bu şekilde diğer tasarım parametreleri sayısal olarak doğrulanmış kolonsuz deney hücresinde sonradan inşa edilen taş kolonun bireysel etkisi değerlendirilmiştir. Sayısal analizler Plaxis bilgisayar yazılımı ile 2D olarak yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri, silindirik deney hücresi içinde bulunan yumuşak zemin ve zeminin merkezinde yer alan tek bir taş kolon ile yapıldığı için sayısal analizlerde birim hücre yaklaşımı kullanılmıştır. Geometrik olarak deney hücresinin yarısı alınarak eksenel simetrik analizler yapılmıştır (Şekil 5). Drenajlı olarak yapılan analizlerin ilk aşaması yükün tatbik edilmesi olup, bu aşama plastik analizler ile, ikinci aşama olan yükün bekletilmesi de konsolidasyon analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Analiz süreleri laboratuvar deneylerine paralel olarak seçilmiştir. Deney yüklemesi yayılı yüklemeye şeklinde ve 20mm kalınlığındaki rijit temel yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Rijit temel için kullanılan model parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Yumuşak zemini temsil eden kaolenin davranışını modellemek için Soft Soil Model kullanılmıştır (Tablo 2). Ayrıca, taş kolon ve rijit temel altına yerleştirilen kum için ise Mohr Coulomb zemin modeli kullanılarak model parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur.

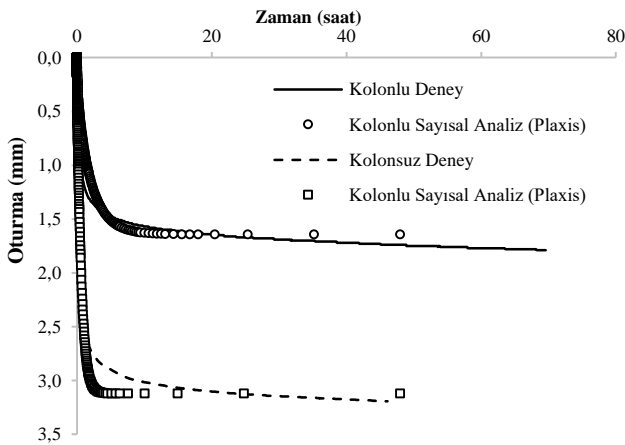
Sayısal analizlerde taş kolon tasarımında önem arz eden gerilme konsantrasyonu (n), permeabilite oranı (k_s/k_c) ve çap oranı ($N=d_e/d_c$) kavramları ve bu kavramların konsolidasyon miktarı ve hızına etkisi sayısal analizler ile parametrik olarak araştırılmıştır.



Şekil 5. Taş kolonlu aksenal simetrik deney modeli

4 Sayısal analiz sonuçları

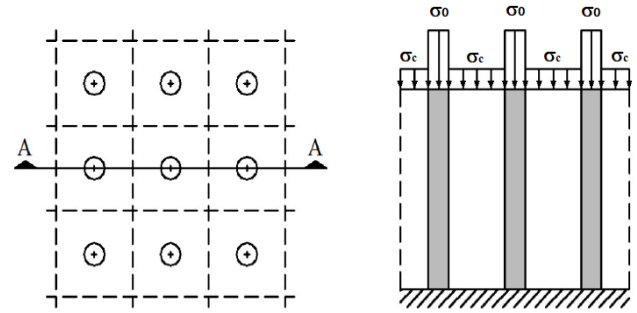
Bu kısımda öncelikle laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kolonlu ve kolonsuz laboratuvar deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada yoğunluk olmaması için 50-100kPa basınç kademesinde gerçekleştirilen karşılaştırma verilmiştir (Şekil 6). Deney ve sayısal model doğrulaması yapıldıktan sonra taş kolonların tasarım parametrelerinden gerilme konsantrasyonu (n), permeabilite oranı (k_s/k_c) ve çap oranının ($N=d_e/d_c$) konsolidasyon miktarına etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Parametrik çalışma sonuçları ilgili başlıklar altında sunulmuştur.



Şekil 6. Kolonlu ve kolonsuz deney sonuçlarının sayısal analizlerle karşılaştırılması (50-100kPa)

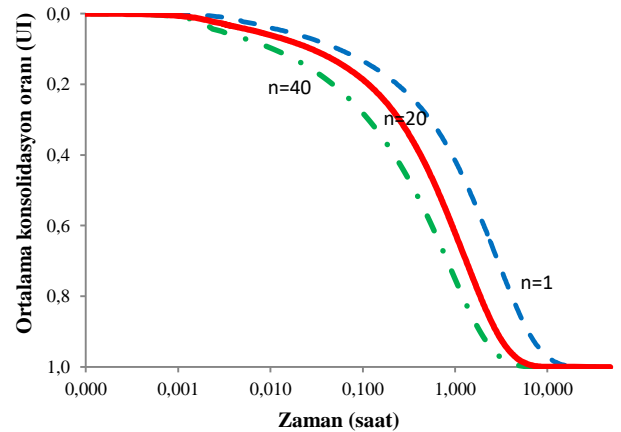
4.1 Gerilme konsantrasyonu (n)

Gerilme konsantrasyonu (n), taş kolonların iyileştirme performansını değerlendirmek için önem arz eden parametrelerden biridir. n , uygulanan üniform düşey gerilmenin kolon ve zemine dağılım oranıdır ($n = \sigma_{kolon} / \sigma_{zemin}$) (Şekil 7). Bu oran, kolon ve zemin üzerinde yapılan gerilme ölçümleri ile tespit edilebilir. Barksdale ve Bachus [3], arazi araştırmaları ile gerilme konsantrasyonunun tipik değerinin 2.5-5.0 arasında olduğunu tespit etmiştir. n birçok araştırmacı tarafından arazi, laboratuvar ve sayısal çalışmalar ile araştırılmıştır [16]. Taş kolon ve etrafındaki zemin yüksek dayanıma sahip kompozit bir yapı oluşturur. Üniform bir yükleme altında kolon ve etrafındaki zeminin rijitlik farkından dolayı kolon ve zemin farklı büyüklükte gerilmeler taşır. Rijitliği yüksek taş kolonların üzerindeki gerilmeler zemine göre daha fazladır ve bu durum zemine gelecek düşey gerilmeleri azaltacağı için zemindeki oturmaları da azaltılır.



Şekil 7. Kolon ve zemindeki gerilme dağılımı [17]

Bu çalışmada n parametresinin taş kolonların zamana bağlı davranışına etkisi parametrik olarak araştırılmıştır. Kolon ve zemin arasındaki gerilme dağılımını görmek için rijitlik farkının tanımlanması gerekir. Bu amaçla zemin rijitliği sabit tutulurken, taş kolon rijitliği artırılmıştır. Bu amaçla $n=1, 20$ ve 40 değerleri için analizler yapılmıştır. Sayısal analizler sonucunda gerilme konsantrasyonunun artmasıyla hücre içindeki zeminin konsolidasyon hızının ve konsolidasyon miktarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. n parametresinin zamana bağlı değişimi

Tablo 1. Rijit temelin model parametreleri, Uysal vd. [8]

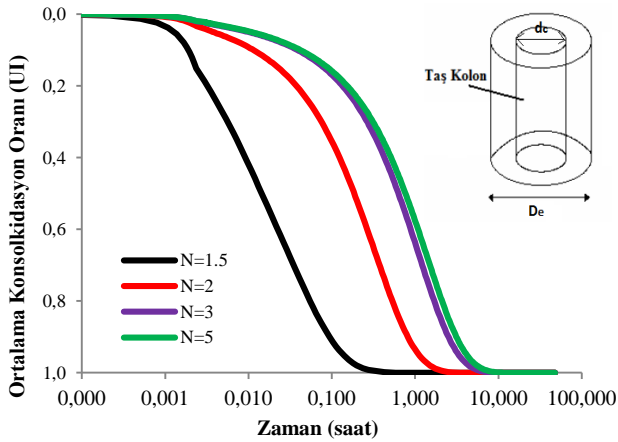
	Model	EA (kN/m)	EI (kN/m ² /m)
Rijit Temel	Elastik	20x10 ⁷	8500

Tablo 2. Malzeme parametreleri, Uysal vd. [8]

	Kaolen	Kolon Malzemesi	Kum
Model	Soft Soil Model	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
γ_{unsat} (kN/m ³)	16.5	20	19
γ_{sat} (kN/m ³)	17.3	22	20
E' (kN/m ²)	-	40000	20000
ν'	-	0.35	0.35
c' (kN/m ²)	20	0	0.1
ϕ'	35	43	32
ψ	0	13	2
λ^*	0.04	-	-
κ^*	0.004	-	-
POP	52	-	-
c_k	0.5	-	-
K_0	-	0.7	0.5

4.2 Çap oranı ($N=d_e/d_c$)

Çap oranı kolon etki bölgesinin çapının (d_e), kolon çapına (d_c) oranıdır. Bu parametre kolon merkezleri mesafesi ve kolon yerleşim düzeni ile ilgilidir. N etkisini araştırmak için taş kolon çapı (60mm) sabit tutulup, silindirik deney hücresinin çapı değiştirilmiştir. N etkisi deney hücre büyüklüğü sabit tutularak kolon çapının değiştirilmesi ile de araştırılabilir. Bu kısımdaki analizlerde $N=1.5, 2, 3$ ve 5 seçilmiş ve bu değerlerin etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak N oranının azalması ile kolon etrafındaki drenaj yolu kısalmış, bunun sonucunda konsolidasyon hızı ve oranı artmıştır (Şekil 9). Bu durum taş kolon çapının artması veya kolonlar arası mesafenin azalmasının konsolidasyon süresini azaltıp konsolidasyon miktarını azalttığı şeklinde de yorumlanabilir. Çalışma ile taş kolon büyüklüğü ve diziliminin taş kolonların zamana bağlı performansında önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



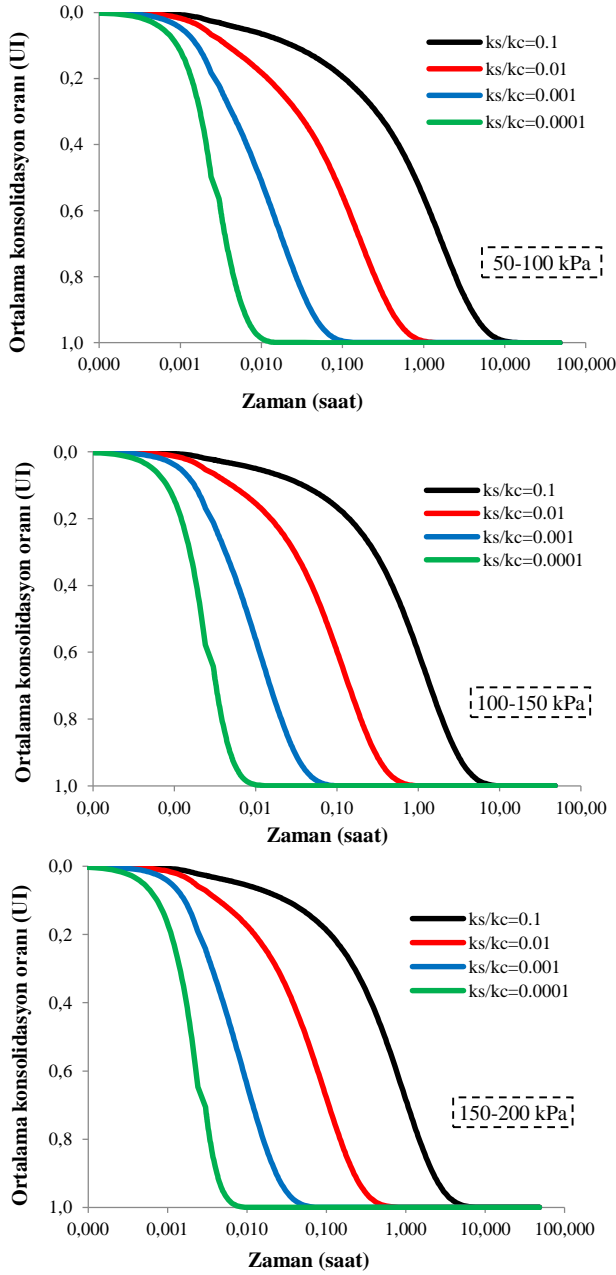
Şekil 9. Çap oranının zaman bağlı değişimi

4.3 Permeabilite oranı (k_s/k_c)

Taş kolonların kullanılmasındaki temel amaçlardan biri iki farklı mekanizma ile zeminin birincil konsolidasyonunu hızlandırmaktır. Bunlardan ilki, taş kolonun yüksek permeabilitesinin radyal drenajı sağlayarak aşırı boşluk suyu basınçlarının daha hızlı sönmülmesi sağlamak, ikincisi ise taş kolonun yüksek rijitliği ile zemine daha az düşey yük gelmesini sağlayarak aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu azaltmaktır [18].

Taş kolon permeabilitesinin arazide doğru bir şekilde tespiti, sahada ölçülmesi en zor parametrelerden biridir [19]. Bu nedenle bu çalışmada taş kolon permeabilitesinin (k_c) iyileştirmeye olan etkisi laboratuvar deneyinin farklı basınç kademeleri için parametrik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla analizlerde zemin permeabilitesi (k_s) ve k_c oranı değiştirilerek kolon ve zemin arasında permeabilite farkı oluşturulmuştur. Bu oran 0.1-0.0001 aralığında seçilmiştir. Bu aralığın geniş tutulmasındaki amaç arazide olası tüm durumların sağlanmasıdır. Permeabilite oranının (k_s/k_c) artması başka bir ifade ile taş kolon permeabilitesinin azalması, kompozit zeminin permeabilitesini azaltarak tüm basınç kademelerinde konsolidasyon hızını ve miktarını azaltmıştır (Şekil 10). Her bir basınç kademesindeki k_s/k_c oranları incelendiği zaman basınç kademesi değeri gözetmeksizin benzer bir eğilim görülmektedir. Sonuç olarak, taş kolon permeabilitesi iyileştirme süresi ve miktarına önemli katkı sağlamaktadır.

Taş kolon imalatı sırasında kil ve taş kolon malzemesi kısa bir süre içinde karıştığından kolon malzemesinde bir miktar tıkanmaya neden olacaktır. Tıkanmış kolon malzemesinin özellikleri kolon iskeletine giren kil miktarına bağlıdır. Kil zeminin kolon boşluklarını doldurması kolonun permeabilitesini azaltacaktır [20]. Kolon permeabilitesinin kolon imalatından doğrudan etkilendiği düşünülürse, kolon imalatı sırasında kolon permeabilitesini azaltabilecek etkilere dikkat etmek gereklidir.



Şekil 10. Permeabilite oranının konsolidasyona etkisi

5 Sonuçlar

Laboratuvar ortamında büyük ölçekli bir ödometre deney hücresinde yeniden yapılandırılarak oluşturulan yumuşak bir zemine tek bir taş kolon imal edilerek oluşturulan kompozit zeminin zamana bağlı davranışı sayısal olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda tasarımda önem arz eden parametrelerden gerilme konsantrasyonu, çap oranı ve permeabilite oranının kompozit malzemenin zamana bağlı davranışına etkisi araştırılmıştır. Çalışma ile elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Gerilme konsantrasyonunun artmasıyla deney hücresi içindeki yumuşak zeminin konsolidasyon hızı ve konsolidasyon miktarı artmıştır.

- Taş kolon çapının artması veya kolonlar arası mesafenin azalmasının konsolidasyon süresini azaltıp konsolidasyon miktarını azaltmıştır.
- Taş kolon permeabilitesinin artması ile konsolidasyon hızı ve miktarı artmaktadır. Kolon permeabilitesinin kolon imalatından önemli derecede etkilendiği göz önüne alınırsa imalat esnasında kolon permeabilitesini azaltabilecek faktörlerden kaçınılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] S. Rajesh and P. Jain, Influence of permeability of soft clay on the efficiency of stone columns and geosynthetic-encased stone columns—a numerical study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9 (5), 483-493, 2015. <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000088>.
- [2] M. Ghazavi, A. E. Yamchi, and J. N. Afsar, Bearing capacity of horizontally layered geosynthetic reinforced stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*. 46 (3), 312–318, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2018.01.002>.
- [3] R. D Barksdale and R. C. Bachus, Design and construction of stone columns. Vol. I, FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 1983.
- [4] A. Cimentada and A. Da Costa, Laboratory experimental analysis of radial consolidation around a stone column. In *Geotechnics of soft soils: Focus on ground improvement*, 213–217, London: Taylor and Francis, 2008.
- [5] B. G. Sexton, B. A. McCabe, M. Karstunen, and N. Sivasithamparam, Stone column settlement performance in structured anisotropic clays: The Influence of Creep. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8 (5), 672–688, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.004>
- [6] A. Hamzh, H. Mohamad and M. F. Bin Yusof, The effect of stone column geometry on soft soil bearing capacity. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16 (2), 200-210, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1666557>
- [7] K. S. Ng and S. A. Tan, Simplified homogenization method in stone column designs. *Soils and Foundations*, 55 (1), 154-165, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.012>
- [8] F. Uysal, B. Bağrıaçık ve A. Yıldız, Yumuşak zemin model parametrelerinin zemin davranışına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (1), 97-106, 2018. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.420681>
- [9] A. Cimentada, A. Da Costa, J. Cañizal and C. Sagasetta, Laboratory study on radial consolidation and deformation in clay reinforced with stone columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (1), 36–52, 2011. <https://doi.org/10.1139/T10-043>

- [10] W. Frikha, M. Bouassida, and J. Canou, Parametric study of a clayey specimen reinforced by a granular column. *International Journal of Geomechanics*, 15 (15), 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000419](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000419)
- [11] J. W. Choi, D. Y. Lee, and C. S. Yoo, Undrained characteristics of geogrid-encased stone column under cyclic load using reduced-scale model tests. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 29 (1), 109-120. 2013. <https://doi.org/10.7843/kgs.2013.29.1.109>
- [12] N. P. Balaam, J. R. Booker, Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 9, John Wiley and Sons, Inc., 331-351. 1985.
- [13] H. J. Priebe, Design of vibro replacement, the application of Priebe's method to extremely soft soils 'floating' foundations and proof against slope or embankment failure. *Ground Engineering*, 38 (1) 2005.
- [14] J. Castro and M. Karstunen, Numerical simulations of stone column installation. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 1127-1138. 2010. <https://doi.org/10.1139/T10-019>
- [15] L. A. Dar and M. Y. Shah, Three dimensional numerical study on behavior of geosynthetic encased stone column placed in soft soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 1901-1922, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01594-x>
- [16] M. Yıldız, Determination of stress concentration factor in stone columns by numerical modelling. Master Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2013.
- [17] M. Killeen, Numerical modelling of small groups of stone columns. Ph.D. Thesis, National University of Ireland, Galway, 2012.
- [18] B. S. Tan and S. Tjahyono, Practical modelling of stone-column reinforced ground. In *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, 291-311, Korean Geotechnical Society, 2006.
- [19] K. Adalier and A. Elgamal, Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns. *Engineering Geology*, 72 (3-4), 275-291, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.001>
- [20] P. Tai, B. Indraratna and C. Rujikiatkamjorn, Experimental simulation and mathematical modelling of clogging in stone column. *Canadian Geotechnical Journal*, 55 (3), 427-436, 2018. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0271>





Tarihi uydu görüntüleri ile 1980 Aşağı Seyhan Ovası taşkın olayının yeniden değerlendirilmesi

Reassessment of 1980 Lower Seyhan Plain flood event by using historical satellite data

Şerife Pınar Güvel^{1,*} , Mehmet Ali Akgül² , Recep Yurtal³ 

^{1,2} Devlet Su İşleri 6. Bölge Müdürlüğü, 01120 Seyhan, Adana Türkiye

³ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330 Sarıçam, Türkiye

Öz

Taşkın yönetimi çalışmalarında taşkın olaylarının nedenleri, oluşma süreçleri, çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri detaylı olarak incelenmektedir. Tarihi taşkın olayları, taşkınların gerçekleştiği dönemlerin teknik imkanları, yersel gözlemler ve ölçümler doğrultusunda değerlendirilmiş olup, günümüzde ise veri temini ve analizi konusunda teknolojik gelişmelerin yaşanması, tarihsel olaylara yeni bir bakış açısı ve yaklaşımın gerekliliğini de beraber getirmiştir. Bu kapsamda, bu çalışmada, 1980 yılında Çukurova Bölgesinde gerçekleşen Seyhan nehri taşkın olayı uzaktan algılamaya yaklaşımı ile tekrar irdelenmiştir. Çalışmanın amacı, yersel ölçümlerle değerlendirilen taşkın yönetimi faaliyetlerine en yeni teknolojilerden olan uydu tabanlı uzaktan algılama tekniği ile yeni bir yaklaşımın araştırılması ve sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında, 27 Mart-6 Nisan 1980 tarihleri arasında Seyhan nehrinde gerçekleşen taşkınların yayılım alanları aynı tarihlerdeki Berdan nehir taşkını yayılım alanı etkileşimi birlikte değerlendirilerek Landsat 3 uydu görüntüleri ile analiz edilmiştir. 1980 yılında DSİ tarafından hazırlanan Seyhan taşkın raporunda yersel ölçümlerle belirlenen taşkın yayılım alanlarının güncel yazılımlarla ve uydu verileri ile tekrar gözden geçirilmesinin amaçlandığı çalışmada, uzaktan algılama yaklaşımı ile Seyhan-Berdan'da (Tarsus-Adana-Akdeniz arasında) 28235.6 ha, Aynaz'da 669.24 ha, Seyhan Nehri ile Sarımsaklı arasında kalan alanda 7876.8 ha alanın taşkın suları altında kaldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tarihi taşkınlar, Uzaktan algılama, Landsat-3, Nehir taşkını, Taşkın yayılım alanı

1 Giriş

Küresel iklim değişikliğinin ve insan kaynaklı faaliyetlerin su kaynaklarına olumsuz etkilerinden dolayı, yaşamın sürdürülebilmesi için vazgeçilmez olan su kaynaklarının izlenmesi ve etkin yönetimi zorunlu hale gelmiştir. Doğal afetlerin her geçen gün artması ve erken müdahale çalışmalarının can ve mal kayıplarının önlenmesindeki önemi nedeniyle taşkın olayları esnasında taşkın sürecinin izlenmesi ve taşkınlardan sonra taşkın yayılım alanlarının hızla tespit edilerek zararların

Abstract

The causes of flood events and their occurrence periods, environmental, economic and social impacts of flood events are examined in detail in flood management studies, Historical flood events have been evaluated in line with the technical possibilities of ground observations and measurements in the periods when the floods occurred, Nowadays, technological developments in data supply and analysis have brought the necessity of a new perspective and approach for evaluation of historical events. In this context, in this study, the flood event that took place around the Seyhan river in the Çukurova Region in 1980 was re-examined with the remote sensing approach. The aim of the study is to investigate flood management activities evaluated by terrestrial measurements with a new approach using the satellite-based remote sensing technique, which is one of the newest technologies, and to evaluate the results comparatively. Within the scope of the study, flood inundated areas around the Seyhan river between 27 March and 6 April 1980 were analyzed by using Landsat 3 satellite images by evaluating the Berdan river flood inundated area interaction on the same dates. In this study, which has the goal of reviewing flood inundation areas determined by terrestrial measurements in the Seyhan Flood Report prepared by DSİ in 1980, with current software and satellite data, it was determined that 28235.6 ha in Seyhan-Berdan (between Tarsus-Adana-Mediterranean), 669.24 ha in Aynaz, 7876.8 ha in the area between Seyhan River and Sarımsaklı, were flood inundated areas.

Keywords: Historical floods, Remote sensing, Landsat-3, River flood, Flood inundated area

belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Bu kapsamda, tarihi taşkın kayıtları, nehir havzalarında yağış-akış ilişkisinin zaman ölçeğinde incelenebilmesi ve olası taşkın etkilerinin belirlenebilmesi için bilgi sağlamakta, tarihi taşkınların analizi ile taşkın risklerinin değerlendirilerek gerekli tedbirlerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Tarihsel taşkın kayıtları, özellikle değişen iklim koşullarında, iklimsel süreçlerin daha iyi anlaşılması için faydalıdır [1]. Tarihi taşkınların zamansal ve mekansal olarak haritalanması, gelecekteki taşkın olaylarında hasarların

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: pinar.guvel@gmail.com (Ş. P. Güvel)

Geliş / Received: 06.09.2022 Kabul / Accepted: 04.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1171552

azaltılması çalışmaları için bilgi sağlayabilmektedir [2]. Daha önceki yıllarda tarihi taşkınlar üzerine çeşitli analizler ve araştırmalar yapılmıştır [1], [3-10].

Taşkın yönetiminin tüm aşamalarında uzaktan algılama (UA) ve coğrafi bilgi sistemi (CBS) tekniklerinin kullanımı taşkın yönetimi çalışmalarını desteklemekte, UA ile fiziksel olarak ulaşımı zor olan alanlar için ekonomik ve hızlı seçenekler değerlendirilebilmekte, CBS teknikleri ise veri analizi ve sorgulamaların yapılabilmesini kolaylaştırmaktadır [11]. Taşkın haritalarının uzaktan algılama verileri kullanılarak hazırlanmasında, taşkınların gerçek zamana yakın (near-real-time) izlenmesi, verilerin konumsal kapsamı, taşkın haritalama yöntemlerinin etkinliği, geniş alanlı bir taşkın nispeten düşük maliyetle haritalanması avantajları bulunmaktadır [12]. Meteorolojik gözlemlerin uydu verileri ile entegre edilmesi, tarihi taşkın yayılım haritalarında taşkın suları altında kalan alanların kısa sürelerde ve uygun maliyetlerle tespitini sağlamaktadır. Akgül (2018), SAR (Sentetik Açıklıklı Radar) uydularından biri olan Sentinel-1 uydu verilerinin taşkın anında görüntü alınarak taşkın yönetiminde kullanılabileceğini belirtmektedir [13]. Diğer bir çalışmada, Akgül ve Çetin (2019), Aşağı Seyhan Ovasında bulunan Akarsu alt havzasında 15-19 Ocak 2019 tarihlerinde gerçekleşen taşkın olayından etkilenen tarımsal alanların irdelenmesinde uzaktan algılama tekniğini kullanmıştır ve taşkın olaylarından etkilenen arazilerin uzaktan algılama tekniğiyle güvenli olarak belirlenebileceğini ifade etmiştir [14]. Taşkın suları altında kalan alanların belirlenmesinde [15-18], taşkın sınırlarının belirlenmesinde [19], taşkın risk modellemelerine atlık olmak üzere [20] uzaktan algılama (UA) uydu verilerinin analizi üzerine çeşitli araştırmalara literatürde sıklıkla rastlanmaktadır.

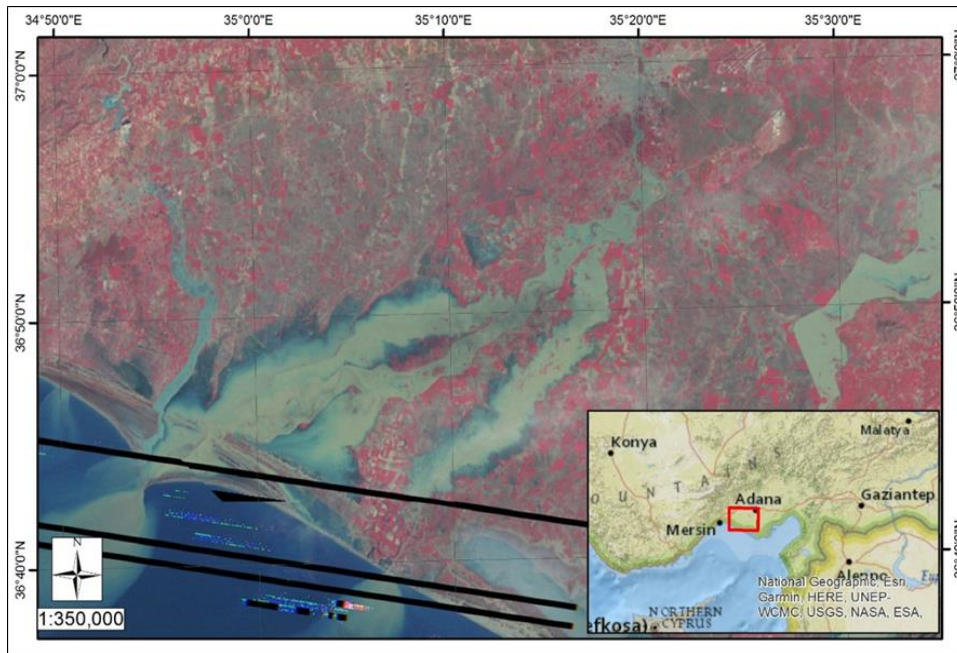
Aşağı Seyhan Ovasında Seyhan Nehrinde meydana gelen taşkın olaylarının oluşum süreçleri, nedenleri ve önleyici çözüm arayışları, can ve mal kayıplarından, bölgenin

tarımsal üretimine ve ekonomisine olumsuz etkilerinden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Adana Seyhan ve Ceyhan nehirlerinde 1930'lu yıllardan itibaren gerçekleşen taşkın olaylarında, yerleşimlerin ve ovanın taşkın suları altında kalması nedeniyle meydana gelen zararların giderilmesi ve taşkınları önleyici tedbirler alınması ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür [21]. Aşağı Seyhan Havzasında meydana gelen taşkın olaylarının önlenmesi amacıyla 1953 yılında Seyhan Nehri taşkın koruma seddeleri, 1956 yılında Seyhan Barajı hizmete alınmıştır. 1980 yılı Mart ayında gerçekleşen taşkından sonra, taşkınların önlenmesi için yeni tedbirlerin alınması konusu gündeme gelmiş ve Seyhan nehrinin üzerine Seyhan Barajının membasına Çatalan Barajı inşa edilerek 1997 yılında işletmeye alınmıştır.

Seyhan nehri taşkınları, Aşağı Seyhan Ovasında bulunan tarım arazilerinin bir kısmının taşkın suları altında kalmasına neden olmuştur. Seyhan nehrinde 27 Mart- 6 Nisan 1980 tarihleri arasında gerçekleşen taşkın olayı yersel ölçümler ve gözlemlerle değerlendirilmiştir, bu tarihi taşkın olayının güncel yazılımlarla ve uydu görüntüleriyle analiz edildiği bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu çalışmada, Çukurova bölgesinde 27 Mart- 6 Nisan 1980 tarihli Seyhan nehri taşkın olayı, aynı tarihte gerçekleşen Berdan nehri taşkını etkileri ile birlikte, yeni bir yaklaşım olan uydu tabanlı uzaktan algılama tekniği ile irdelenmiş ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışma alanı olarak (Şekil 1), Türkiye'nin güneyinde bulunan Çukurova bölgesinde yer alan Aşağı Seyhan ovası seçilmiştir. 27 Mart- 6 Nisan 1980 tarihleri arasında gerçekleşen yaklaşık 100 yıl tekerrüre sahip 6079 m³/s pik debili taşkın olayları sonucunda Seyhan ve Berdan Nehirlerinde meydana gelen taşkın yayılım alanları Landsat-3 görüntüsü Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Çalışma alanı

Tablo 1. Çalışmada kullanılan görüntülerin adları ve tarihleri

Tarih	Uydu Görüntüsünün Adı	Sütun/Satır Numarası
01.04.1980	LM03_L1TP_188034_19800401_20210714_02_T2	188/34
01.04.1980	LM03_L1TP_188035_19800401_20210714_02_T2	188/35

Tablo 2. Landsat 3 uydusuna ait bant özellikleri [29]

Bant Numarası	Bant Adı	Bant Genişliği (µm)	Çözünürlük (m)
B4	Yeşil	0.5 – 0.6	60
B5	Kırmızı	0.6 – 0.7	60
B6	NIR (Yakın Kıızıl Ötesi)	0.7 – 0.8	60
B7	NIR (Yakın Kıızıl Ötesi)	0.8 – 1.1	60

Uzaktan algılamada uyduların farklı teknik özellikleri bulunmaktadır. Landsat uydu verileri NASA tarafından ücretsiz olarak sunulmaktadır. Çeşitli ülkelerde afet yönetiminde ve afetlerin değerlendirilmesinde Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır [22]. Landsat verileri 1972’de kullanıma sunulduğundan beri, su alanlarını haritalamak için kullanılmaktadır [23]. Landsat görüntüleri ile, su kütleleri yüzey alanlarının incelenmesi, taşkın olaylarının haritalanması, taşkın etki alanlarının ve taşkın olaylarının nedenlerinin araştırılması yapılmıştır [19, 24-25].

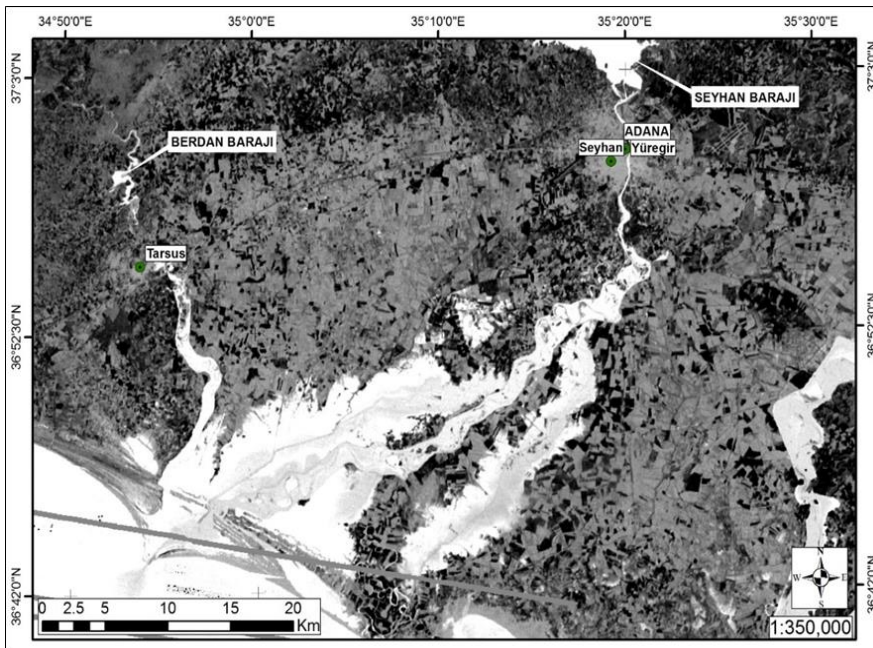
İlk Landsat uydusunun 1972’de atılmasından bu yana gezegenimizin 8 milyondan fazla görüntüsü toplanmıştır, araştırmacıların çalışmaları bir zamanlar sınırlıyken, on yıllar içinde değişen her piksel analiz edilebilmiştir. Bu veri açısından zengin çalışmaların çoğu, USGS’in 2008 tarihli bir kararı sayesinde tüm Landsat verilerinin halka ücretsiz olarak sunulmasıyla mümkün olmuştur [26].

Bu çalışmada, Tablo 1’de isimleri verilen, 01.04.1980 tarihli Landsat 3 uydu görüntüleri kullanılmıştır. 27 Mart-6 Nisan 1980 tarihleri arasında gerçekleşen Seyhan Nehri taşkınlarının uzaktan algılama ile analizi için bu tarih aralığındaki uydu görüntüleri bulutluluk durumu da dikkate alınarak incelenmiş, ve 01.04.1980 tarihli uydu

görüntülerinin kullanılmasına karar verilmesinde bu etken belirleyici olmuştur. Landsat 3, Landsat 2’den üç yıl sonra, 5 Mart 1978 tarihinde fırlatılmıştır [27]. Landsat 3 uydusu 18 günde aynı noktadan veri alma özelliğine sahiptir [28]. Landsat 3, Landsat 1 ve Landsat 2 gibi, 917 km’lik ortalama yükseklikte, Dünyanın etrafında kutup yörüngeli olarak çalışmaktadır; Landsat 3 uydusuna ait bant özellikleri Tablo 2’de verilmektedir [29].

Landsat görüntüleri iki aşamada analiz edilmektedir, bunlar radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltmedir, bu iki adım uzaktan algılamada yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Bu çalışmada, Landsat 3 uydusu görüntüleri öncelikle radyometrik ve atmosferik düzeltmeler yapılarak kullanılmıştır. Ayrıca, taşkın alanlarının hesaplanması için NDWI (Normalized Difference Water Index) indeksi kullanılmıştır. NDWI’ın farklı bantların kombinasyonu ile nasıl hesaplanacağı Denklem (1) ile gösterilmiştir [30].

$$NDWI = \frac{\text{Yeşil} - \text{NIR}}{\text{Yeşil} + \text{NIR}} \quad (1)$$



Şekil 2. NDWI görüntüsü

Landsat 3 uydusu için Yeşil; bant 4, NIR; bant 6'ya karşılık gelmektedir. Çalışma sahası NDWI görüntüsü Şekil 2'de verilmektedir. NDWI, yüzey suyu özelliklerini tanımlamak için başarıyla kullanılmaktadır [31]. NDWI indeksinin, uydu görüntüleri ile taşkın yayılım alanlarının haritalanmasında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [12, 32-36].

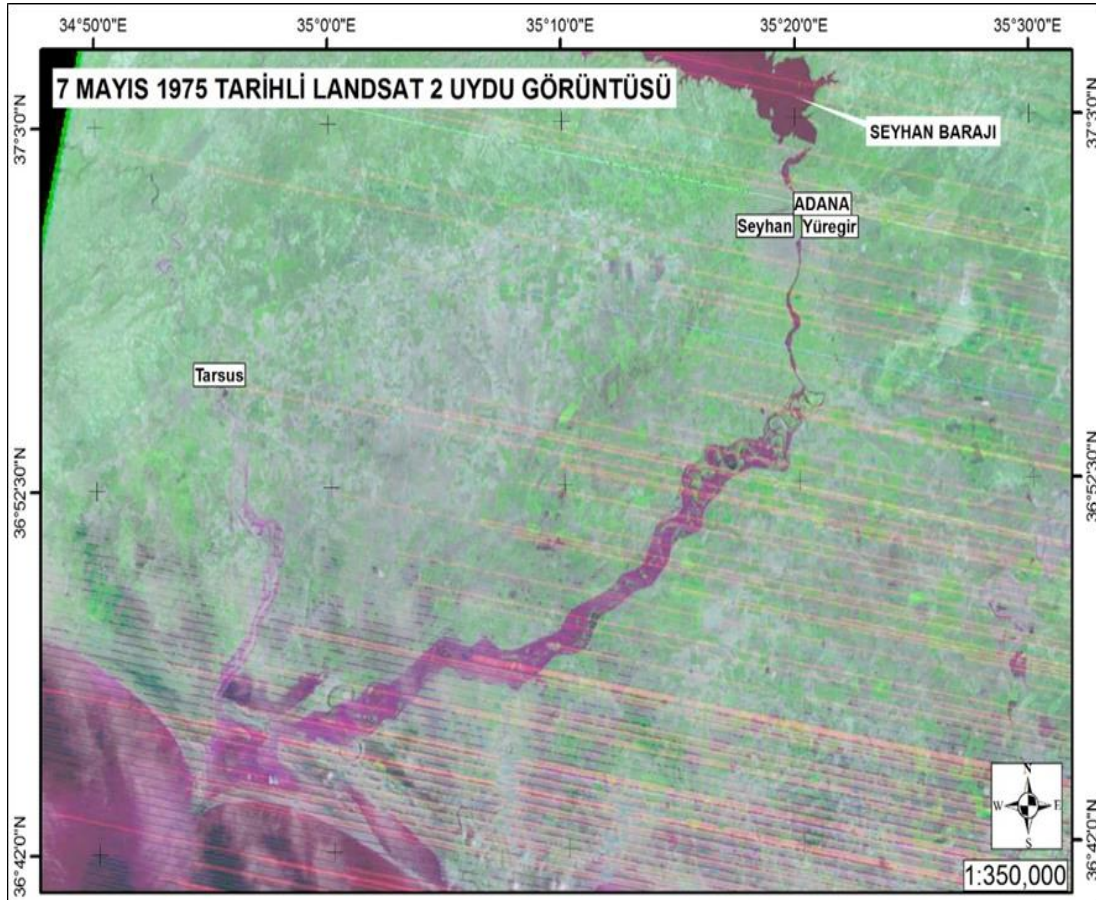
3 Bulgular ve tartışma

Seyhan nehrinde gerçekleşen taşkın olayları hakkında çeşitli araştırmalar yapılmıştır [14, 21, 37-38]. Özçırpıcı (1978), Seyhan Barajının işletmeye alınmasından sonra Aralık 1968 ile Mayıs 1975 tarihlerinde meydana gelen kritik taşkınlarda, alınan işletme önlemleri ile hem rezervuar hem de mansap seddelerinin fonksiyonlarını yerine getirdiğini belirtmiştir [37], ve taşkınlar en az zararla önlenebilmiştir. Bu bölgenin ilk Landsat görüntülerinden olan 7 Mayıs 1975 tarihli uydu görüntüsü taşkın olayının seddeler içerisinde kaldığını göstermektedir (Şekil 3).

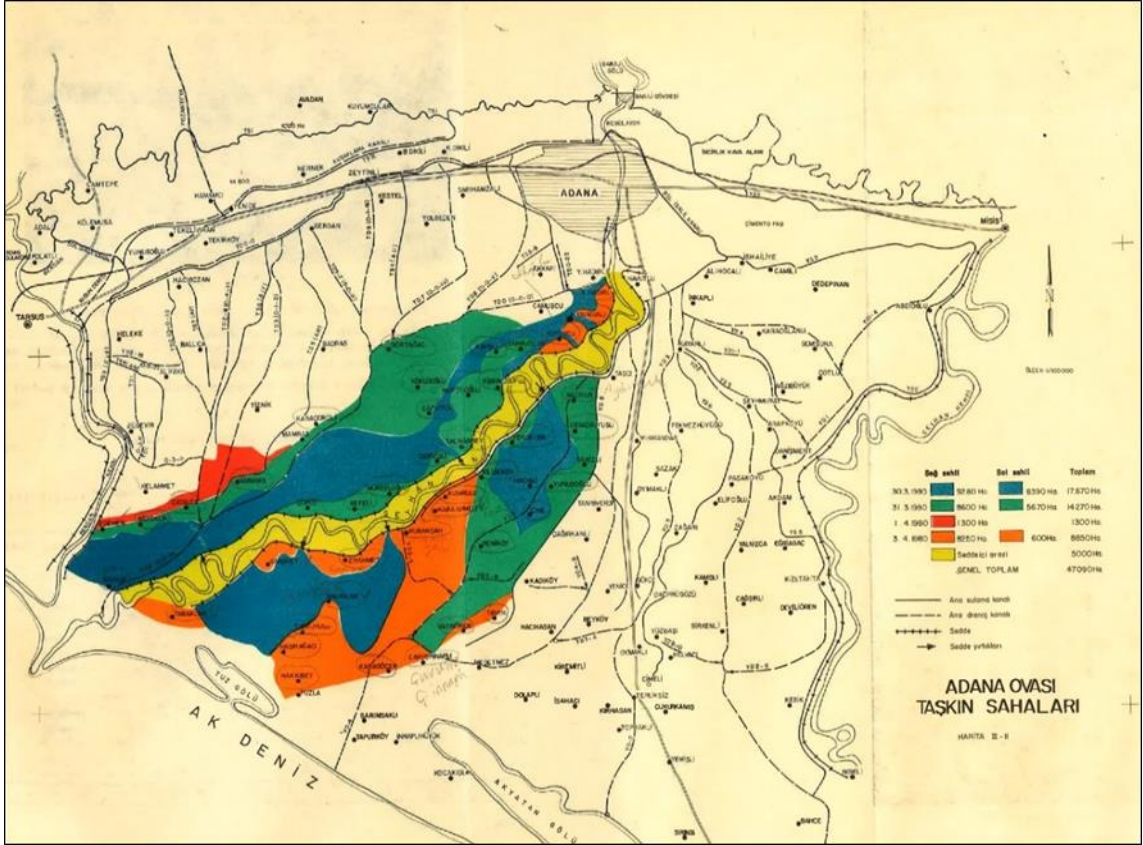
Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1980 yılında hazırlanan Seyhan Taşkın Raporunda 27 Mart-6 Nisan 1980 tarihleri arasında gerçekleşen Seyhan Nehri taşkın olayının belirtileri, taşkın günlük olarak izlenmesine dair yersel gözlemler ve ölçümler, taşkın olayında tarımsal alanlarda ve çevrede karşılaşılan zararlar, yüksek akış nedeniyle meydana gelen sedde yırtıkları, Adana İli ve çevresinde hasar durum değerlendirmeleri ve tespitleri ile teknik önlemler ve öneriler

detaylı olarak belirtilmektedir [39]. Seddelerde yırtıklar oluşması nedeniyle Seyhan sağ sahilde 19800 ha, Seyhan sol sahilde 22300 ha tarım alanının sular altında kaldığı, seddeler arasında bulunan sahanın eklenmesi ile bu değer 47000 ha olduğu belirtilerek, ayrıca konutlarda, karayolu ve demiryolunda önemli zararlar meydana geldiği rapor edilmiştir [39]. Seyhan Taşkın Raporunda, 1980 taşkınında gözlenmiş olan 6079 m³/s pik debinin 100 yıl tekerrürlü debiye yakın olduğu belirtilmiştir [39]. Söz konusu taşkın raporunda belirtilen taşkın sahaları Şekil 4'de verilmektedir.

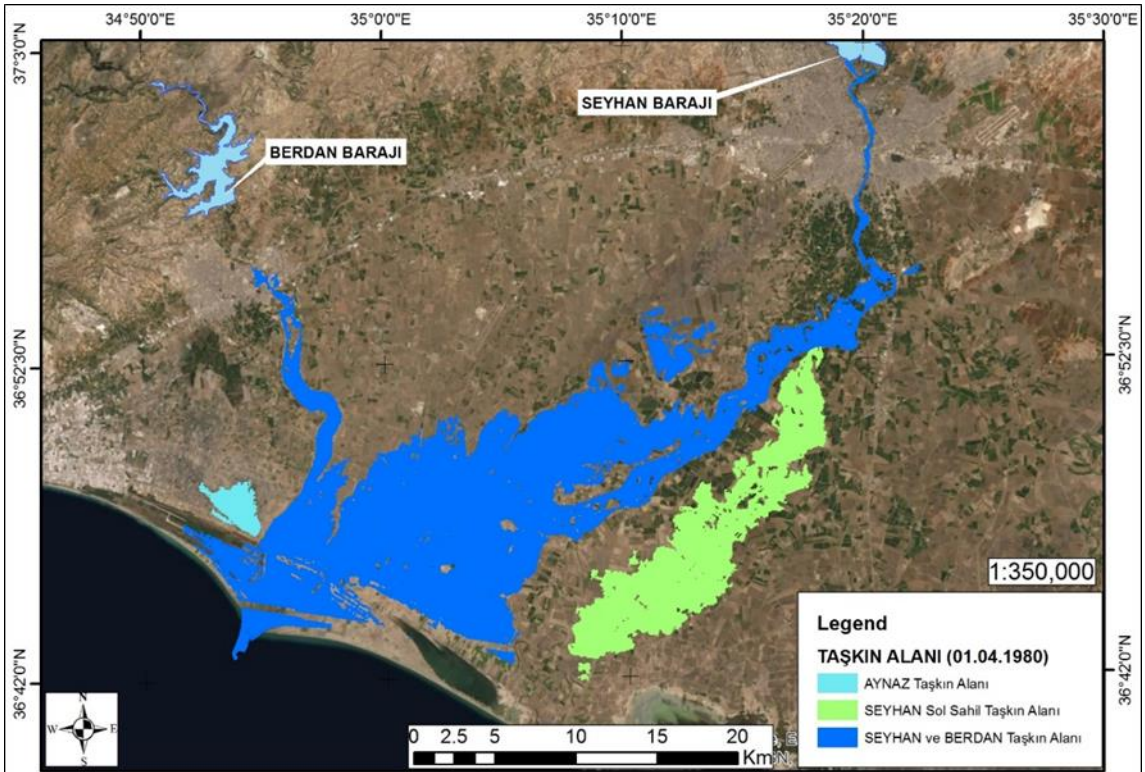
Tarihsel taşkınların gerçekleştiği dönemin koşulları ile değerlendirilmesi ve kayıt altına alınması, taşkınların oluşum süreçlerinin ve etkenlerin analizini kolaylaştırmaktadır. Yüzyıllar öncesinden gözle yapılan muayenelerin kişisel veya kurumsal belgelere aktarılması ile başlayan süreç, akım gözlem ağlarının ve rasatların oluşturulması ile hız kazanmıştır. Günümüzde ise yersel ölçümlerle ve etüdlerle incelenen taşkın kontrol ve yönetim çalışmalarının uydu tabanlı uzaktan algılama verileri ile analiz edilmesi imkanı doğmuştur. Landsat uydu verilerinin yakın bir tarihte 2008 yılında ücretsiz olarak halkın kullanımına sunulması ise, bu çalışmaya konu olan tarihsel taşkınların gerçekleştiği zamanda bu uydu görüntülerinin kullanılması olanağı bulunmadığından, bu çalışma ile konunun günümüzde değerlendirilerek uydu verilerinin taşkın yönetiminde katkıları üzerine yeni bir yaklaşım sunulması amaçlanmıştır.



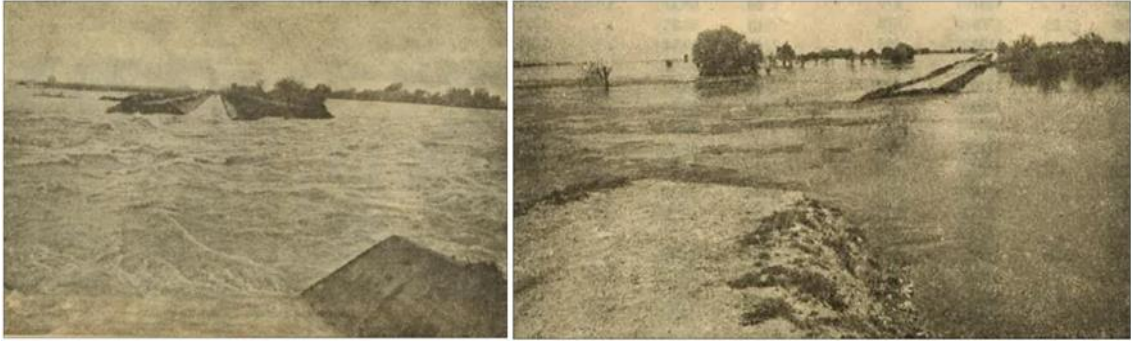
Şekil 3. 7 Mayıs 1975 tarihli uydu görüntüsü



Şekil 4. DSİ Seyhan taşkın raporunda yer alan taşkın sahaları gösterimi [39]



Şekil 5. 1980 Yılı Mart-Nisan Seyhan, Berdan, Nehirleri Taşkın Yayılım Alanları (Landsat 3)



Şekil 6. Seyhan sol ve sağ seddeden bir sedde yırtığı fotoğrafları [39]

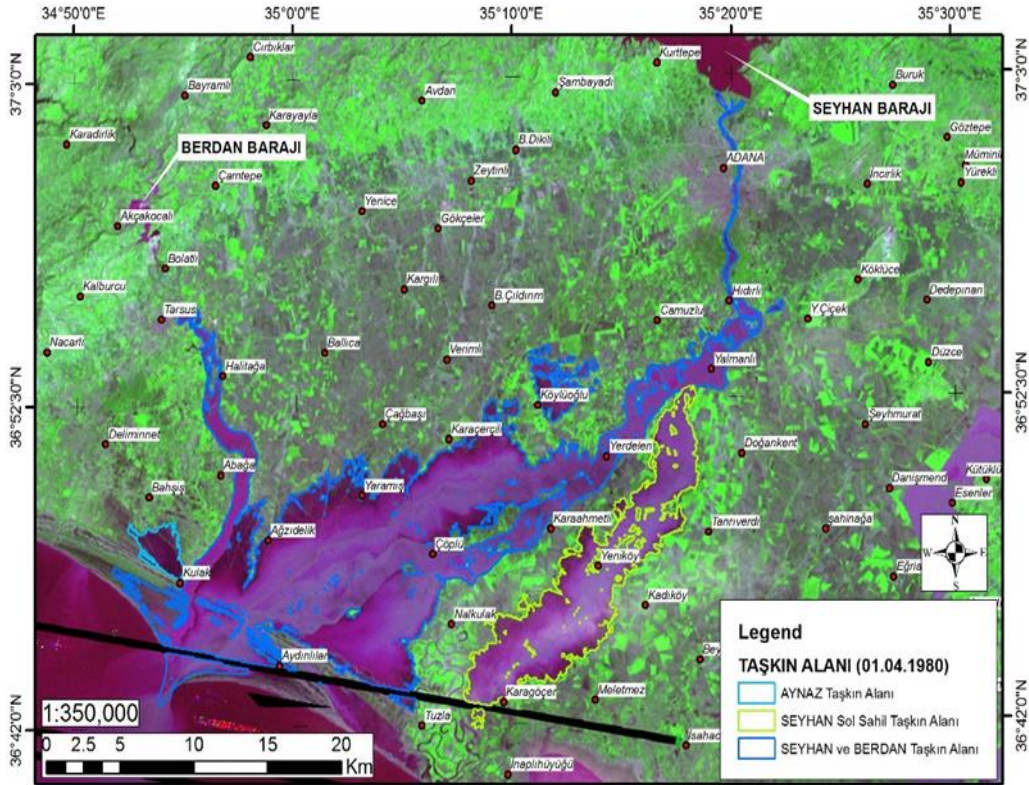
01.04.1980 tarihli Landsat 3 uydu görüntüsünün analizi ile, Seyhan-Berdan'da (Tarsus-Adana-Akdeniz arasında) 28235.6 ha, Aynaz'da 669.24 ha, Seyhan Nehri ile Sarımsaklı arasında kalan alanda 7876.8 ha alanın taşkın suları altında kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 5).

DSİ (1980) taşkın raporunda belirttiği üzere, taşkın olayında Seyhan sağ sedde üzerinde, km:24+000, km:40+000 ve km:43+000; Seyhan sol sedde üzerinde, km:16+600, km:40+000 ve km:47+000 kısımlarında yırtıklar meydana gelmiş ve tarım alanları sular altında kalmıştır. Seyhan sol ve sağ seddelerden sedde yırtığı fotoğrafları [39] Şekil 6'da verilmektedir.

1980 yılının Mart ve Nisan aylarında Seyhan Nehrinde gerçekleşen taşkın olayında Çukurova'daki tarımsal alanların taşkın suları altında kalmasının yanı sıra Adana

şehri içinde de bazı yerleşim alanları taşkın suları altında kalmıştır. Taşkın anında taşkın suları altında kalan alanlara fiziksel ulaşım imkanı olmadığından, 1980 yılı Seyhan nehri taşkın olayında, taşkın yayılım alanları sadece yersel ölçümlerle değerlendirilebilmiştir. Taşkın gerçeği tarihte uzaktan algılama verileri analiz sonuçlarına ulaşılamaması nedeniyle, yersel ölçümlerle belirlenen taşkın alanları uydu tabanlı verilerle belirlenen taşkın alanları ile uyumlu bulunamamıştır.

DSİ (1980) [39] taşkın raporunda önerilen, Çatalan Barajının inşaatı tamamlanarak 1997 yılında işletmeye alınmıştır; havzada taşkın erken uyarı sistemi kurulması ile ilgili planlama çalışmaları yapılmış ve taşkın risk değerlendirmeleri üzerine modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Taşkın suları altında kalan yerleşimler

01.04.1980 tarihli Landsat 3 uydu görüntüsünün analizi, Seyhan ve Berdan nehirlerinde meydana gelen taşkın olayındaki etkileşimin haritalanmasında olanak sağlamıştır. Bu esnada eski Aynaz bataklığı olarak bilinen ve Berdan ovasında bulunan Aynaz'da taşkın yayılım alanı da haritalanmıştır (Şekil 5). Bu alanda gerçekleşen taşkın olayları tarihsel değişimi Akgül (2018) 'de verilmektedir [13]. Güvel vd. (2022)'nin Berdan sulama sahasında taşkın yayılım alanını uydu tabanlı verilerle incelediği çalışmada, uzaktan algılama yaklaşımı ile taşkın yayılımının belirlenmesinde sağlanan kolaylıklar belirtilmiştir [40].

Bu çalışma kapsamında analiz edilen uydu görüntüsünün ait olduğu tarihte, taşkın olayının kısmen Tarsus ilçesi yerleşimini de etkilediği görülmektedir (Şekil 5). Taşkın suları altında kalan yerleşim yerlerinin Aynaz taşkın alanında Kulak, Seyhan sol sahil taşkın alanında Yeniköy, Karagöçer, Seyhan ve Berdan taşkın alanında ise Yalmanlı, Hıdırlı, Yerdelen, Köylüoğlu, Çöplü, Yaramış, Ağzıdelik, Aydınlılar, Halitağa olduğu uydu görüntülerinin analizi ile tespit edilmiş olup Şekil 7'de görülmektedir.

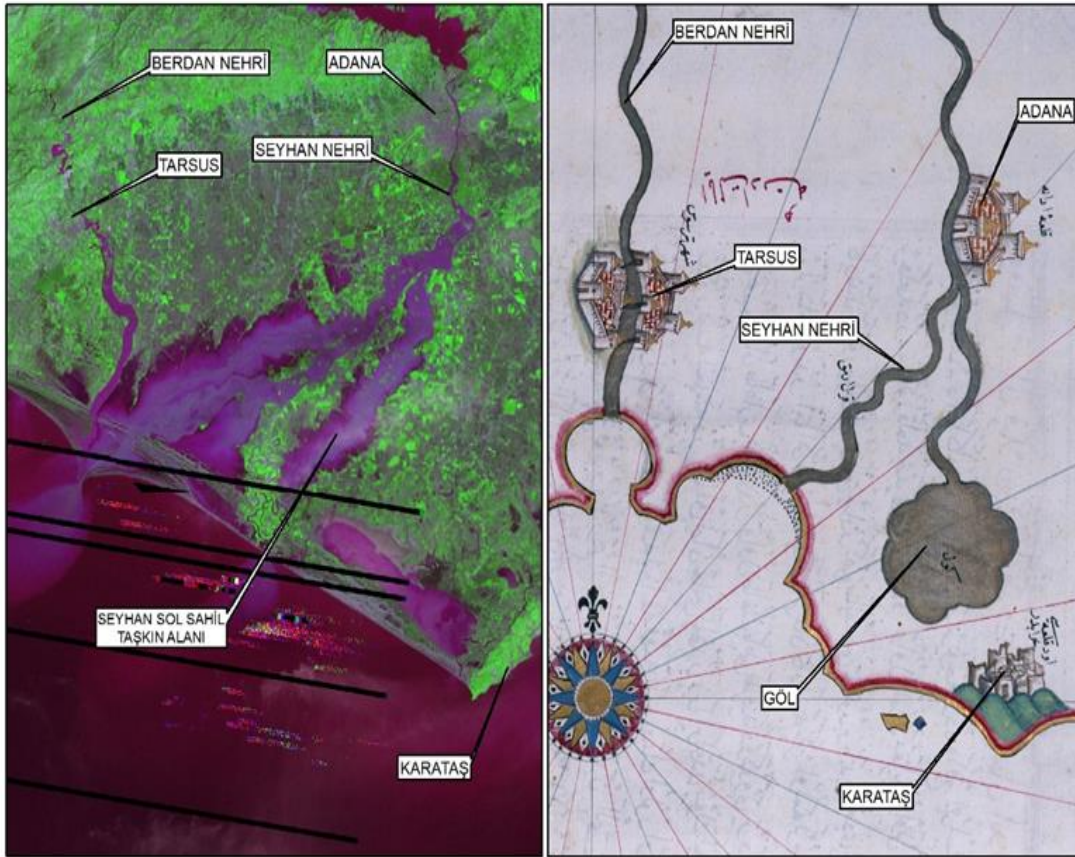
Adana İlinin güneyinde Seyhan nehrinin 1980 yılı taşkını esnasında iki kola ayrıldığı, ovanın topoğrafik yapısından ve arazi kotlarından kaynaklanan bu durumun tarımsal alanların taşkın suları altında kalmasına neden olduğu görülmektedir (Şekil 8). Tarihsel süreç incelendiğinde, Piri Reis'in Kitab-ı Bahriye (1525) [41] eserinde, Seyhan nehrinin şehir yerleşim

alanının güneyinde iki kolda taşkın yayılımına hassas olan ova kısmına doğru ilerlediği görülmektedir (Şekil 8).

4 Sonuçlar

Gelecekteki taşkın olayları için önlem alınabilmesi için öncelikle geçmişteki taşkınların anlaşılması ve karakteristiklerinin analizi yüksek öneme sahiptir. Belirlenen çalışma sahasının yanı sıra benzer taşkın sahalarında da taşkın risk değerlendirmeleri ve teknik önlemlerin alınabilmesi için bu çalışmanın katkı sağlaması beklenmektedir. Uydu tabanlı uzaktan algılama verileri, taşkın yayılım alanlarının hızlı bir süreçte incelenmesine olanak sağlamanın yanı sıra, nehir havzaları arasındaki etkileşimin tespit edilebilmesine, yersel gözlemlerde fiziksel ulaşım imkanları bulunmadığından belirlenemeyen taşkın yayılım alanlarının belirlenmesini de sağlamaktadır.

Taşkın yönetimi çalışmalarında, uydu tabanlı uzaktan algılama tekniği, taşkın sonrasında taşkın yayılım alanlarının ve taşkın hasarlarının tespitinde; taşkın anında bulutluluk durumuna rağmen kullanılabilen radar verileri ile ani durum değerlendirmesi yapılması ve arama kurtarma çalışmalarında; taşkın öncesinde ise taşkın risk haritalarının hazırlanması sürecinde bitki deseni, toprak cinsi, eğim, drenaj ağı, uydu bazlı meteorolojik verilerin analizi ve modelleme çalışmalarında kullanılabilir.



Şekil 8. Taşkın suları altında kalan alanlar: a. Landsat, b. Piri Reis (1525)

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] O. Böhm and K.-F. Wetzel, Flood history of the Danube tributaries Lech and Isar in the Alpine foreland of Germany, *Hydrological Sciences Journal*, 51:5, 784-798, 2006. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.5.784>
- [2] I. Olthof, S. Tolszczuk-Leclerc, Comparing Landsat and RADARSAT for Current and Historical Dynamic Flood Mapping, *Remote Sens.* 2018, 10, 780; 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10050780>
- [3] M. Barriendos, D. Coeur, M. Lang, M.C. Llasat, R. Naulet, F. Lemaitre, A. Barrera, Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 583–592, 2003.
- [4] R. Glaser, H. Stangl, Historical floods in the Dutch Rhine Delta, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 605–613, 2003. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-605-2003>
- [5] F. Yu, Z. Chen, X. Ren, G. Yang, Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: Characteristics and explanations, *Geomorphology* 113, 210–216, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.008>.
- [6] M. Polemio, O. Petrucci, The occurrence of floods and the role of climate variations from 1880 in Calabria (Southern Italy), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 129–142, 2012. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-129-2012>.
- [7] J. Herget, T. Roggenkamp, M. Krell, Estimation of peak discharges of historical floods, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4029–4037, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4029-2014>
- [8] G. Romanescu, C.I. Cimpianu, A. Mişu-Pintilie, C.C. Stoleriu, Historic flood events in NE Romania (post-1990), *Journal of Maps*, 13(2), 787-798, 2017. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1383944>
- [9] C. Clark, A 249-Year Record of Floods at Appleby in Westmorland, UK, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8, 1-17, 2020. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.812001>
- [10] D. Archer, H. Fowler, A historical flash flood chronology for Britain. *J Flood Risk Management*. 2021;14:e12721,2021. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12721>
- [11] E. Opolot, Application of remote sensing and geographical information systems in flood management: A Review, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 6(10): 1884-1894, 2013.
- [12] Munasinghe, Dinuke, Sagy Cohen, Yu-Fen Huang, Yin-Phan Tsang, Jiaqi Zhang, and Zheng Fang, Intercomparison of satellite remote sensing-based flood inundation mapping techniques. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 54 (4): 834–846, 2018. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12626>.
- [13] M.A. Akgül, Sentetik Açıklıklı Radar verilerinin Taşkın Çalışmalarında Kullanılması: Berdan Ovası Taşkını, *Geomatik Dergisi*, 3(2);154-162, 2018. <https://doi.org/10.29128/geomatik.378123>.
- [14] M.A. Akgül, M. Çetin, Tarımsal Drenaj Alanlarında Meydana Gelen Taşkınlar ve Etki Alanlarının Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi: Aşağı Seyhan Ovası Alt Havzasında Örnek Bir Çalışma, 10, Ulusal Hidroloji Kongresi, Muğla, 9-12 Ekim 2019.
- [15] C. Ticehurst, D. Dutta, J. Vaze, A comparison of Landsat and MODIS flood inundation maps for hydrodynamic modelling in the Murray Darling Basin, 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia, 29 Nov to 4 Dec 2015.
- [16] İ. Hazır, M.A. Akgül, M. Alkaya, M. Dağdeviren, 27 Ocak-14 Mart 2012 Tarihleri Arasında Hatay İli Amik Ovasında Meydana Gelen Taşkınların Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanılarak Değerlendirilmesi, 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu Tebliğler Kitabı, 55-66, 23-25, Rize, Kasım 2016.
- [17] B M Sukojo ve F Alfiansyah, Flood Disaster Analysis Using Landsat-8 and SPOT-6 Imagery for Determination of Flooded Areas in Sampang, Madura, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 98 012021, 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/98/1/012021>
- [18] H. Mehmood, C. Conway, D. Perera, Mapping of Flood Areas Using Landsat with Google Earth Engine Cloud Platform, *Atmosphere* 2021, 12, 866. <https://doi.org/10.3390/atmos12070866>.
- [19] Alick R Mwanza, Edwin Nyirenda, and Wilma Nchito, Determination of the lukanga swamps flood boundary using landsat imagery, rainfall and water level data. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 7(5), 237-244, 2019. <https://doi.org/10.12691/jgg-7-5-3>
- [20] M. Ma, C. Liu, G. Zhao, H. Xie, P. Jia, D. Wang, H. Wang, Y. Hong, Flash Flood Risk Analysis Based on Machine Learning Techniques in the Yunnan Province, China, *Remote Sens.* 2019, 11, 170; 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11020170>
- [21] E. Çanak, Cumhuriyet Döneminde Adana (Seyhan)'da Meydana Gelen Seller ve Alınan Önlemler (1930-1956), *Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(1), Mart 2015.
- [22] A. B. Charrua, R. Padmanaban, P. Cabral, S. Bandeira, M. M. Romeiras, Impacts of the Tropical Cyclone Idai in Mozambique: A Multi-Temporal Landsat Satellite Imagery Analysis, *Remote Sens.*, 13, 201. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13020201>.
- [23] P. S. Frasier, K. J. Page, Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(12), 1461-1467, December 2000
- [24] N. R. Mukherjee, C. Samuel, Assessment of the Temporal Variations of Surface Water Bodies in and around Chennai using Landsat Imagery, *Indian Journal*

- of Science and Technology, 9(18), May 2016. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i18/92089>
- [25] S. Tarigan., Land cover change and its impact on flooding frequency of Batanghari Watershed, Jambi Province, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences* 33, 386 – 392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.089>
- [26] NASA, https://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html; (erişim tarihi: 05.01.2022).
- [27] NASA, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1-3> (erişim tarihi: 01.09.2021).
- [28] ESA, <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-1-3> (erişim tarihi: 01.09.2021)
- [29] USGS, https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-3?qt=science_support_page_related_con=0#qt=science_support_page_related_con (erişim tarihi: 10.01.2022)
- [30] S. McFeeters, The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432, 1996. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- [31] L. Ji, L., Zhang, B. Wylie, Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317, November 2009.
- [32] I. Ogashawara, M.P. Curtarelli, C.M. Ferreira, The use of optical remote sensing for mapping flooded areas, *Int. Journal of Engineering Research and Application*, ISSN:2248-9622, 3(5), Sep-Oct, 956-1960, 2013
- [33] P.D. Dao, Y. Liou, Object-Based Flood Mapping and Affected Rice Field Estimation with Landsat 8 OLI and MODIS Data, *Remote Sens.* 7, 5077-5097;2015. <https://doi.org/10.3390/rs70505077>.
- [34] T. Bangira, S.M. Alfieri, M. Menenti, A. van Niekerk, Z. Vekerdy, A Spectral unmixing method with ensemble estimation of endmembers: Application to Flood Mapping in the Caprivi Floodplain, *Remote Sens.* 9, 1013, 2017. <https://doi.org/10.3390/rs9101013>
- [35] M. Çoşlu, N. K. Sönmez, Aşırı Yağışlar Sonucu Zarar Gören Alanların Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) Görüntüleri ile Tespit Edilmesi, III. International Eurasian Agriculture and Natural Sciences Congress, Turkey, Book of Full-Text, 17-20 October 2019.
- [36] R. Sivanpillai, K. M. Jacobs, C. M., Mattilio, E.V. Piskorski, Rapid flood inundation mapping by differencing water indices from pre- and post-flood Landsat images, *Front. Earth Sci.* 2021, 15(1): 1–11, <https://doi.org/10.1007/s11707-020-0818-0>.
- [37] N. Özçırpıcı, Seyhan Barajı 1975 Yılı Feyezanı, *DSİ Teknik Bülteni*, , sayı:43, Haziran 1978.
- [38] S. Babagiray, K. Kalkan, Yağışların tarım alanlarında sebep olduğu göllenmelerin Sentinel-1 uydu görüntüleri ile analizi, *Jeodezi ve JeoInformasyon Dergisi*, , 8(2):145-160, 2021. <https://doi.org/10.9733/JGG.2021R0011.T>
- [39] DSİ (1980), Seyhan Taşkın Raporu (27 Mart 1980-6 Nisan 1980), Ankara, 1980.
- [40] Ş. P. Güvel, M. A. Akgül, H. Aksu, Flood inundation maps using Sentinel-2: a case study in Berdan Plain, *Water Supply*, 2022. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.039>
- [41] Piri Reis (1525). *Kitab-ı Bahriye*.





Hiperstatik aksenal yüklü viskoelastik çubukların analizi için yeni enerji fonksiyoneli

New energy functional for analysis of statically indeterminate axially loaded viscoelastic bars

Gülçin Tekin^{1,*} , Fethi Kadioğlu² 

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul, Türkiye

Öz

Elastik cisimlerde gerilme sadece şekil değiştirmenin bir fonksiyonudur, viskoelastik cisimlerde ise gerilme hem şekil değiştirmeye hem de şekil değiştirme hızına bağlıdır. Maddesel sabitleri farklı olan yayların ve sönüm kutularının çeşitli kombinasyonları yapılarak, yüksek polimerler, naylon lifler, beton vb. malzemelerin mekanik davranışlarını temsil etme olanağı vardır. Maxwell modeli kullanılarak mekanik davranışı temsil edilen statikçe belirsiz aksenal yüklü çubuk probleminin ele alındığı bu çalışmada, toplam potansiyel enerji (TPE) teoremi kullanılarak en karmaşık yapı sistemlerine bile kolaylıkla uygulanabilecek bir çözüm yolu önerilmiştir. Düğüm noktalarının yer değiştirmeleri cinsinden bulunan TPE ifadesi Laplace uzayında elde edilmiştir. TPE ifadesini minimum yapan çözümler gerçek yer değiştirmeler olup, Laplace uzayında elde edilen çözümlerden zaman uzayına geçmek için Ters Laplace dönüşümü yöntemi uygulanmıştır. Yöntem örnek problem üzerinde test edilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Bu yöntem, viskoelastik malzeme modelinin, sistemi oluşturan eleman sayısının ve yükleme tipinin değişmesinden bağımsız olarak birkaç basit işlem adımının takibi ile doğrudan çözüme ulaşmada büyük kolaylık sağlar.

Anahtar kelimeler: Hiperstatik sistemler, Viskoelastik, Toplam potansiyel enerji, Laplace dönüşümü, Ters laplace dönüşümü

1 Giriş

Mühendislik yapıları daha çeşitli ve karmaşık hale geldikçe, mühendisin klasik yapısal analiz yöntemlerini uygulamada başarılı olması yeterli olmayacaktır. Mühendisler, temel teşkil eden teorilerin sınırlarının farkında olmalıdırlar ve temel kabullerin geçerliliği hakkında akıllı kararlar verebilmelidirler.

Teoride, yapının herhangi bir noktasında yer değiştirme vektörünü ve gerilme vektörünü elde etmek için probleme ait diferansiyel denklemleri integre etmek ve uygun sınır koşullarını sağlamak mümkündür. Ancak pratikte integrasyonu analitik olarak gerçekleştirmek neredeyse çoğu zaman imkânsız bir iştir. Bu 'vektörel' yaklaşıma bir diğer alternatif yöntem 'skaler' büyüklükler olan *iş* ve *enerjinin*

Abstract

In elastic bodies, stress is only a function of strain, while in viscoelastic bodies, stress depends on both strain and strain rate. By making various combinations of springs and dashpots with different material constants, it is possible to represent the mechanical behavior of materials such as high polymers, nylon fibers, concrete etc. In this study, which discusses the statically indeterminate axially loaded bar problem, whose mechanical behavior is represented using the Maxwell model, a solution technique that can be easily applied to even the most complex structural systems is proposed by using the total potential energy (TPE) theorem. The TPE expression in terms of the displacement of the nodes is obtained in the Laplace space. The solutions that minimize the TPE expression are the real displacements, and the Inverse Laplace transform method is applied to return to the time domain. The method has been tested on the sample problem and the results are presented. This method provides great convenience in obtaining the solution directly by following a few simple process steps, regardless of the change in the viscoelastic material model, the number of elements of the system and the type of loading.

Keywords: Statically indeterminate systems, Viscoelastic, Total potential energy, Laplace transform, Inverse Laplace transform

dikkate alınması ile geliştirilebilir. Oldukça iyi bilinen, biri yer değiştirmeler cinsinden, diğeri kuvvetler cinsinden ifade edilen iki eşlenik enerji yöntemini ele alalım. Doğrudan denge denklemlerinden ve şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkilerinden gelen sırasıyla *virtüel iş* ve *tamamlayıcı virtüel iş* ilkeleri yer değiştirme ve kuvvet formülasyonlarının temelini oluşturur. *Minimum potansiyel enerji* ilkesi dâhil olmak üzere birçok önemli enerji teoremi, *virtüel* (sanal) *iş* kavramlarından türetilmiştir. Bu çalışmanın temel esası, statikçe belirsiz (hiperstatik) viskoelastik çubuk problemlerinin analizi için *iş* ve enerji yöntemlerinin temeli olan *virtüel iş* ilkesinden yola çıkılarak, *toplam potansiyel enerji* fonksiyonelinin geliştirilmesi ve çeşitli uygulamaları üzerinedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gulcint@yildiz.edu.tr (G. Tekin)

Geliş / Recieved: 10.10.2022 Kabul / Accepted: 07.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1187163

Mühendislik yapıları çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma geometrik konfigürasyon ve yapının yüklemeye özelliklerinin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. Geometrik açıdan en basit yapı bir çubuktur. Yüklemenin çekme veya basınç, burulma veya eğilme olmasına bağlı olarak, doğru eksenli bir çubuk genellikle sırasıyla çubuk, kolon, şaft veya kiriş olarak adlandırılır.

Gerilme-şekil değiştirme eğrisi bilinen bir malzemeden üretilmiş bir yapıyı analiz etmek için, gerilme-şekil değiştirme verilerinin matematiksel olarak ifade edilmesi gereklidir. Bunu yaparken, mümkün olduğu kadar basit, ancak yeterince doğru sonuçlar verecek olan bir matematiksel model seçmek istenilir. En basit ve en yaygın idealleştirme, 'doğrusal elastik' davranış türüdür. Hiçbir gerçek malzeme aslında doğrusal olarak 'elastik' olmasa da, karşılaşılan deformasyonların nispeten küçük olması koşuluyla neredeyse tüm malzemeler için 'doğrusal' bir ilişki yaklaşık olarak geçerlidir.

Elastik katılar ve viskoz akışkanlar, yüklere tepkisi neredeyse herkes tarafından anlaşılan iki tür mühendislik malzemesidir. Yüklere tepkisi hem elastik katıların hem de viskoz akışkanların özelliklerini birleştiren malzemelere viskoelastik malzemeler denir ve anlaşılması elastik katılardan veya viskoz sıvılardan biraz daha zordur. Yeni geliştirilen malzemelerin çoğu, elastik ve viskoz davranış kapsamı dışında kalan mekanik tepki özellikleri sergiler, bu nedenle daha genel bir teoriye duyulan ihtiyaç oldukça belirgindir. Bu tür malzemelerin davranışını tanımlamak için geliştirilen mühendislik disiplinine *viskoelastisite* denir. Yüksek sıcaklıklardaki metaller, beton ve polimerler viskoelastik davranışın bazı örnekleridir. Viskoelastik malzemenin en belirgin özelliği zamana bağlı bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisine sahip olmalarıdır ve hafızalı malzemeler olarak bilinirler. Lineer elastik bir malzemede gerilme-şekil değiştirme eğrisi elastisite modülü ile orantılı bir eğime sahip düz bir çizgi iken, lineer viskoelastik bir malzeme, eğrisel bir gerilme-şekil değiştirme grafiğine sahiptir. Viskoelastik malzemelerdeki en temel olaylar; Sünme: gerilme sabit tutulursa, şekil değiştirme zamanla artar (Creep) ve Gevşeme: şekil değiştirme sabit tutulursa, gerilme zamanla azalır (Relaxation).

Viskoelastisite problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için, sayısal yöntemler sıklıkla kullanılır. Özellikle sonlu elemanlar yöntemi birçok araştırmacı tarafından viskoelastik kirişlerin analizinde başarıyla kullanılmıştır. Chen [1] çalışmasında lineer viskoelastik kirişin yarı-statik ve dinamik analizi için hibrit Laplace dönüşümü ve sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Analizde Timoshenko kiriş teorisi ve geleneksel kiriş teorisi kullanılmış, viskoelastik malzeme modeli olarak Maxwell akışkan ve üç parametrelili katı tipi modeller analiz edilmiştir. Sıcaklık alanının sabit ve homojen olduğu gevşeme modülünün Prony serisi formunda olduğu kabul edilmiştir. Laplace uzayında elde edilen çözümler Honig ve Hirdes [2] tarafından önerilen sayısal ters Laplace dönüşüm yöntemi ile gerçek uzaya dönüştürülmüştür. Mehl ve Miles [3] çalışmalarında viskoelastik malzeme içeren kiriş sisteminin geçici tepki analizi (transient response analysis) için çok serbestlik dereceli sonlu eleman modeli sunmuşlardır. Frekans

uzayında çözülen yönetici denklemler, ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform) ile zaman uzayına çevrilmiştir. Viskoelastik malzemenin özelliklerini temsil etmek için karmaşık, frekans ve sıcaklığa bağlı kesme modülü kullanılmıştır. Aköz ve Kadioğlu [4] lineer viskoelastik Timoshenko ve Euler-Bernoulli kirişlerinin yarı-statik ve dinamik analizini hibrit Laplace-Carson ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Gâteaux diferansiyel yöntemini kullanarak Laplace-Carson uzayında viskoelastik Timoshenko ve Euler-Bernoulli kirişleri için iki yeni fonksiyonel elde etmişlerdir. Ters dönüşüm için Schapery ve Fourier yöntemlerini kullanmışlardır. Barbosa ve Farange [5] çalışmalarında sandviç viskoelastik kirişler için sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Laplace uzayındaki hareket denklemlerinin ikinci mertebeden zaman uzayındaki realizasyonuna dayanan Golla-Hughes yöntemi (GHM) kullanılmıştır. Viskoelastik malzemenin tanımlanmasında kullanılan GHM parametreleri deneysel olarak belirlenmiştir. Önerilen sonlu eleman modelinin performansı, sayısal sonuçlar ve deneysel karşılıkları arasında yapılan kıyaslamalarla değerlendirilmiştir. Pálfalvi [6] çalışmasında viskoelastik kirişlerin dinamik analizi için sonlu eleman formülasyonlarını karşılaştırmıştır. Lineer viskoelastik malzemeden yapılmış bir konsol kirişin doğal titreşim frekansı ve ilgili sönüm oranları hesaplanmıştır. Viskoelastik malzeme modeli olarak genelleştirilmiş Maxwell modeli kullanılmıştır. Modelin tanımı için düğüm ve eleman tabanlı viskoelastik değişkenleri kullanan yaklaşımlar ele alınmıştır. Düğüm noktası tabanlı yaklaşım için Enelund ve Lesieutre [7] tarafından önerilen Anelastic Displacement Field (ADF) modeli orijinal haliyle ve değiştirilmiş sınır koşullarıyla birlikte kullanılırken, eleman bazlı yaklaşım için ADF modeli eleman serbestlik dereceleri esas alınarak uygulanmıştır. Ele alınan modellerin sonuçları birbirleriyle ve MARC ticari sonlu eleman kodundan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Kpeky vd. [8] çalışmalarında viskoelastik sandviç kirişlerin serbest titreşim analizi için katı-kabuk (solid-shell) sonlu elemanlar yöntemini geliştirmişlerdir. Farklı sonlu eleman ayrıştırılmalarını kullanarak problemin genel formülasyonunu sunmuşlar ve bunlarla ilgili kısıtlara değinmişlerdir. Huang vd. [9], iki elastik tabaka arasında sıkıştırılmış viskoelastik malzeme çekirdekli sandviç kirişin titreşim analizi için birinci dereceden kayma deformasyon teorisi ve Hamilton ilkesine dayalı, genel bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Sonlu eleman denkleminde, katmanlar arasında göreceli kayma olmadığı varsayılmış ve eylemsizlik momentinin etkisi dikkate alınmamıştır. Önerilen sonlu eleman modeli kullanılarak ilk üç titreşim modunda viskoelastik sandviç konsol kiriş üzerinde deneysel testler yapılmış ve sonuçların sayısal sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir. Filippi ve Carrera [10] çalışmalarında düşük ve yüksek dereceli tek boyutlu sonlu elemanlara sahip viskoelastik üç boyutlu kiriş benzeri yapıların gerilme analizlerini ele almışlardır. Yönetici denklemlerin elde edilmesinde Hamilton ilkesi kullanılmıştır ve denklemler Laplace uzayında çözülmüştür. Laplace uzayında elde edilen sonuçların sayısal olarak ters çevrilmesiyle yer değiştirme ve

gerilmelerin zamanla değişimi elde edilmiştir. Çalışmada çeşitli sınır koşulları ve yükleme durumlarına maruz kalan farklı yapılar incelenmiştir. Ayrıca, son yıllarda eksenel yüklü viskoelastik kirişlerin [11-19], viskoelastik plak ve kabuk gibi yapı elemanlarının [20-24] titreşim ve stabilite analizi pek çok araştırmacının ilgisini çekmiş ve çözüm için farklı yöntemler kullanılmıştır.

Viskoelastik kiriş problemleriyle ilgili yukarıda bahsedilen çalışmalar dikkate alındığında, mevcut çalışmanın yürütülmesine sebep olan en önemli etken, yaklaşık analiz yöntemlerinin temeli olan iş ve enerji ilkelerini kullanan çalışmalarla ilgili literatürün nispeten sınırlı olmasıdır. İş ve enerji yöntemlerinin geliştirilmesi ve çeşitli elastik yapı elemanları için uygulamaları üzerine birçok kapsamlı araştırma yapılmış olmasına rağmen, malzemenin viskoelastik özellikleri dikkate alınarak yapılmış çalışmalara az rastlanmaktadır. Yazarların bilgisi dâhilinde, statikçe belirsiz viskoelastik çubukların davranışı ilk kez bu araştırma kapsamında enerji esaslı yöntem ile incelenmiştir.

Bu çalışmada, statikçe belirsiz eksenel yüklü viskoelastik çubuk probleminin analizi yapılmıştır. Viskoelastik davranışı tanımlamak için Maxwell modeli kullanılmıştır. Laplace dönüşümünün temel bazı özellikleri kullanılarak, eksenel yüklü hiperstatik viskoelastik çubukların analizi için Laplace uzayında yeni enerji fonksiyoneli elde edilmiştir. Toplam potansiyel enerji ilkesi ile Laplace uzayında elde edilen çözümlerden, gerçek zaman uzayındaki çözümlere geçmek için ters Laplace dönüşümü uygulanmıştır. Sunulan enerji esaslı formülasyon sayısal uygulama ile doğrulanmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yöntem geniş bir uygulama alanına sahip olacak ve çeşitli viskoelastik yapı elemanlarının (iki veya daha fazla çubuktan oluşan ve eğilme, kesme ve eksenel yüklere maruz kalan çerçeve tipi yapılar, düzlem veya uzay kafes sistemler vb.) analizi için rahatlıkla uyarlanabilecektir. Yazar ve çalışma arkadaşlarının bu yöndeki çalışmaları hızla devam etmektedir.

2 Metodoloji

Lineer viskoelastisite, lineer yaylar ve sönüm kutularından oluşturulan mekanik modeller aracılığıyla ifade edilebilir. Bu modeller adi diferansiyel denklemler olan kurucu ilişkiler üretir. Viskoelastik malzemelerde herhangi bir 't' zamanındaki tepki, tüm önceki zamanlarda uygulanan uyarılara verilen tepkilerin toplamıdır. Bu nedenle toplama işlemi olan *integraller* de kurucu ilişkileri üretmek için kullanılabilir. Bu integral yaklaşımı viskoelastik teori için bir başlangıç noktası olarak kullanılır ve lineer viskoelastik tepkinin "*Boltzmann Süperpozisyon İntegrali (Boltzmann Superposition Integral)*" ifadesi bu tanımdan ortaya çıkar.

Boltzmann ilkesine göre, her bir artırımlı yüke tepki, diğer artırımlı yüklerden kaynaklanan tepkilerden bağımsızdır ve artırımlı adım yükleri serisi aracılığıyla idealleştirilen tüm yük geçmişine yanıt, bireysel yanıtların toplamına eşittir.

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^N \Delta\sigma_i(t) = \sum_{i=1}^N M(t-t_i)\Delta\varepsilon_i \quad t \geq t_i \quad (1)$$

Denklem (1)'de M fonksiyonu gevşeme modülüdür (Relaxation Modulus). Benzer bir ilişki şekil değiştirme için aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^N \Delta\varepsilon_i(t) = \sum_{i=1}^N C(t-t_i)\Delta\sigma_i \quad t \geq t_i \quad (2)$$

Denklem (2)'de C fonksiyonu sünme uyumu (Creep Compliance) olarak isimlendirilir. Denklem (1) ve (2) alternatif olarak sırasıyla,

$$\sigma(t) = \int_0^t M(t-\tau) \frac{\partial\varepsilon(\tau)}{\partial\tau} d\tau \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t C(t-\tau) \frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau} d\tau \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4) şeklinde ifade edilebilir. Burada τ , t 'den küçük veya ona eşit olan bir zaman değişkenidir. Lineer viskoelastik kurucu denklemler konvolüsyon integrallerine (convolution integral) karşılık geldiğinden, bunları cebirsel denklemlere dönüştürmek için Laplace dönüşümü uygulanabilir. Verilen bir $f(t)$ fonksiyonunun Laplace dönüşümü matematiksel olarak Denklem (5)'te verilmiştir.

$$\mathcal{L}(f(t)) \equiv \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (5)$$

Viskoelastik bünye denklemleri konvolüsyon integrali ile

$$\sigma(t) = M(t-\tau) * d\varepsilon(\tau) \quad (6)$$

$$\varepsilon(t) = C(t-\tau) * d\sigma(\tau) \quad (7)$$

Denklem (6) ve (7) şeklinde ve cebirsel denklemler

$$\bar{\sigma}(s) = s\bar{M}(s)\bar{\varepsilon}(s) \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}(s) = s\bar{C}(s)\bar{\sigma}(s) \quad (9)$$

Denklem (8) ve (9) şeklinde verilebilir.

Başlangıçta gerilmemiş bir yapı, yük sistemine maruz kaldığında meydana gelen deformasyon termodinamiğin birinci yasası tarafından en genel halde,

$$W_E + Q = \Delta E \quad (10)$$

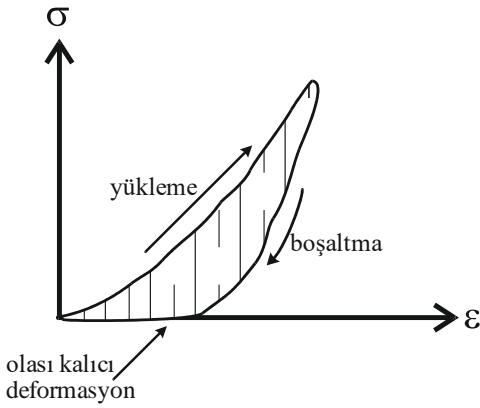
Denklem (10) ile verilir. Burada ΔE yükleme sonucunda yapıda meydana gelen enerji değişimi, Q ise yapının çevresinden emdiği ısıdır. Burada deformasyon sürecinin adyabatik (ısı değişimsiz) olduğu varsayımı ile $Q=0$ olacaktır.

Genel olarak elastik bir yapının enerjisindeki değişim, kinetik enerjideki bir değişim ile iç enerjideki bir değişimden oluşur. Yüklerin çok yavaş uygulandığını ve tüm süreç boyunca denge durumunun korunduğunu varsayarsak, bu durumda kinetik enerji sıfırdır ve enerjideki değişiklik sadece, iç enerjideki bir değişikliği ifade eder. Bu kabuller altında, enerjinin korunumu ifadesi

$$W_E = U \quad (11)$$

Denklem (11) şekline indirgenir. Burada W_E dış kuvvetler tarafından yapılan iş, U ise iç kuvvetler tarafından yapılan iştir. Bu durumda uygulanan yüklerin yaptığı mekanik iş, iç enerjideki değişime eşittir. Bir başka deyişle iş, deforme olmuş yapıda enerji biçiminde depolanmış olarak kabul edilebilir. Bu depolanmış enerjiye şekil değiştirme enerjisi (strain energy) denir.

Bilindiği gibi elastik malzemeler enerji kaybı olmaksızın mekanik enerjisi depolama kapasitesine sahiptirler. Diğer yandan, Newton tipi viskoz bir sıvı, enerjisi dağıtma kapasitesini tarif eder ve bu malzemelerin enerji depolama kapasiteleri yoktur. Viskoelastik malzemeler ise mekanik enerjisi hem depolama hem de dağıtma kapasitesine sahiptir. Bu dağıtma, histerezis (hysteresis) olarak da bilinir. Bir viskoelastik malzemenin tipik tepkisi; yüklem-boşaltma eğrileri çakışmaz ve bir histerezis döngüsü oluşturur. Tam yük boşaltmada, kalıcı deformasyon olabilir veya olmayabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Viskoelastik malzeme için gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Tanım olarak şekil değiştirme enerjisi

$$dU_N = \sigma d\varepsilon \quad (12)$$

Denklem (12) ilişkisi ile verilebilir. Bu bağıntıda σ , cismin bir noktasına etkiyen gerilme değerini, ε ise o noktada yaratılan şekil değiştirmeyi verecektir. N alt indisi ise enerjinin cismin bir noktasında hesaplandığını gösterir. Bu noktada şekil değiştirme ε_0 değerine ulaştığında biriken iç enerji

$$U_N = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma d\varepsilon \quad (13)$$

Denklem (13) şeklinde hesaplanır. Bir noktada tanımlanan U_N iç enerjisi, çubuk hacminde integre edilirse

$$U = \int_V U_N dV \quad (14)$$

Denklem (14) şeklinde iç enerji bağıntısı elde edilir. Bu integralin hesaplanabilmesi için cisme ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin bilinmesi gerekir. Birim hacme düşen şekil değiştirme enerjisi (şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu) viskoelastik malzeme için Gutierrez-Lemini [25] tarafından

$$U_v = \frac{1}{2} \int_{\tau=0}^t \left[\int_{s=0}^t M(s-\tau) \frac{d\varepsilon(s)}{ds} ds \right] \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (15)$$

Denklem (15) şeklinde verilir.

Deformasyonu oluşturan dış yükler sisteminin yaptığı iş için genel tanım olarak, x 'in bir fonksiyonu olan değişken $F(x)$ kuvvetinin yaptığı iş, kuvvet eğrisinin altında kalan alandır şeklinde Denklem (16) ile verilir. $F(x)$ ile gösterilen yük sadece tekil kuvvetlerle sınırlı değildir. $F(x)$ aynı zamanda değişken kuvvetleri, kuvvet çiftlerini vb. temsil edebilir ve bu nedenle genelleştirilmiş kuvvet olarak değerlendirilecektir. x 'de bu kuvvetten dolayı yapıdaki yer değiştirmeyi gösterir.

$$W_E = \int_{x1}^{x2} F(x) dx \quad (16)$$

3 Toplam potansiyel enerji ilkesi

Bu bölümde, enerjinin korunumu ilkesinin genelleştirilmiş olarak düşünülen ve mekaniğin birçok dalında kullanılan virtüel iş ilkesinden yola çıkılarak varyasyon hesabı ile toplam potansiyel enerji ilkesine geçiş yapılacaktır. Virtüel iş ilkesi cismin bünyesinden bağımsız olarak elastik, plastik gibi her türlü malzeme için kolaylıkla uygulanabilen yapı mekaniğinin en güçlü teoremidir. Virtüel yer değiştirme teoremine göre, dış yükler altında dengede olan bir sisteme, sistemin bağları ile uyumlu kabul edilebilir virtüel (sanal) yer değiştirme verilirse, dış kuvvetlerin yaptığı virtüel iş, iç kuvvetlerin yaptığı virtüel işe eşittir [Denklem (17)].

$$\delta U = \delta W \quad (17)$$

δ sembolü değişime uğrayan büyüklüklerin önüne yazılan özel bir operatör işaretidir. Denklem (17)'i δ varyasyonuna göre paranteze alırsak:

$$\delta(U - W) = 0 \quad (18)$$

Denklem (18) elde edilir. Toplam potansiyel enerji Π , sistemin iç kuvvetlerinin potansiyeli ile dış kuvvetlerinin potansiyelinin toplamından meydana gelmektedir. İç kuvvetlerin potansiyeli şekil değiştirme enerjisi U dan ibarettir.

$$\Pi = U - W \quad (19)$$

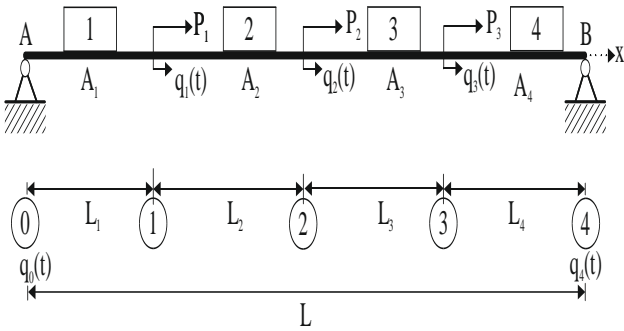
Denklem (19) kullanılarak, virtüel yer değiştirme ilkesi bir başka gösterimle

$$\delta\Pi = 0 \quad (20)$$

Denklem (20) olarak yazılabilir. Toplam potansiyelin birinci varyasyonunun sıfır olduğu görülür. Böylece virtüel iş ilkesi, Π toplam potansiyel enerji fonksiyonunun varyasyonunun sıfır yapılmasına karşı gelmiş olur. Toplam potansiyel enerjiyi en küçük yapan konum gerçek denge konumudur. Bu çalışmada statikçe belirsiz, L boyunda viskoelastik malzemeden yapılmış ekselel yüklü çubuğun üzerine üç adet ekselel kuvvet etkimesi durumunu ele alalım ve her bir elemanın boylarının da farklı olduğunu düşünelim. Sistemi toplam potansiyel enerji ilkesi ile çözmeye çalışalım. Bu problem ile toplam potansiyel enerji ilkesi, ekselel yüklü statikçe belirsiz viskoelastik çubukların genel formülasyonunun elde edilmesi için ilk kez uygulanmış olacaktır.

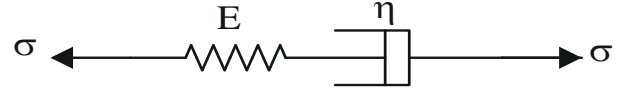
4 Ekselel yüklü hiperstatik viskoelastik çubuk

Şekil 2’de A ve B uçlarından sabitlenmiş kesit alanı A (sabit) ve uzunluğu L olan bir çubuğun üzerine üç adet tekil kuvvet etkimesi durumunu ele alalım.



Şekil 2. Ekselel yüklü hiperstatik viskoelastik çubuk

İlk olarak mesnetlere ve kuvvet etki noktalarına düğüm noktası numarası verilmiştir. Düğüm noktalarının yer değiştirmeleri q_0, q_1, q_2, q_3 ve q_4 ' tür. A ve B sabit noktalarına ait olan yer değiştirmeler q_0 ve q_4 sıfırdır. Geriye bilinmeyen olarak q_1, q_2 ve q_3 kalacaktır. Düğüm noktaları arasında kalan parçaların her biri eleman olarak isimlendirilmiş ve şekilde görüldüğü gibi numaralandırılmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi sistemin dört elemanı ve beş düğüm noktası vardır. Viskoelastik malzeme davranışını temsil etmek için standart reolojik model olan Maxwell mekanik modeli kullanılmıştır. Reolojik modeller doğrusal elastik yaylar ve viskoz sönüm kutularının çeşitli kombinasyonlarından oluşmaktadır. Lineer elastik bir yay ve lineer viskoz sönüm kutusunun seri bağlanmasıyla geliştirilen (Şekil 3) temel reolojik modellerden biri Maxwell modelidir.



Şekil 3. Maxwell modeli

Bir Maxwell malzemesinde gerilme, şekil değiştirme ve bunların t zamanına göre değişimi Denklem (21) ile verilir.

$$\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \dot{\epsilon} \quad (21)$$

Zamana göre türevler terimlerin üzerindeki bir nokta ile temsil edilmiştir. Burada η sabiti viskozite katsayısı, E ise elastisite sabitidir. Zamana bağlı deplasmana ve kısa süreli elastik davranışa sahip bir malzeme modeli sunularak, birçok viskoelastik cisimlerin davranışları hakkında yaklaşık fakat akla yatkın bir model elde edilebilir. Maxwell modeli bu özelliğe sahip mekanik bir modeldir.

Sistemin iç enerjisi, elemanların enerjileri toplamı olarak Laplace uzayında hesaplanabilir. Bu durumda sistemin $\bar{\Pi}$ toplam potansiyel enerjisi:

$$\bar{\Pi} = \sum_{i=1}^N \bar{U}_i - \bar{W}_E \quad (22)$$

Denklem (22) şeklinde yazılabilir. Sistemin \bar{W}_E potansiyel enerjisi, düğüm noktalarına etkiyen kuvvetlerle, düğüm noktalarının yer değiştirmelerinin çarpımlarının toplamı olarak elde edilir. Elemanların zamana bağlı boy değiştirmeleri $\Delta_i(t)$ ' yi düğüm noktalarının zamana bağlı yer değiştirmeleri cinsinden

$$\Delta_i(t) = q_i(t) - q_{i-1}(t) \quad (23)$$

Denklem (23) şeklinde hesaplayabiliriz. $q_i(t)$, i numaralı düğüm noktasının (nod) zamana bağlı yer değiştirmesi, $q_{i-1}(t)$ ise, $i-1$ numaralı düğüm noktasının yer değiştirmesidir. Sistemin dengede olması koşulunu sağlamak üzere $\bar{\Pi}$ fonksiyonelinin \bar{q}_i ' lere göre kısmi türevleri alınıp sıfıra eşitlenerek [Denklem (24)] bilinmeyen sayısına eşit sayıda doğrusal denklem üretilir.

$$\frac{\partial \bar{\Pi}}{\partial \bar{q}_i} = 0 \quad (24)$$

Denklemler matris formda

$$\frac{\eta s E A}{E + \eta s} \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right) & \left(-\frac{1}{L_2}\right) & (0) \\ \left(-\frac{1}{L_2}\right) & \left(\frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}\right) & \left(-\frac{1}{L_3}\right) \\ (0) & \left(-\frac{1}{L_3}\right) & \left(\frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_4}\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \bar{q}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \\ \bar{P}_3 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Denklem (25) şeklinde yazılır. Buradan bilinmeyen uç yer değiştirmeleri Laplace uzayında hesaplanarak işlemler sonuçlandırılır. Artık Laplace uzayında uç yer değiştirmeler bilindiğine göre, istenirse Laplace uzayında elemanların boy değişimleri $\bar{\Delta}_i$ ' ler hesaplanabilir. Elde edilen sonuçları gerçek zaman uzayına taşımak için, ters Laplace dönüşüm tekniği kullanılır. Viskoelastik malzemenin bünye bağıntısı yardımıyla istenildiği takdirde normal kuvvetler kolaylıkla hesaplanabilir.

4.1 Sayısal örnek

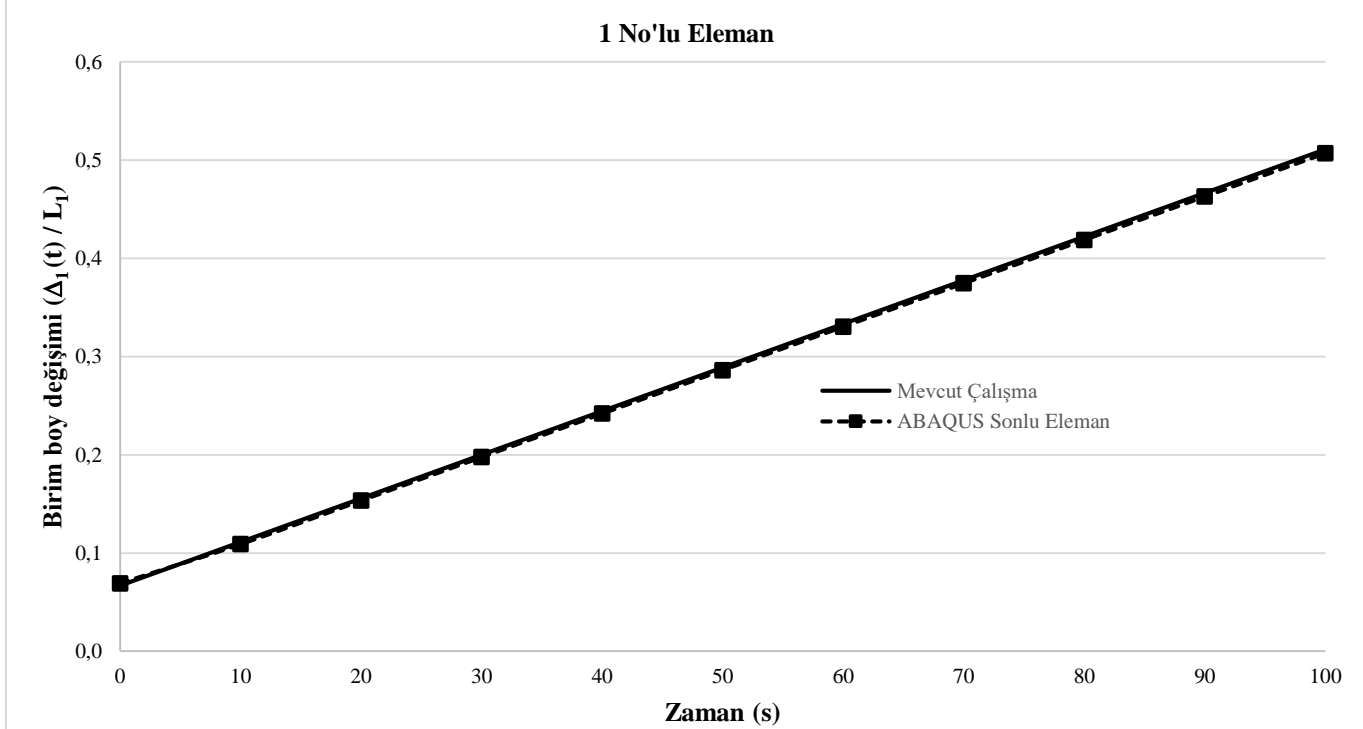
Bu bölümde, geliştirilen formülasyonun doğrulanması amacıyla **Şekil 2**'de yükleme durumu verilen sisteme ait zamana bağlı yer değiştirme bilinmeyenleri $q_1(t)$, $q_2(t)$ ve $q_3(t)$ hesaplanarak, dört eleman için zamana bağlı boy değiştirmeler $\Delta_i(t)$ elde edilecektir. En kesit alanı sabit $A_1=A_2=A_3=A_4=A=400$ cm², viskoelastik malzeme sabitleri $E=20 \times 10^3$ N/m² ve $\eta=300 \times 10^3$ Ns/m² olan eksenel yüklü çubuğun toplam boyu $L=(L_1+L_2+L_3+L_4)=(1+2+2+1)$ m = 6 m' dir. Hiperstatik sistem $P_1=30$ N, $P_2=40$ N ve $P_3=50$ N'luk eksenel kuvvetlerin etkisi altındadır. Elde edilen sonuçlar, ABAQUS Sonlu Eleman programı sonuçları ile kıyaslanmıştır. ABAQUS Sonlu Eleman programı ile çözümde, çubuk toplam 60 sonlu elemana bölünmüştür. **Şekil 2**'de 1, 2, 3 ve 4 olarak numaralandırılmış sistem elemanlarının zamana bağlı birim boy değiştirmeleri sırasıyla **Şekil 4**, **Şekil 5**, **Şekil 6** ve **Şekil 7**' de ABAQUS sonuçları ile birlikte sunulmuştur. Sonuçlar neredeyse üst üste düşmüştür ve sonuçlarda üç ondalık basamağa kadar yakınsaklık sağlanmıştır. Teorik olarak anlaşılması basit ve pratik olarak uygulanması kolay olan bu yöntemin en önemli avantajı, birkaç basit işlem adımı ile farklı eleman sayıları, viskoelastik malzeme modelleri ve yükleme tiplerine sahip sistemlere ait sonuçlar doğrudan elde edilebilir. Sonlu

eleman analizinde daha hassas sonuçların elde edilmesi için ağ sıklığına dikkat edilmelidir. Sık bir eleman ağı kullanıldığında sonuçlar daha hassas olacaktır ancak eleman sıklığı ne kadar artarsa, çözümün elde edilmesi için gereken zaman o kadar artacaktır. Bu çalışma kapsamında önerilen yöntem, literatürde sıklıkla kullanılan sonlu eleman yönteminin aksine zamandan tasarruf ile oldukça tatmin edici sonuçlar vermektedir.

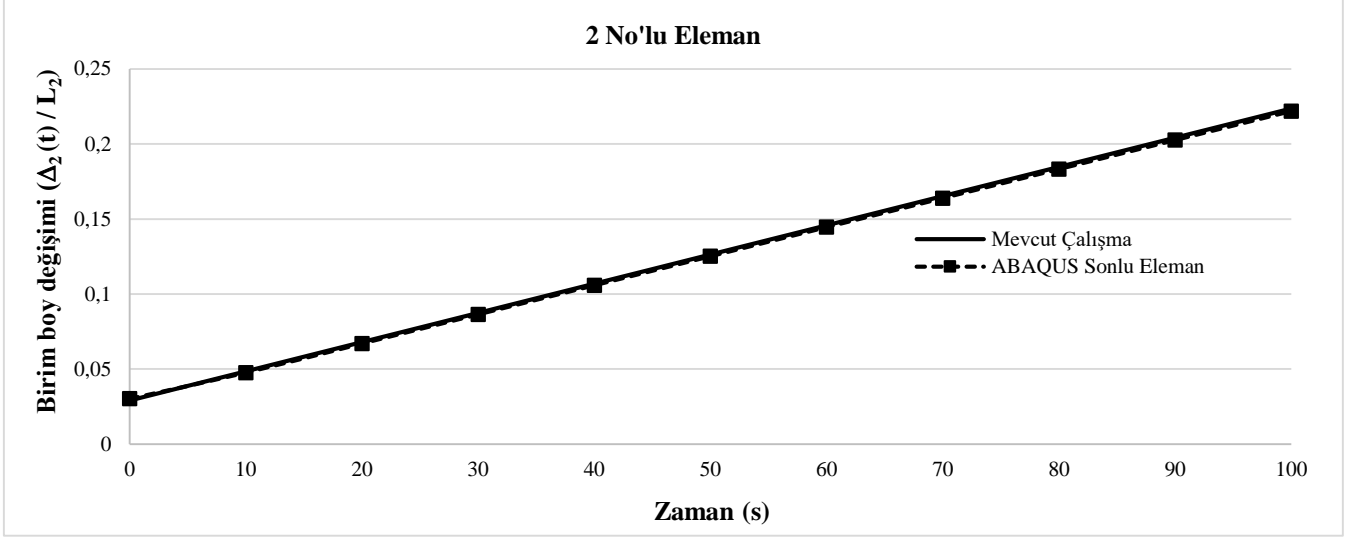
Ayrıca, P_1 , P_2 ve P_3 yüklerinin etkidiği noktalarda hesaplanan zamana bağlı eksenel yer değiştirmeler ilk 100 saniye için **Tablo 1**' de sunulmuştur.

Tablo 1. Zamana bağlı eksenel yer değiştirmeler

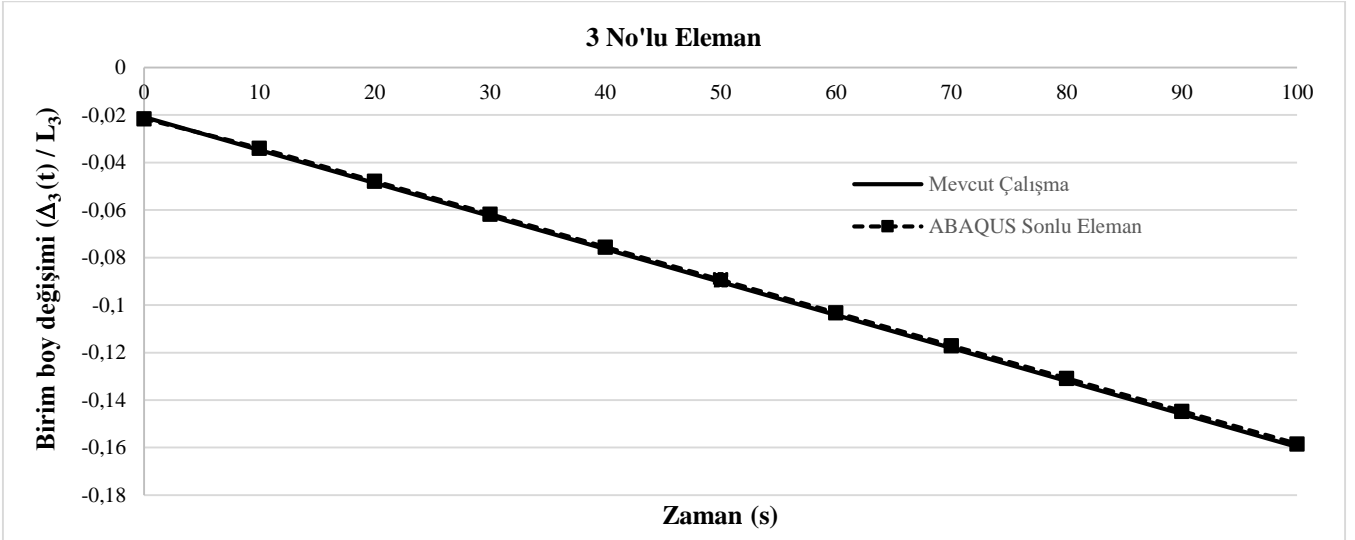
Zaman (s)	$q_1(t)$ (m)	$q_2(t)$ (m)	$q_3(t)$ (m)
5	0.088889	0.166667	0.111111
10	0.111111	0.208333	0.138889
20	0.155556	0.291667	0.194444
30	0.2	0.375	0.25
40	0.244444	0.458333	0.305556
50	0.288889	0.541667	0.361111
60	0.333333	0.625	0.416667
70	0.377778	0.708333	0.472222
80	0.422222	0.791667	0.527778
90	0.466667	0.875	0.583333
100	0.511111	0.958333	0.638889



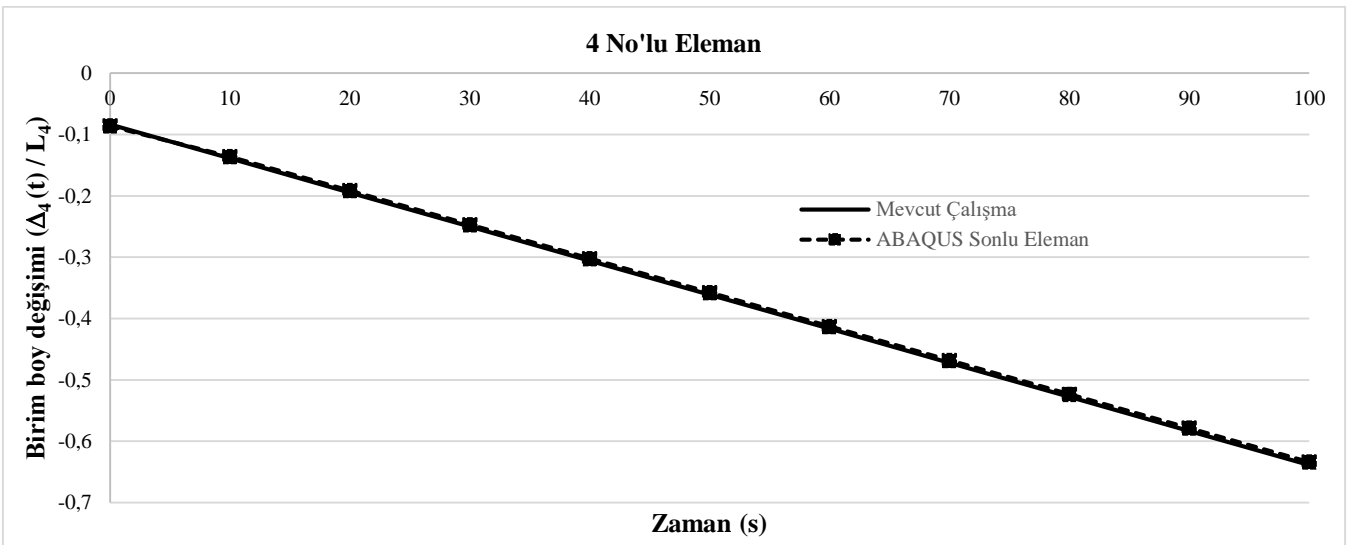
Şekil 4. 1 no'lu elemanın birim boy değişimi (ε)



Şekil 5. 2 no'lu elemanın birim boy değişimi (ϵ)



Şekil 6. 3 no'lu elemanın birim boy değişimi (ϵ)



Şekil 7. 4 no'lu elemanın birim boy değişimi (ϵ)

5 Sonuçlar

Elastik cisimlerde gerilme sadece şekil değiştirmenin bir fonksiyonudur, viskoelastik cisimlerde ise gerilme hem şekil değiştirmeye hem de şekil değiştirme hızına bağlıdır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi bilinen bir malzemeden üretilmiş bir yapıyı analiz etmek için, gerilme-şekil değiştirme verilerinin matematiksel olarak ifade edilmesi gereklidir. Maxwell mekanik modelin temsil ettiği hiperstatik eksenel yüklü çubuk probleminin ele alındığı bu çalışmada, Laplace uzayında toplam potansiyel enerji teoremi kullanılarak yeni enerji fonksiyoneli elde edilmiştir. En karmaşık taşıyıcı sistemlerin çözümüne sistematik bir biçimde uygulanabilen bu yaklaşım ile elemanların enerjileri, elemanların birleşim noktalarındaki nodların yer değiştirmeleri cinsinden elde edilmiştir. Laplace uzayında elde edilen çözümlerden, gerçek zaman uzayındaki çözümlere geçmek için ters Laplace dönüşümü uygulanmıştır. Sunulan yaklaşım ile sabit en kesit alanına sahip, farklı eksenel yüklerin etkisi altında hiperstatik viskoelastik çubuk problemi örnek olarak ele alınmıştır. Bilgimiz dâhilinde literatürde toplam potansiyel enerji ilkesinin hiperstatik viskoelastik problemlerine uygulaması ile karşılaşılmamıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, ABAQUS Sonlu Eleman programı sonuçları ile kıyaslanmıştır. ABAQUS Sonlu Eleman programı ile çözümde, çubuk toplam 60 sonlu elemana bölünmüştür. Sonlu eleman analizinde daha hassas sonuçların elde edilmesi için sık bir eleman ağı kullanılması esastır. Ancak eleman ağı ne kadar sık olursa, çözümün elde edilmesi için gereken zaman o kadar artacaktır. Bu çalışma kapsamında, teorik olarak anlaşılması basit ve pratik olarak uygulanması oldukça kolay olan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin en önemli avantajı, farklı viskoelastik malzeme modellerine, yükleme tiplerine ve sistemi oluşturan eleman sayılarına bağlı olarak çözülecek denklem setini birkaç basit adımda yeniden oluşturmak mümkündür. Bu özelliği sayesinde sunulan yöntem zamandan tasarruf sağlarken, oldukça tatmin edici sonuçlar vermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] T-M. Chen, The hybrid Laplace transform/finite element method applied to the quasi-static and dynamic analysis of viscoelastic Timoshenko beams. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38, 509-522, 1995. <https://doi.org/10.1002/nme.1620380310>.
- [2] G. Honig and U. Hirdes, A method for the numerical inversion of Laplace transform. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 10(1), 113-132, 1984. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(84\)90075-X](https://doi.org/10.1016/0377-0427(84)90075-X).
- [3] J.D. Mehl, R.N. Miles, Finite element modeling of the transient response of viscoelastic beams. *Proceedings of the SPIE*, pp. 306-311, 1995.
- [4] A.Y. Aköz, F. Kadioğlu, The mixed finite element method for the quasi-static and dynamic analysis of viscoelastic Timoshenko beams. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 44, 1909-1932, 1999. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970207\(19990430\)44:12<1909::AID-NME573>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970207(19990430)44:12<1909::AID-NME573>3.0.CO;2-P).
- [5] F.S. Barbosa, M.C.R. Farage, A finite element model for sandwich viscoelastic beams: Experimental and numerical assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 317, 91-111, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.013>.
- [6] A. Pálfalvi, A comparison of finite element formulations for dynamics of viscoelastic beams. *Finite Elements in Analysis and Design*, 44, 814- 818, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.06.009>.
- [7] M. Enelund, G.A. Lesieutre, Time domain modeling of damping using anelastic displacement fields and fractional calculus. *International Journal of Solids and Structures*, 36 (29), 4447-4472, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00194-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00194-2).
- [8] F. Kpeky, H. Boudaoud, F. Abed-Meraim, E.M. Daya, Modeling of viscoelastic sandwich beams using solid-shell finite elements. *Composite Structures*, 133, 105-116, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.055>.
- [9] Z. Huang, Xi. Wang, N. Wu, F. Chu, and J. Luo, A finite element model for the vibration analysis of sandwich beam with frequency-dependent viscoelastic material core. *Materials*, 12 (20), 3390, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12203390>.
- [10] M. Filippi, E. Carrera, Stress analyses of viscoelastic three-dimensional beam-like structures with low- and high-order one-dimensional finite elements. *Meccanica*, 56, 1475-1482, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11012-020-01191-5>.
- [11] M. Arda, Vibration analysis of an axially loaded viscoelastic nanobeam. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10 (3), 252-263, 2018. <https://doi.org/10.24107/ijeas.468769>.
- [12] A. Shariati, D.W. Jung, H.M. Sedighi, K.K. Zur, M. Habibi, M. Safa, On the vibrations and stability of moving viscoelastic axially functionally graded nanobeams. *Materials*, 13(7), 1707, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13071707>.
- [13] A. Ebrahimi-Mamaghani, A. Forooghi, H. Sarparast, A. Alibeigloo, M.I. Friswell, Vibration of viscoelastic axially graded beams with simultaneous axial and spinning motions under an axial load. *Applied Mathematical Modelling*, 90, 131-150, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.041>.
- [14] S. Liu, Y.Q. Tang, L. Chen, Multi-scale analysis and Galerkin verification for dynamic stability of axially translating viscoelastic Timoshenko beams. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 885-897, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.039>.
- [15] A. Mokhtari, H.R. Mirdamadi, Study on vibration and stability of an axially translating viscoelastic Timoshenko beam: non-transforming spectral element

- analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 56, 342-358, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.12.007>.
- [16] M. Gürgöze, Parametric vibrations of a viscoelastic beam (Maxwell model) under steady axial load and transverse displacement excitation at one end. *Journal of Sound and Vibration*, 115(8), 329-338, 1987. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(87\)90476-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(87)90476-7).
- [17] U.S. Shirahatti, S.C. Sinha, Stability of perfect viscoelastic columns subjected to periodic axial loading, *Proceedings of the ASME 1991 Design Technical Conferences. 13th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise: Vibration Analysis - Analytical and Computational*. Miami, Florida, USA, 225-231, 1991.
- [18] A. Manevich and Z. Kołakowski, Free and forced oscillations of Timoshenko beam made of viscoelastic material. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 49(1), 3-16, 2011.
- [19] J. Freundlich, Dynamic response of a simply supported viscoelastic beam of a fractional derivative type to a moving force load. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 54(4), 1433-1445, 2016. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.54.4.1433>.
- [20] A. H. Sofiyev, On the solution of the dynamic stability of heterogeneous orthotropic visco-elastic cylindrical shells. *Composite Structures*, 206, 124-130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.027>.
- [21] A. H. Sofiyev, Z. Zerín, N. Kuruoglu, Dynamic behavior of FGM viscoelastic plates resting on elastic foundations. *Acta Mechanica*, 231, 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02502-y>.
- [22] A. H. Sofiyev, About an approach to the determination of the critical time of viscoelastic functionally graded cylindrical shells. *Composites Part B: Engineering*, 156, 156-165, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.073>.
- [23] H.A. Zamani, M.M. Aghdam, M. Sadighi, Free vibration analysis of thick viscoelastic composite plates on visco-Pasternak foundation using higher-order theory. *Composite Structures*, 182(15), 25-35, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.101>.
- [24] G. Tekin, F. Kadioğlu, Viscoelastic behavior of shear-deformable plates. *International Journal of Applied Mechanics* 9(6), 1750085 (23 pages), 2017. <https://doi.org/10.1142/S1758825117500855>.
- [25] D. Gutierrez-Lemini, *Engineering Viscoelasticity*, Springer, New York, 2014.





İnce pomza agreganın çimento esaslı kendiliğinden yayılan tesviye şapının performansına etkisi

Effect of fine pumice aggregate on performance of cement based self-leveling screed

Lütfullah Gündüz¹, Şevket Onur Kalkan^{2*}

^{1,2} İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35620, İzmir Türkiye

Öz

Şaplar, yüzey kusurlarını düzeltmek ve zeminlere eğim vermek için kullanılan yapı malzemeleridir. Konvansiyonel çimento esaslı şaplar, yüzey düzlemek için fazladan işçilik gerektirmekte ve normal yoğunluklu agregalar kullanılarak üretildiği için binalarda fazladan ölü yük oluşturmaktadır. Bu çalışmada, 1080 – 1156 kg/m³ yoğunluk değerlerinde oldukça hafif ve kendiliğinden yerleşme özelliği iyileştirilmiş şap harçları üretilmiştir. Üretilen kompozit harçlarda ana agrega olarak iki farklı boyutta pomza ve kendiliğinden yayılmayı sağlamak için melamin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kompozit harçların yayılma, yoğunluk, gözeneklilik, 1, 7, 28 ve 120 günlük basınç ve eğilme dayanımı, aşınma direnci, yüzey sertliği, negatif rötre ve pozitif rötre özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, karışıma giren pomza miktarı arttıkça harçların yayılma özelliği azalmaktadır. Benzer şekilde pomza miktarı arttıkça harcın gözenekliliği artmakta, birim hacim kütlesi azalmakta, buna bağlı olarak da mekanik performansı azalmaktadır.

Anahtar kelimeler: Pomza agrega, Kendiliğinden yayılan şap, Şap harcı, Kendiliğinden yayılma özelliği, Hafif harç

1 Giriş

Kendiliğinden yayılan tesviye şapı, çimento esaslı polimer modifiye, düzgün ve pürüzsüz bir zemin yüzeyi elde etmek için yüksek akışkan özelliğine sahip kendinden yayılan bir harç malzemesidir. İlk pompalanabilir kendiliğinden yayılan zemin kaplama malzemesi 1970'lerin ortasında geliştirilmiştir. Bu üründe, bir üst döşeme uygulamadan önce beton zeminleri düzleştirmenin kolay ve hızlı bir yolunu elde etmek amacıyla Portland çimentosu, kazein bazlı akıcı bir madde ile birlikte bağlayıcı olarak kullanılmıştır [1].

Kendiliğinden yayılan tesviye şap harcı, bağlayıcılar, dolgu malzemeleri, yeniden dağılılabılır polimerler ve katkılardan oluşan kompozit bir yapıya sahiptir. Bağlayıcı malzemenin türüne göre şap harcı ayrı tanımlamalar altında isimlendirilebilmektedir. Bu isimlendirmeler TS EN 13813 standardında 5 ayrı kategoride gruplandırılmıştır [2]: Çimentolu şap malzemeleri (CT), Kalsiyum sülfatlı şap malzemeleri (CA), Magnezitli şap malzemeleri (SA), Mastik

Abstract

Screeds are building materials used to fix surface defects and bevel floors. Conventional cementitious screeds require extra labor to level the surface and create an extra dead load in buildings as they are produced using normal weight aggregates. In this study, self-compacting and lightweight screeds with a density value of 1080 – 1156 kg/m³ were produced. In the produced composite mortars, pumice in two different sizes was used as the main aggregate and melamine sulfonate-based superplasticizer was used to provide self-leveling. Within the scope of the study, flowability, density, porosity, 1, 7, 28 and 120 days compressive and flexural strength, abrasion resistance, surface hardness and shrinkage and expansion properties of composite mortars were determined. According to the results of the study, the flowability property of the mortars decreases as the amount of pumice entering the mixture increases. Similarly, as the amount of pumice increases, the porosity of the mortar increases, the unit volume mass decreases, and accordingly its mechanical performance decreases.

Keywords: Pumice aggregate, Self-leveling screed, Screed mortar, Self-leveling property, Lightweight mortar

asfaltlı şap malzemeleri (AS) ve Sentetik reçineli şap malzemeleri (SR). Dolgu malzemeleri olarak genellikle kum ve kireçtaşı gibi ince öğütülmüş mineral malzemelerin ağırlıklı olarak kullanıldığı görülmektedir. Katkı maddeleri olarak, örneğin, priz süresi, kütleme süresi, akış özellikleri, hava sürüklenmesi ve ayırmayı kontrol etme amacıyla farklı orijinli alternatif mineral ve/veya kimyasal polimer esaslı katkıları kullanılabilmektedir [3-5].

Kendiliğinden yayılan şap harcının genellikle üç temel kullanımı yer söz konusudur. Bunlardan ilki, herhangi bir yüzeyi düzeltmek ve betonun sahip olabileceği düzensizlikleri gidermek amacıyla kullanılan altlıklar olarak bilinir [6]. Bu uygulama, her türlü zeminin montajından önce yapılır. Örneğin, PVC, fayans, seramik, granit seramik, mermer, doğal granit, parke, halı, lamine parke, laminat parke, kauçuk döşeme gibi malzemelerin altında zemini düzeltmek, tesviyeye, teraziye getirmek için kullanılabilir. İkinci kullanım yeri ise, zemin kaplamasına ihtiyaç duymadan gerçek bitmiş zemin olarak hareket etmek için

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: onur_kalkan@hotmail.com (Ş.O. Kalkan)
Geliş / Received: 19.06.2022 Kabul / Accepted: 15.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1132825

projenin başlangıcından itibaren kendiliğinden yayılan harcı son kat uygulama olarak yapmaktır. Kendiliğinden yayılan harcın üçüncü kullanımı ise, köprü veya yol gibi uygulamalarda hasarlı beton için onarım malzemesi olarak kullanılır. Buna ek olarak, kendiliğinden yayılan harçlar, dekoratif işlemler için pürüzsüz ve dayanıklı yeni bir yüzey sağlamak için kullanılabilir gibi [7], yoğun trafiği olan alanlarda, konut, ticari ve endüstriyel yapılarda, hastane, süpermarket, eğitim binalarında, otel, alışveriş merkezi gibi yerlerde de kullanılır. Ayrıca, epoksi altı uygulamalarda kullanımları da görülebilmektedir. Kendiliğinden yayılan harç, doğrudan kullanılmadan önce su ile karıştırılması gereken, kullanıma hazır bir harçtır. Ayrıca geleneksel çimento harcına benzer veya daha yüksek basınç dayanımına sahip düz ve pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için kullanılır ve esas olarak altlık veya dolgu malzemesi olarak kullanılır [7].

Günümüzde zemin kaplamalarının düzlük ve pürüzsüzlük derecelerinin artması nedeniyle kendiliğinden yayılan harç uygulamalarına olan ihtiyaç artmıştır. Kendiliğinden yayılan harçlar, geleneksel çimento harcının aksine yüksek akış özelliklerine sahiptir. Aynı zamanda akıcılığı ile de karakterize edilirler. Ancak kendiliğinden yayılan harç kalınlaştıkça akışkanlığı azalır. Ayrıca yüksek akışkanlık özelliğinden dolayı dikey yüzeylerde uygulanamaz. Kendiliğinden yayılan harç, herhangi bir titreşim veya sıkıştırma gerektirmez [3, 8, 9]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kendiliğinden yayılan harç malzemelerin yoğunluk aralığı çoğunlukla 2000 ile 2200 kg/m³ arasında olup [10-12], 2400 ile 2600 kg/m³ arasında değişen normal harçtan daha düşüktür. Bu nedenle, binalarda uygulandığı alanlarda ölü yükü azaltıcı önemli bir katma değer sağlar. Bu bağlamda, inşaat projelerinde kendiliğinden yayılan şap harç uygulamalarının yaygınlaşması, projenin ölü yük değerlerinin minimize edilmesi için şap malzemenin birim yoğunluğunun olduğunca düşük olması önem kazanmaktadır. Şap harcının mukavemet değerini çok düşürmeden daha düşük yoğunlukta karışım tasarımlarının formüle edilmesi ayrı bir önem arz etmektedir. Bu amaçla, normal kum ve kırmataş agregası bileşenlere göre birim ağırlığı düşük doğal ve/veya yarı suni gözenekli yeni nesil malzemelerin kendiliğinden yayılan şap tasarımlarında kullanımı birer yenilikçi araştırma konusu olmaktadır. Yüksek yoğunluğu nispeten düşük malzemeler arasında volkanik orijinli doğal gözenekli pomza, volkan cürufu, ignimbrit, tüfit gibi malzemelere ilaveten diğer orijinlerde genleşmiş perlit, genleşmiş kil, açılmış vermikülit, genleşmiş cam ve geri dönüşüm agregası vb. gibi malzemelerin kullanılabilirliği üzerine çalışmalar giderek önem kazanmaktadır [12-14]. Barluenga ve ark. [15] taş ocağı atıklarından elde edilmiş öğütülmüş arduvazın kendiliğinden yerleşen çimento esaslı harç üretiminde kullanımı üzerine yaptığı çalışmada yüksek dayanımlı şap harcı üretiminin mümkün olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte Júnior ve ark. [16] kül bazlı hibrit bağlayıcı kendinden yerleşen harç uygulamaları üzerine başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Altuncu ve ark. [17] çalışmalarında, genleşmiş cam ve genleşmiş perlit agregasının hafif şap harçlarının üretiminde etkin olarak kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir. Altuncu ve ark. [18] bir diğer çalışmalarında, genleşmiş cam ve genleşmiş perlit

kullanarak şap harcının birim hacim ağırlığının azaldığını, ısı ve ses izolasyon performanslarının iyileşebildiğini tespit etmişlerdir. Şahin ve ark. [19] çalışmalarında normal yoğunlukta kum ve farklı tip kimyasal katkıları kullanarak 30 MPa basınç dayanımının altında kalmayacak şekilde kendiliğinden yayılan şap harçları üretmişlerdir.

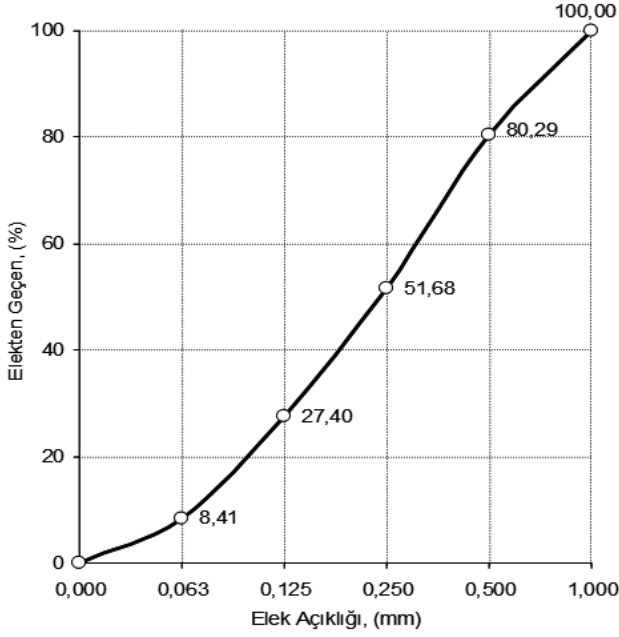
Literatür incelendiğinde, gözenekli agregası malzemelerin kendiliğinden yayılan şap ürünlerinde kullanımı üzerine yeter düzeyde araştırma çalışmaları görülmektedir. Bu bağlamda, gözenekli agregaların farklı tane boyutlarında çimento esaslı şap harçlarında uygulanabilirliği ve harcın teknik performansları üzerine olan etkileri araştırılması, avantaj ve dezavantajlarının tecrübe edinilmesi gerekli bir çalışma alanıdır.

Bu makale, volkanik orijinli ve doğal gözenekli bir yapıya sahip olan pomza agregasının ince boyutlarda, çimento esaslı kendiliğinden yayılan tesviye şapı üretimlerinde kullanımında pomza agregasının performansının daha iyi bilinmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Farklı tane boyut ve kullanım oranlarında pomza kullanımlı çimento esaslı tesviye şapı harçlarının geliştirilmesine yönelik deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Laboratuvarında test edilen 10 farklı karışım tasarımına sahip pomza agregalı polimer modifiyeli çimento esaslı tesviye şapı harcı örneklerinin detaylı performans bulguları tartışılmıştır. Yapılan deneysel analizlerde pomza agregasının kendiliğinden yayılan tesviye şapı harcının yoğunluğuna, gözeneklilik oranına, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci, yüzey sertliği, büzülme ve şişme olan etkileri detaylı analiz edilmiş olup, elde edilen bulgular burada özetle tartışılmıştır. Pomza agregasının optimum kullanım oranında kendiliğinden yayılan tesviye şapı harcı karışımlarında, standartların öngördüğü teknik limitleri sağlayabilen özellikte kolay uygulanabilen şap harçlarının elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

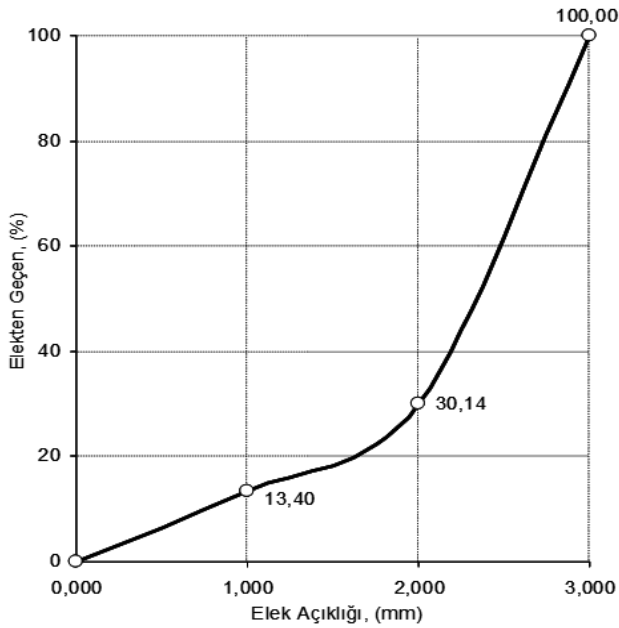
2 Materyal ve metod

2.1 Test örneklerinde kullanılan malzemeler

Maksimum 30 mm kalınlığa kadar uygulanması tasarlanan çimento esaslı kendiliğinden yayılan tesviye şap (ÇEKYTS) harcı örneklerinin hazırlanmasında ana agregası malzeme olarak doğal gözenekli volkanik orijinli pomza agregası Nevşehir bölgesinde endüstriyel olarak faaliyet gösteren ocaklardan ham formda tedarik edilmiştir. Laboratuvar ortamında pomza agregası öncelikle 105±5°C'lik havalandırılmalı bir etüv ortamında kurutularak sonrasında mafsallı bir kırıcıyla ince granüllü malzeme boyutuna küçültülmüştür. Ufalanmış pomza malzeme sonrasında kare göz açıklıklı elekler ile sınıflandırmaya tabi tutularak şap harcı örneklerinde kullanılmak üzere başlıca iki ayrı 0-1 mm ve 1-3 mm ince boyut fraksiyonuna sınıflandırılmıştır. 0-1 mm pomza "FPA" olarak, 1-3 mm pomza ise "CPA" olarak kodlanmıştır. Her iki pomza agregası boyut aralığına ait malzemelerin elek analizi Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. 0-1 mm pomza agregasının etüv kurusu yığın yoğunluğu ortalama 890 kg/m³ olup, kütlece su emme oranı ise %19.8'dir. 1-3 mm pomza agregasının etüv kurusu yığın yoğunluğu ise ortalama 670 kg/m³ olup, kütlece su emme oranı ise %25.7'dir.



Şekil 1. FPA elek analizi (0-1 mm pomza)



Şekil 2. CPA elek analizi (1-3 mm pomza)

ÇEKYTŞ test örneklerinin hazırlanmasında dolgu materyali olarak piyasa koşullarından temin edilmiş 250 mikron boyutlu olarak sınıflandırılmış kırmataş kumu kullanılmıştır. Öğütülmüş kırmataş kumunun ortalama yığın yoğunluğu $1430 \pm 150 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Ayrıca şap harç örneklerinde maksimum tane boyutu 45 mikron olan mikro silika dayanım artırıcı, puzolanlık özelliği göstermesi sebebiyle de katkı materyali olarak kullanılmıştır.

ÇEKYTŞ test örneklerinin hazırlanmasında harç karışımının işlenebilirlik ve dayanımını artırmak amacıyla çimento ve alçı esaslı malzemelerde karışım suyunu azaltan ve yüksek akışkanlık özelliği kazandıran, düşük sıcaklıklarda da kullanıma uygun, toz formunda, melamin

sülfonat esaslı bir süper akışkanlaştırıcı piyasa koşullarından temin edilerek karışımlara ilave edilmiştir. Melamin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı toz katkı (AKL), beyaz renkli, suda kolay çözünebilen, ortalama %30-35'lik çözeltide pH değeri 8.5-9.5 aralığında olan, klor iyonu içermeyen, özgül ağırlığı ortalama 0.6 g/cm^3 ve ASTM C 494 Type G [20] standardına uygun bir katkı malzemesidir. Bu katkı, endüstriyel uygulamalarda kendiliğinden yayılan şap ürünlerinde, fugalarda, hazır harç ve sıvalarda, alçı plaka, alçı blok ve kalıp alçılarındaki, hazır beton uygulamalarında ve ayrıca prekast elemanların imalatında da kullanılabilen yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı katkıdır.

Şap harçlarına katılan elyaf lif katkıları hamur içerisinde düzgün dağılan ve rastgele yönlendirilmiş lifler olması sebebiyle çekme ve basınç gerilmelerine karşı matris yapıda önemli birer donatı vazifesi görürler. ÇEKYTŞ test örneklerinin hazırlanmasında S-2 tipi cam lifi piyasa koşullarından temin edilerek elyaf katkı olarak ilave edilmiştir. S-2 tipi cam lifi, alüminyum silikatların yüksek sıcaklıktaki karışımlarından oluşan, incelikleri ortalama 5-27 μm arasında değişen liflerdir. Bu lif katkısı, şap harcının yüksek mukavemet ve basınç dayanımı sağlaması, yüksek sıcaklık dayanımı ve gelişmiş darbe dayanımı sağlaması amacıyla kullanımı düşünülmüştür. Bununla birlikte ayrıca, şap harcının priz sonrası oluşabilecek rötre çatlaklarını ve mikro çatlakları engellemesi, şapın su geçirgenliğini azaltılmasına katkı sağlaması, sertleşmiş şap yüzeyinin yüzey aşınması ve tozumasını önlemesi gibi teknik avantajları sebebiyle kullanımı düşünülmüştür.

Kendiliğinden yayılan şap harcının uygulandığı yüzeye yüksek yapışma kabiliyetinin sağlanması amacıyla karışım tasarımlarında modifiye edilmiş polimer katkıları kullanılabilmektedir. Bu amaçla, ÇEKYTŞ test örneklerinin hazırlanmasında vinil asetat-Veova-akrilat esaslı ve polivinil alkol koruyuculu bir toz polimer katkı piyasa koşullarından temin edilerek karışımlara ilave edilmiştir. Bu polimer katkı harcın çalışılabilirlik özelliğinin artırması ve su direncini yükseltmesi yanı sıra, harcın uygulama zamanının uzatılmasında (open time) etkili olup, karışımlarda kullanılan su miktarını azaltarak örneklerin nihai mukavemet değerlerinin yükseltilmesine de yardımcı olur. Bu polimer katkı, düşük film oluşturma sıcaklığında kullanılabilen ve çimento esaslı ürünlerde harcın yapışma özelliğini geliştirme özelliği olan sağlayan bir beyaz renkli toz formunda bir katkı türüdür. Ortalama yoğunluğu $550-650 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Minimum film oluşturma sıcaklığı $+3^\circ\text{C}$ 'dir. ÇEKYTŞ test örneklerinin hazırlanmasında CEM I 42.5R Portland Çimento (özgül ağırlık değeri 3.15 g/cm^3) kullanılmış olup, su olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2 Tamir harcı karışım tasarımı ve örneklerin hazırlanması

Çimento esaslı kendiliğinden yayılan şap harcının üretiminde ince boyut pomza agrega kullanımının harcın performansına etkisinin analizi amacıyla 10 ayrı karışım tasarımı yapılmış ve karışım bileşenleri 1 m^3 harç üretimi için kullanılan malzeme miktarları olarak Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. ÇEKYTS test örneklerinin karışım bileşenleri (1 m³ harç için malzeme miktarı kg)

Karışım	Çimento (kg)	FPA (kg)	CPA (kg)	250 µm Kalsit (kg)	Mikro Silika (kg)	AKL Katkı (kg)	Lif (kg)	Mikro Silika (kg)
SD1	430	150	225	94	43	5.4	1.4	5.7
SD2	410	155	232	97	43	5.1	1.4	5.7
SD3	390	159	239	99	42	4.9	1.4	5.7
SD4	370	164	246	102	42	4.6	1.4	5.6
SD5	350	169	253	104	42	4.4	1.4	5.6
SD6	340	171	257	106	42	4.2	1.4	5.6
SD7	320	176	264	108	41	4.0	1.4	5.5
SD8	310	178	267	109	41	3.9	1.4	5.5
SD9	300	181	271	110	41	3.7	1.4	5.5
SD10	280	185	278	113	41	3.5	1.4	5.4

İnce boyut pomza agreganın ÇEKYTS üretiminde harç performansını analiz etmek amacıyla ağırlıkça %31 - %45 aralığında değişen oranlarda çimento dozajı (280–430 kg/m³) kullanımlı alternatif karışım tasarımları hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan analiz serisinde ilk tasarlanan örneklerde yüksek dozajda çimento kullanımı düşünülmüş olup, daha sonraki örneklerde ise çimento kullanım oranının azalmasının etkinliğinin irdelenmesi düşünülmüştür. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm örneklerde çimento miktarı hariç karışım bileşenlerinin toplam ağırlığının %18'i oranında 250 µm kalsit malzeme dolgu materyali olarak sabit oranda kullanılmıştır. Bununla birlikte tüm karışımlarda ağırlıkça %4.5 oranında mikro silika, ağırlıkça %0.15 oranında S-2 tipi cam lifi ve ağırlıkça %0.60 oranında modifiye edilmiş polimer katkı sabit oranlarda kullanılmıştır. Melamin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı toz katkı uygulamaya göre çimento veya alçı ağırlığının %0.2 - %1.5'i aralığında kullanımının önerildiği çoğu çalışmada tecrübe edinilmiştir. Bu çalışma kapsamında karışım tasarımlarında kullanılan çimento miktarının ağırlıkça %1.25'i oranında melamin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı toz katkı sabit oranda tutulmuştur. Karışım tasarımlarında bağlayıcı malzeme, mineral ve polimer katkıları ve lif katkı miktarları toplamı haricinde, agrega olarak ince pomza malzemenin etkinliğinin irdelenmesi amacıyla toplam agrega malzemenin ağırlıkça %40'ı FPA (0-1 mm pomza) ve ağırlıkça %60'ı CPA (1-3 mm pomza) malzemeden oluşacak şekilde tüm karışımlar tasarımılandırılmıştır. Bu bağlamda, karışım tasarımlarında çimento kullanım oranı azalırken agrega pomza kullanım oranı ise artmaktadır. Pomza malzeme kullanım oranı çalışma kapsamında çimento dozajına bağlı olarak ağırlıkça %39.3 ile %51 aralığında değişim göstermektedir. Tüm karışımlarda Su/Çimento oranı sabit tutulup w/c=0.55 oranında karışım suyu ile örnekler hazırlanmıştır.

Karışımların hazırlanmasında boyutlandırılmış tüm kuru durumdaki pomza agrega malzemeler, agrega yüzey gerilimlerinin minimize edilmesi amacıyla öncelikle ağırlıkça %1 oranındaki su ile ön nemlendirme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra karışımda yer alan diğer malzemeler ile birlikte bir mikser kabı içerisinde düşük devirli karıştırma ortamında homojen bir toz form elde edilinceye kadar ortalama 3 dakika karıştırılmıştır. Sonrasında belirlenen sabit su/çimento oranında karışıma karma suyu eklenerek karıştırma işlemine 3 dakika boyunca topaklanma olmaksızın homojen bir karışım elde edilinceye kadar

karıştırılmaya devam edilmiştir. Elde edilen taze harç yaklaşık 3-4 dakika dinlendirilip tekrar 20 saniye kadar ilaveten karıştırıldıktan sonra yaş harç, test örneklerinin kalıplanması ve ayrıca yaş harç ölçümleri için de hazır hale getirilmiştir. Karıştırma sonrasında test örneklerinin kalıplanması 20±2°C de yaklaşık 15 dakikalık süre içerisinde yapılmıştır.

Yaş taze harç formundaki ÇEKYTS test örneklerinin öncelikle yayılma tablası yöntemi kullanılarak mm biriminde yayılma değerleri kıvam değerlendirmelerinin yapılabilmesi amacıyla yapılmıştır. Test örneklerinin TS EN 13813 standardında [2] öngörülen eğilme dayanımı, basınç dayanımı aşınma direnci gibi parametrelere uygunluğunu test etmek amacıyla iki farklı boyut grubunda ÇEKYTS test örnekleri hazırlanmıştır. Her bir karışımdan 71x71x71 mm³ boyutlu küp örneklerden 6'şar adet ve 40x40x160 mm³ boyutlu prizma formu test örneklerinden ise 25'şer adet dökümler yapılmıştır. Tüm test örnekleri dökümden 1 gün sonra kalıplardan çıkartılmış ve TS EN 13892-1 standardında [21] çimentolu şap örnekleri için öngörüldüğü üzere 20±2°C'lik bir ortamda normal kür ortamına bırakılmıştır. Tüm test örnekleri kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk 5 gün boyunca 20±2°C'lik ve %95±5 R_H nem olan bir ortamda kürlenmeye devam edilmiştir. Sonrasında 21 günlük kür süresine ulaşınca kadar benzer sıcaklık ortamı ve %65±5 R_H nemli bir ortamda kürlenme işlemi sürdürülmüş ve 21 günlük sonrası ortam nemi %50±5 R_H olacak koşulda kürlenme işlemi yapılmıştır. Hazırlanan karışımlardan TS EN 13892-1'de [21] belirtildiği şekilde hazırlanmış 40x40x160 mm³ boyutlarındaki 3'er adet numune, TS EN 13892-2'de [22] öngörüldüğü prensiple 1, 7, 28 ve 120 günlük kür sonrasında muhafaza edildiği yerden alındıktan hemen sonra öncelikle eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyi sonucunda elde edilen altışar numune, eğilme deneylerinin yapıldığı aynı gün beklemeksizin TS EN 13892-2'de [22] öngörüldüğü prensiple basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Test örneklerinin eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde döküm yüzeylerinden, kum vb. gevşek malzemeler ile olası diğer maddeler uzaklaştırılarak, deney cihazının yatak yüzeyi ve yatak plakaları temiz bir bezle silinmiş ve numune, döküm esnasında altta kalan yüzeye yük uygulanacak şekilde, ayarlama tertibatı kullanılarak deney cihazına yerleştirilerek testler uygulanmıştır. Bununla birlikte tüm test örneklerinin ASTM C642 (2017) [23] standardına göre yoğunluk ve gözeneklilik değerleri analiz edilmiştir.

Tablo 2. ÇEKYTS harcı örneklerinin analiz bulguları

Karışım	Çimento miktarı (kg/m ³)	Toplam pomza agrega oranı (%)	Toz yığın yoğunluk (kg/m ³)	Yaş harç yoğunluğu (kg/m ³)	Sertleşmiş harç yoğunluğu (kg/m ³)	Yayılma değeri "kıvam" (mm)	Gözeneklilik oranı (%)
SD1	430	39.3	1002	1377	1156	225	11.33
SD2	410	40.8	990	1347	1141	220	14.46
SD3	390	42.3	988	1338	1132	216	16.26
SD4	370	43.9	977	1304	1128	209	18.47
SD5	350	45.4	969	1289	1111	202	19.39
SD6	340	46.2	970	1288	1113	193	19.59
SD7	320	47.8	965	1257	1100	188	19.92
SD8	310	48.6	958	1252	1094	185	20.28
SD9	300	49.4	957	1248	1093	174	20.59
SD10	280	51.0	946	1217	1080	166	20.94

Pomza agrega kullanımının kendiliğinden yayılan şap harcının uygulama alanında aşınan yüzeylerde kullanımı düşünülerek, her bir test örneğinin 28 günlük kür sonrası 71x71x71 mm boyutlu küp örnekler üzerinde TS EN 13892-3'e [24] göre Böhme aşınma direnci analizleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular "cm³/50 cm²" biriminde aşınma miktarları olarak tanımlanmıştır. Aşınma direnci özelliğine benzer şekilde, şap harcının uygulama alanında aşınan yüzeylerde kullanımı düşünülerek yüzey sertliği değerinin de analizi tasarlanmış olup, TS EN 13892-6 [25] standardına göre 40x40x160 mm³ boyutlarındaki 3'er adet numune üzerinde her bir test serisinin yüzey sertliği değerleri "MPa" biriminde analiz edilmiştir. Ayrıca her bir ÇEKYTS test serisine ait 28 gün kür sonrası büzülme ve şişme değerleri (rötre) TS EN 13454-2 standardına [26] göre 40x40x160 mm boyutlarındaki 3'er adet numune kullanılarak "mm/m" biriminde analiz edilmiştir.

3 Araştırma bulguları ve tartışma

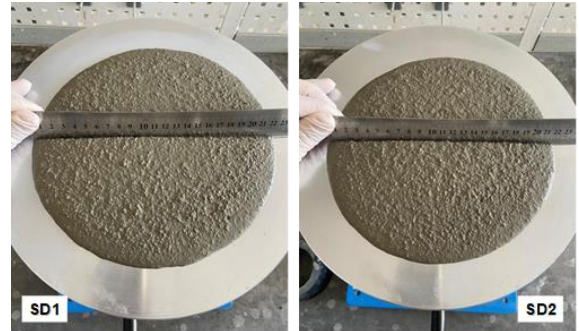
Çimento esaslı kendiliğinden yayılan şap harcının üretiminde ince boyut pomza agrega kullanımının harcın performansına etkisinin analizi amacıyla farklı alternatif karışım tasarımlarında hazırlanan test örneklerinin bazı teknik bulguları Tablo 2'de verilmiştir.

3.1 Harç karışımlarının özellikleri

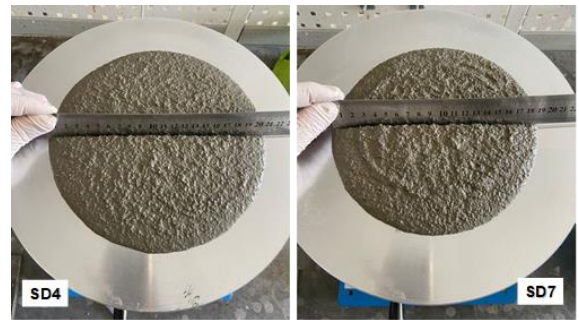
ÇEKYTS harcı örneklerinin toz yığın yoğunluk değerleri artan çimento dozajına bağlı olarak 946 kg/m³ ile 1002 kg/m³ aralığında değişmektedir. En yüksek çimento kullanım oranlı karışım (SD1) ile en düşük çimento kullanım oranlı karışım (SD10) arasında pomza agrega oranındaki toplam %29.8'lik artışa paralel olarak şap harcı örneklerinin toz yığın yoğunluk değerinde %5.6'lık bir düşüş, diğer bir değişle hafifleme oluşmuştur. Benzer şekilde, bu harç karışımları sabit w/c=0.55 oranında su ile karıldığında yaş formdaki yoğunluk değerleri ise artan çimento dozajına bağlı olarak 1217 kg/m³ (SD10) – 1377 kg/m³ (SD1) aralığında değişim göstermektedir. En yüksek çimento kullanım oranlı karışım (SD1) ile en düşük çimento kullanım oranlı karışım (SD10) arasında yaş şap harcı örneklerinin yoğunluk değerinde %11.6'lık bir azalma olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak, artan pomza agrega oranına bağlı harcın gözeneklilik değerinin artması ve yaş harcın karma suyu sonrasında

sıkışabilirlik kabiliyetinin düşerek görece daha yüksek hacim oluşturması olduğu düşünülmektedir.

Sabit w/c oranında karışımları yapılan ÇEKYTS harcı örneklerinin yayılma değerleri ise karışımdaki pomza agrega oranının artışına bağlı 225 mm'den 180 mm'ye kadar azaldığı görülmektedir. Artan pomza agrega oranına karşın, karışımdaki çimento oranındaki azalma miktarı, harcın yayılma miktarını düşürmektedir. Yayılma ve kıvamın daha yüksek değerlerde olabilmesi için karma suyu miktarının ya da melamin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı toz katkı miktarının artırımı düşünülebilir. Farklı çimento dozajlarında hazırlanmış ÇEKYTS harcının taze harç formu ve kıvam durumları Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan toplam ağırlıkça pomza agrega miktarına karşın harç örneklerinin yayılma değerleri değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. SD1 ve SD2 karışımlarına ait harç kıvamı ve genel görünümü

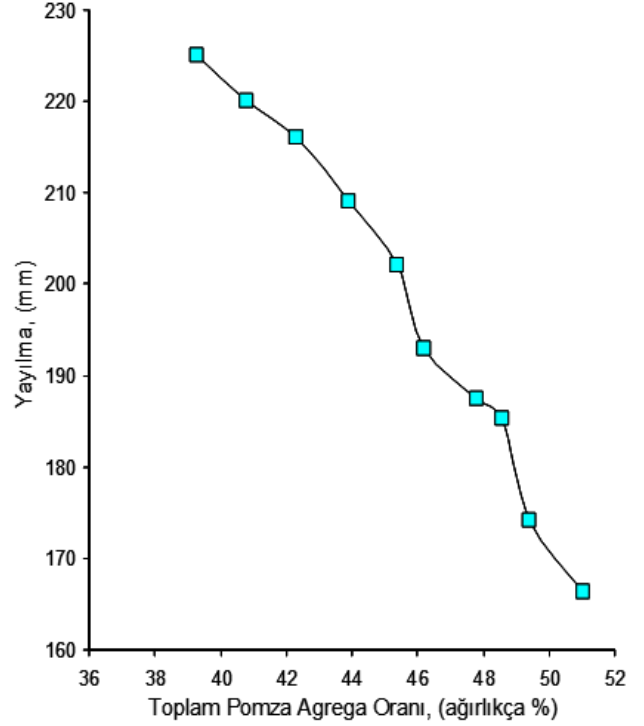


Şekil 4. SD4 ve SD7 karışımlarına ait harç kıvamı ve genel görünümü

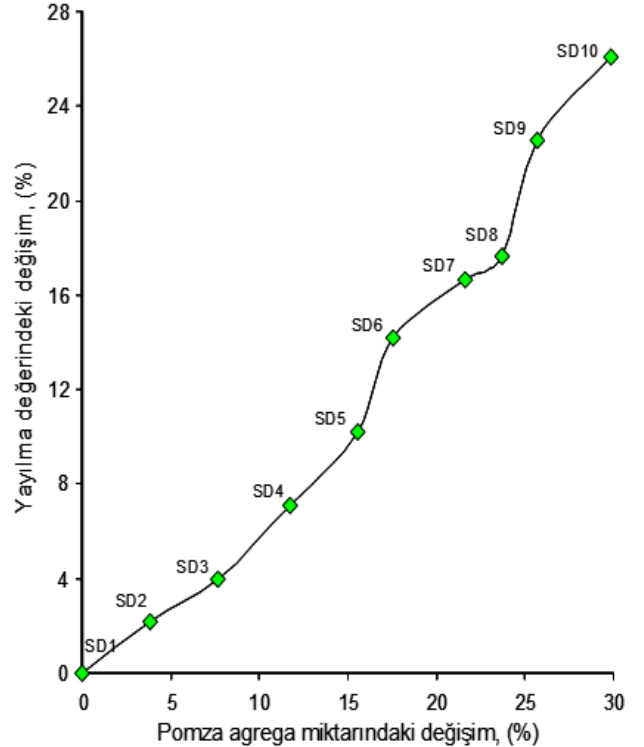
Kıvam analizlerinden görüleceği üzere, karışımdaki pomza agrega miktarı arttıkça, pomza malzeme bileşeni içerisinde 1-3 mm boyut oranının da artmasına paralel olarak sabit su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı oranı sebebiyle harcın akıcılığı azalmaktadır. Bunda en büyük etken olan parametrenin iri tane miktarının artış olduğu kadar, pomza agreganın doğal gözenekliliği sebebiyle matris yapının daha gözenekli bir form kazanması, daha yüksek karma suyu ihtiyacını ortaya koymaktadır. Gözeneklilik artışı, karma suyunun büyük bir bölümünü agrega gözeneklerine emilmesini sağlayarak, harç kıvamının akıcılık özelliğini olumsuz yönde etkilemekte ve harcın yayılma değerinin <170 mm'nin altına düştüğü değerlerde kendiliğinden yerleşme kabiliyetini çoğunlukla kaybettiği tecrübe edinilmiştir (Şekil 5). Bu bağlamda ÇEKYTŞ yaş harç örnekleri irdelendiğinde SD10 kodlu ve 280 kg/m³ çimento dozajlı test örneğinin yayılma değeri, tasarımılanan şap harcının kendinden yayılan harç formunu tam olarak sağlayamadığı görülmektedir. Çalışma kapsamında 225 mm'lik değerle en yüksek yayılma değerini sağlayan SD1 kodlu karışım, referans değer olarak ele alındığında; SD2 kodlu karışımındaki toplam pomza agrega oranı SD1'e göre %3.8 oranında artarken yayılma değeri ise %2.2 oranında azalmıştır. Benzer şekilde SD5 kodlu karışımındaki toplam pomza agrega oranı SD1'e göre %15.5 oranında artarken yayılma değeri ise %10.2 oranında azalmıştır. En düşük yayılma değerinin elde edildiği SD10 karışımındaki toplam pomza agrega oranı SD1'e göre %29.8 oranında artarken yayılma değeri ise %26 oranında azalmıştır. Bu değerler genel bir eğilim olarak ÇEKYTŞ test örneklerinde yer alan pomza agrega oranı artışının yayılma değerlerinde önemli bir azalmaya neden olduğu görülmektedir (Şekil 6).

Tablo 2'den görüldüğü üzere, 430 kg/m³ çimento dozajlı ve yayılma değeri en yüksek olan şap harcı karışımının (SD1) kapalı ve açık gözeneklerin oluşturduğu toplam gözeneklilik oranı %11.33 ve 28 gün kür sonrası sertleşmiş harcın birim hacim kütlesi ise 1156 kg/m³ olarak belirlenmiş. Pomzanın harç bileşiminde yer alması, agreganın doğal gözenekli yapısı sebebiyle kullanım oranına göre değişmekle birlikte, iri pomza malzeme miktarı arttıkça harcın toplam gözeneklilik değeri de artmaktadır. ÇEKYTŞ harcı test örneklerinin çimento dozajına bağlı gözeneklilik oranı %11.33 ile %20.94 arasında değişmektedir. Pomza agrega miktarı arttıkça harç örneklerinin gözeneklilik oranı da regresyonel bir eğilimle artmaktadır. Pomza bileşenli kendiliğinden yayılan şap harcı örneklerinin toplam karışımdaki pomza agrega malzeme oranı "PA" ile toplam gözeneklilik "δ" değişimi arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca, harç örneklerinde gözeneklilik oranının artması 28 gün kür sonrası sertleşmiş harcın birim hacim kütle değerlerinin de azalmasına neden olmaktadır. Pomza bileşenli kendiliğinden yayılan şap harcı örneklerinin toplam gözeneklilik "δ" oranı ile sertleşmiş harç birim hacim kütle (BHK) değişimi arasındaki ilişki ise grafiksel olarak Şekil 8'de verilmiştir. Şap harcı örneklerinde gözenekliliğin artması ve buna bağlı olarak yoğunluk değerinin azalması, harcın mekanik özelliklerini azaltıcı etken bir rol oynayacağı da kaçınılmaz olmaktadır. Grafiksel analizlerden görüldüğü

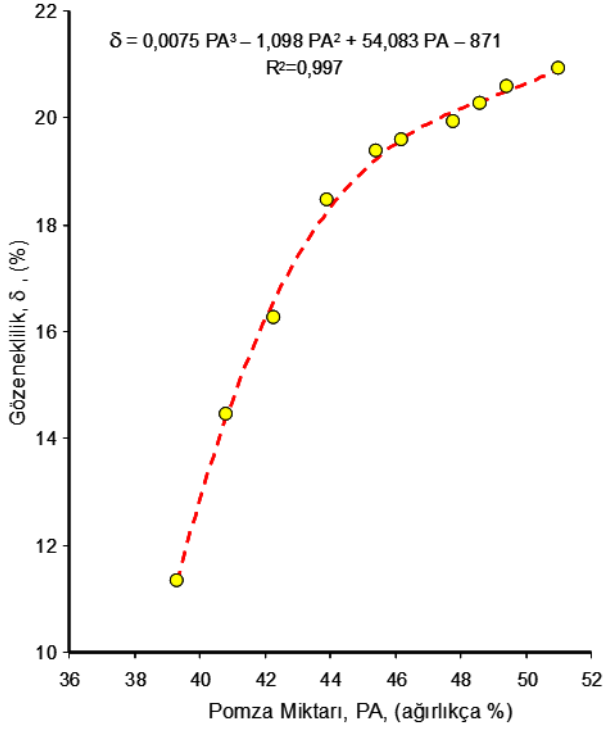
üzere, karışım tasarımında pomza miktarı arttıkça, sertleşmiş harcın toplam gözeneklilik oranı azalmaktadır.



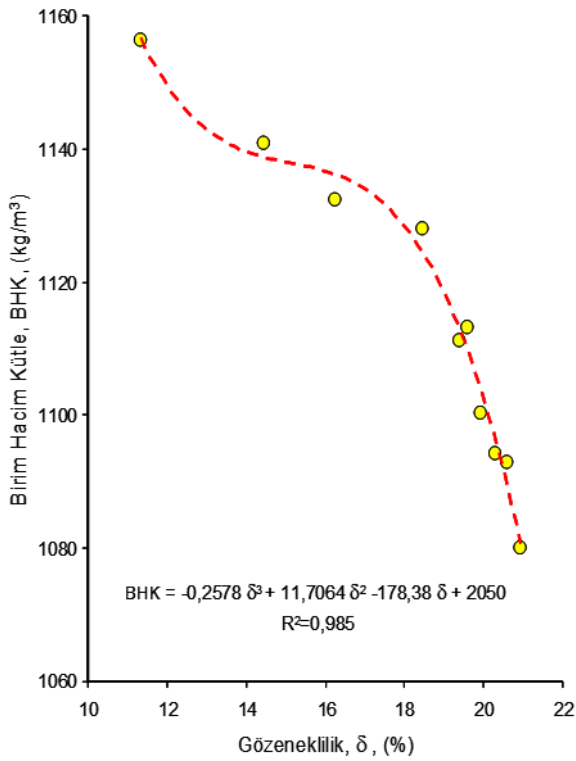
Şekil 5. Pomza agrega - harç yayılma değeri ilişkisi



Şekil 6. Pomza - yayılma değerlerindeki değişim ilişkisi



Şekil 7. Pomza oranı 'PA'-gözeneklilik oranı 'δ' ilişkisi



Şekil 8. Gözeneklilik oranı 'δ' - BHK ilişkisi

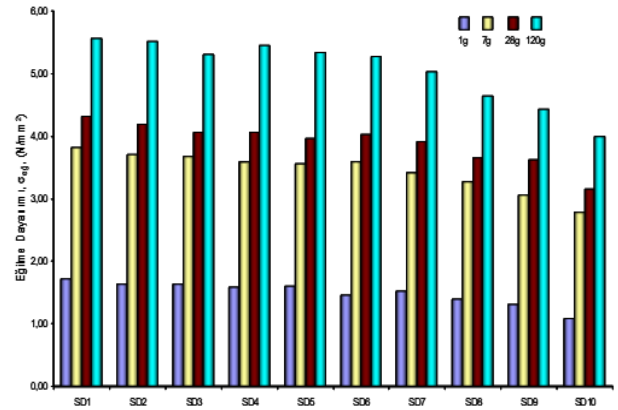
3.2 Mekanik özellikler

ÇEKYTS test örneklerinin mekanik özellikleri TS EN 13892-2 standardında [22] öngörülen prensiplere göre iki ayrı parametre bağlamında irdelenmiştir. Bunlar: *Eğilme dayanımı* ve *basınç dayanımı*. Her bir karışım tasarımı için 40x40x160 mm boyutlu prizma formu hazırlanmış

örneklerden 3'er adet numune TS EN 13892-2'e göre öncelikle 1, 7, 28 ve 120. gün kür sonrası eğilme dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Eğilme dayanımı sonrası ÇEKYTS test örneklerinin sembolik genel görünüşleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Eğilme dayanımı analizinde numuneler tek noktadan yüklemeye tabi tutulmuştur. Örneklerde kullanılan lif takviyesi sayesinde nispeten sünek kırılma gerçekleşmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi beklendiği üzere kırılma örneklerin yüklemeye düzlemi olan ve en büyük momentin olduğu orta noktadan gerçekleşmiştir. Analizlerde elde edilen eğilme dayanımı değerleri ise kürleme gün sürelerine bağlı olarak Şekil 10'da verilmiştir. Buradaki eğilme dayanım değerleri her bir seriden üçer adet test örneğinin bulgularının ortalamasını temsil etmektedir.



Şekil 9. Eğilme dayanımı sonrası ÇEKYTS test örneklerinin sembolik genel görünüşü

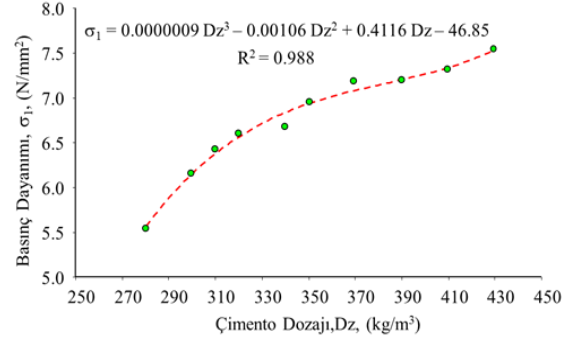


Şekil 10. ÇEKYTS test örneklerinin eğilme dayanımı analizi

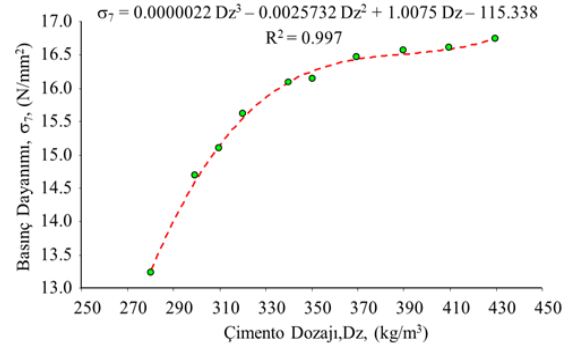
Her bir karışımın eğilme dayanım değerleri zamana bağlı olarak artmıştır. En yüksek çimento dozajı kullanımı ve en düşük miktarda pomza agrega kullanımlı SD1 harcı karışımın zamana bağlı eğilme dayanım değerleri 1, 7, 28 ve 120. günde sırasıyla 1.72, 3.81, 4.32 ve 5.57 N/mm² değerlerine ulaşmıştır. Karışımındaki toplam pomza agrega oranı arttıkça, eğilme dayanımlarının da düştüğü görülmektedir. SD1 karışım tasarımı bu çalışmada diğer karışımlardaki malzeme bileşenlerinin etkisinin mukayesesi açısından referans karışım olarak ele alındığında, çimento dozajı azaldıkça eğilme dayanımının da düştüğü belirlenmiştir. Eğilme dayanımlarındaki düşme oranı, şap

harcı örneğinin kür süresine bağlı olarak da gelişim göstermekte olup, 1 gün kür sonrası ÇEKYTS test örneklerinin SD1 örneğine göre eğilme dayanım değişimleri %5.2 - %36.98 oranında çimento dozajına bağlı olarak azalma eğilimi göstermektedir. Bununla birlikte, benzer olgu 7 gün kür sonrası ÇEKYTS test örneklerinin SD1 örneğine göre eğilme dayanım değişimleri ise %2.77 - %27.17 oranında çimento dozajına bağlı olarak azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. TS EN 13892-2 standardında [19] göre çimento esaslı şap harçlarının eğilme dayanımları için "F" sınıflama sistemi öngörülmüştür. Bu sınıflamaya göre 28 günlük test örneklerinin eğilme dayanımları irdelendiğinde SD1-SD4 karışımlarının (430 kg/m³ - 370 kg/m³ arası çimento dozajlı) eğilme dayanımları F4 sınıfında yer alıp >4 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Ancak 350 kg/m³ doz ve daha düşük çimento oranlı ÇEKYTS test örneklerinin 28 günlük eğilme dayanımlarının F3 sınıfında yer alıp >3 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, karışımlardaki pomza agrega miktarı arttıkça, matris yapının gözenekliliğinin artışı ve birim yoğunluğunun düşüşünün de bir sonucu olarak eğilme dayanımlarının düştüğünü göstermektedir. Çalışma kapsamında uzun zaman periyodunda tüm test örneklerinin eğilme dayanım değerlerinin mukavemet kazandığı gözlenmiş olup, bu periyodu temsilen 120 gün sonrası eğilme dayanımları analiz edilerek karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre ÇEKYTS test örneklerinin eğilme dayanımları azalan çimento dozajı bağlamında 5.57 N/mm² - 4.00 N/mm² aralığında değişim göstermektedir. SD1 karışımı referans değer olarak ele alındığında, diğer karışımların eğilme dayanımlarının sırasıyla %0.94, %4.58, %2.02, %4.04, %5.39, %9.70, %16.71, %20.35 ve %28.17 oranlarında düştüğü görülmüştür. Buna göre SD1 - SD7 karışımları (430 kg/m³ - 320 kg/m³ arası çimento dozajlı) eğilme dayanımları F5 sınıfında yer alıp >5 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, 28 günlük kür süresine göre SD1-SD4 karışımları F4 sınıfında yer alırken, 120 gün sonrası eğilme dayanımları F5 sınıfına yükselmiştir. Benzer şekilde 28 günlük kür süresine göre SD5-SD7 karışımları F3 sınıfında yer alırken, 120 gün sonrası eğilme dayanımları 2 sınıf birden dayanım kazanarak F5 sınıfına yükselmiştir. Bu dayanım kazanmadaki esas etken olgunun, pomza agreganın gözenekli yapısı sebebiyle bünyede tuttuğu su miktarının, uzun zaman periyodunda çimentonun hidrasyonunda dayanım kazandırıcı mineral oluşumlarının gelişmesine ve miktarlarının artmasına katkıda bulunması olduğu düşünülmektedir.

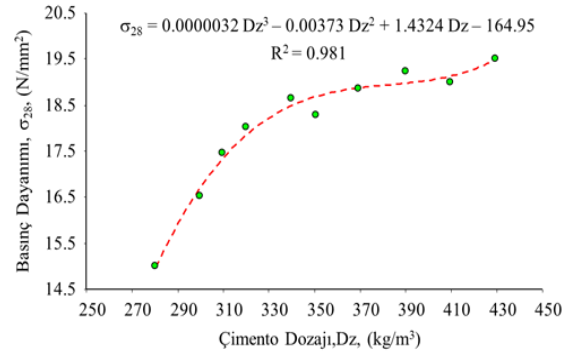
Eğilme deneyi sonucunda her bir karışım serisine ait elde edilen altışar numune, eğilme deneylerinin yapıldığı aynı gün beklemeksizin TS EN 13892-2'de [22] öngörüldüğü prensiple basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Böylece her bir seri için 1, 7, 28 ve 120 gün kür sonrası karışım tasarımlarına ilişkin basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Analizlerde elde edilen basınç dayanımı değerleri, 1, 7, 28 ve 120 günlük dört ayrı kür süresinde çimento dozajı (DZ) ve basınç dayanım ilişkileri grafiksel gösterimler sırasıyla Şekil 11 - Şekil 14'te verilmiştir. Buradaki basınç dayanım değerleri her bir seriden altışar adet test örneğinin bulgularının ortalamasını temsil etmektedir.



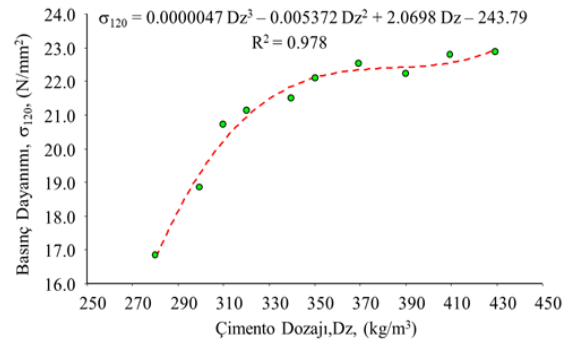
Şekil 11. ÇEKYTS test örneklerinin 1 gün kür sonrası basınç dayanımı analizi



Şekil 12. ÇEKYTS test örneklerinin 7 gün kür sonrası basınç dayanımı analizi



Şekil 13. ÇEKYTS test örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanımı analizi



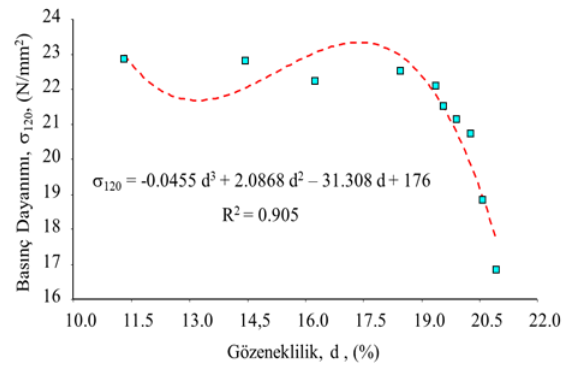
Şekil 14. ÇEKYTS test örneklerinin 120 gün kür sonrası basınç dayanımı analizi

Her bir karışımın basınç dayanım değerleri, eğilme dayanımında olduğu gibi zamana bağlı olarak artmıştır. En yüksek çimento dozajı kullanımı ve en düşük miktarda pomza agrega kullanımlı SD1 harcı karışımın zamana bağlı basınç dayanım değerleri 1, 7, 28 ve 120. günde sırasıyla 7.54, 16.74, 19.5 ve 22.86 N/mm² değerlerine ulaşmıştır. Bununla birlikte, SD1-SD10 karışımlarında çimento miktarının azalması buna karşın pomza agrega malzeme miktarının artışı dayanım değerlerini düşürmüştür. Test örneklerinin 1 günlük kür sonrası kazanmış oldukları dayanım değerleri açısından SD1-SD10 karışımları bağlamında basınç dayanımları 7.54 N/mm²'den 5.54 N/mm² değerine kadar (%26.44'lük değişimle) azalarak değişim göstermiştir. Diğer bir değişle SD1 ve SD10 numuneleri baz alındığında pomza malzeme miktarındaki %29.8'lik artış, basınç dayanımının ortalama %26.44'lük düşüşüne sebep olmuştur. Benzer eğilim 7 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri için de tecrübe edinilmiş olup, SD1-SD10 karışımları bağlamında basınç dayanımları 16.74 N/mm²'den 13.23 N/mm² değerine kadar (%20.97'lik değişimle) azalarak değişim göstermiştir. 1 gün kür sonrası dayanım değerlerindeki değişim trendi (Şekil 11) yakınsak olarak irdelendiğinde özellikle 230 kg/m³ - 430 kg/m³ çimento miktarı aralığındaki değişimin test örneklerinin dayanım iyileşmesinde lineer kabul edilebilecek bir artış oranıyla geliştiği görülmektedir. Buna karşın 7 gün kür sonrası dayanım değerlerindeki değişim trendi (Şekil 12) ise yakınsak olarak irdelendiğinde özellikle 340 kg/m³ çimento miktarından sonraki artan bağlayıcı oranlarında dayanım değişiminin daha düşük bir eğilimle artış göstermiştir. Ancak, 280 kg/m³ - 340 kg/m³ çimento miktarı aralığında ise dayanım değişiminin daha yüksek oranlarda olduğu tecrübe edinilmiştir. Buradaki bulgulardan karışımındaki toplam pomza agrega oranının sertleşmiş şap harcının mukavemetinde önemli bir parametre olduğu görülmekle birlikte, elde edilen değerler bağlamında basınç dayanımlarının yüksek olduğu öngörülebilir. TS EN 13892-2 standardında [22] göre çimento esaslı şap harçlarının basınç dayanımları için "C" sınıflama sistemi öngörülmüştür. Bu sınıflamaya göre 28 günlük test örneklerinin basınç dayanımları irdelendiğinde SD1-SD3 karışımlarının (430 kg/m³ - 390 kg/m³ arası çimento dozajlı) basınç dayanımları C19 sınıfında yer alıp >19 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Ancak 370 kg/m³ - 320 kg/m³ doz çimento oranlı ÇEKYTS test örneklerinin 28 günlük basınç dayanımlarının C18 sınıfında yer alıp >18 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir değişle, karışımlardaki pomza agrega miktarı arttıkça, matris yapının gözenekliliğinin artışı ve birim yoğunluğunun düşüşünün de bir sonucu olarak basınç dayanımlarının düştüğünü göstermektedir. Diğer SD8, SD9 ve SD10 karışım serilerinde ise basınç dayanım sınıfı sırasıyla C17, C16 ve C15 olarak değişmektedir.

Çalışma kapsamında uzun zaman periyodunda tüm test örneklerinin basınç dayanım değerlerinin eğilme dayanımında da görüldüğü üzere mukavemet kazandığı gözlenmiş olup, bu periyodu temsilen 120 gün sonrası basınç dayanımları analiz edilerek karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre ÇEKYTS test örneklerinin basınç

dayanımları azalan çimento dozajı bağlamında 22.86 N/mm² - 16.83 N/mm² aralığında değişim göstermektedir. SD1 karışımı referans değer olarak ele alındığında, diğer karışımların basınç dayanımlarının sırasıyla %0.31, %2.88, %1.5, %3.4, %6.03, %7.59, %9.37, %17.61 ve %26.4 oranlarında düştüğü görülmüştür. Buna göre SD1 - SD5 karışımları (430 kg/m³ - 350 kg/m³ arası çimento dozajlı) basınç dayanımları C22 sınıfında yer alıp >22 N/mm²'den büyük olduğu belirlenmiştir. Diğer bir değişle, 28 günlük kür süresine göre SD1-SD3 karışımları C19 sınıfında ve SD4 - SD5 karışımları C18 sınıfında yer alırken, 120 gün kür sonrası bu karışımların basınç dayanımları C22 sınıfına yükselmiştir. Benzer şekilde 28 günlük kür süresine göre SD6 ve SD7 karışımları C18 sınıfında yer alırken, 120 gün kür sonrası basınç dayanımları 2 sınıf birden dayanım kazanarak C21 sınıfına yükselmiştir. Benzer dayanım kazanım eğilimi SD 8, SD9 ve SD10 karışımları içinde gözlenmiş olup, sırasıyla C20, C18 ve C16 sınıflarına ulaşmış olduğu görülmektedir. Bu dayanım kazanmadaki esas etken olgunun, pomza agreganın gözenekli yapısı sebebiyle bünyede tuttuğu su miktarının, uzun zaman periyodunda çimentonun hidrasyonunda dayanım kazandırıcı mineral oluşumlarının gelişmesine ve miktarlarının artmasına katkıda bulunması olduğu düşünülmektedir.

Test örneklerinde matris yapıdaki gözeneklilik oranının "δ" şap harcın basınç dayanımına doğrudan etken bir faktör olduğu belirlenmiş olup, bu etkileşim 120 günlük harç örneklerinin dayanımı "σ₁₂₀" için grafiksel olarak Şekil 15'te verilmiştir. Bu analizden görüldüğü üzere, harcın matris yapısında toplam gözeneklilik artışı dayanımı düşürücü bir rol üstlenmiştir. Matris yapıda %19'luk bir gözeneklilik oranının oluşmasından sonra ileri yaşlarda dahi şap harcı dayanımını önemli düzeylerde düştüğü ve zayıfladığı görülmüştür. Buradan edinilen genel tecrübe, gözenekli agregalarla üretilen ve kendiliğinden yayılan şap harcı formları için yüksek mukavemet elde etmek amaçlandığında matris yapının toplam gözeneklilik oranını minimum seviyede tutabilecek agrega miktar ve boyutlarının optimize edilmesi gerektiğidir. Bu yaklaşım bağlamında pomza agrega kullanımlı şap harçlarında matris yapının gözenekliliğinin %19'dan daha düşük düzeylerde tutulabilmesi önem kazanmaktadır.

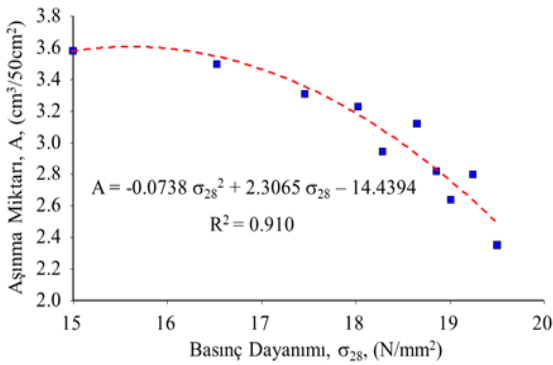


Şekil 15. Test örneklerinin gözeneklilik oranı 'δ' - basınç dayanımı ilişkisi 'σ₁₂₀' (120 gün)

3.3 Aşınma özellikleri

Kendiliğinden yayılan şap uygulamalarının yapıldığı uygulama alanının yüzeyi serbest kullanıma açık formda olduğu durumlarda, aşınma olgusunun incelenmesi sertleşmiş şap harcının kalitesi ve dayanıklılığı için bozulmaya ve erken bozulmaya yol açan en öncelikli parametrelerden biridir. Şap performansları daha yaygın olarak basınç ve/veya eğilme dayanımları gibi mekanik özellikler üzerinden irdelenmektedir [27]. TS EN 13813 standardına [2] göre çimento esaslı şap malzemeleri ve zemine uygulanan şaplar için basınç ve eğilme dayanımları yanı sıra aşınma özelliğinin tanımlanması da zorunlu bir analiz olarak öngörülmüştür. Ancak, çimento esaslı şap harçlarının aşınma direnci aslında sertleşmiş şap harcının en az araştırılan dayanıklılık özelliklerinden birisi olarak da literatürde görülmektedir. Bu bağlamda, TS EN 13813 standardına göre şap harcının *aşınma miktarı* ve *aşınma direnç sınıfının* belirlenmesi için üç alternatif test yöntemi önerilmiştir. Bunlar: *Böhme aşınma direnci testi*, *BCA aşınma direnci testi* ve *dönen tekerleğe karşı aşınma direnci testidir*. Bu çalışma kapsamında tüm ÇEKYTS test örneklerinin aşınma miktarı, TS EN 13892-3 standardında [24] öngörülen prensiple Böhme aşınma direnci test yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu test yönteminde aşınma kaybı, prensip olarak harç örneklerinin yüzeylerinin aşındırıcı maddelerle sürtünmesiyle oluşan hacimsel azalması prensibine dayanmaktadır. Genellikle inşaat proje uygulamalarında özellikle açık yüzeyli sertleşmiş şap birimleri aşınma olayının etkisinde kalırlar. Bu nedenle merdiven basamakları ve döşemeler vb. gibi yerlerde kullanılan şap malzemeler aşınmaya dayanıklı olmalıdır. Bu malzemelerin aşınmaya karşı olan dirençlerinin belirlenmesi, şap malzemenin durabilitesi açısından da önem arz etmektedir.

Pek çok araştırmacı, aşınma miktarı ile basınç dayanımı arasında genel bir eğilim olduğu konusunda hem fikir olup, çimento esaslı beton ve harç dayanımının artırılmasının aşınmanın etkilerini azaltıcı önemli bir etken olduğunu göstermişlerdir [28-30]. Pomza agrega kullanımlı ÇEKYTS test örneklerinin 28 günlük kür sonrası 71x71x71 mm³ boyutlu hazırlanmış küp örnekleri üzerinde TS EN 13892-3'e göre Böhme aşınma direnci analizleri yapılmıştır.

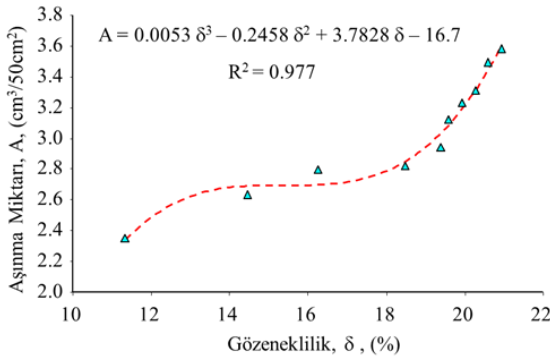


Şekil 16. Test örneklerinin basınç dayanımı- aşınma miktarı ilişkisi (28. gün)

Elde edilen bulgular “cm³/50 cm²” biriminde aşınma miktarları olarak tanımlanmış olup, karışım tasarımlarına ait 28 günlük basınç dayanımları ile aşınma miktarı arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 16’da verilmiştir.

Şekil 16 irdelendiğinde görüldüğü üzere, basınç dayanımı ile aşınma miktarı arasında hafif asimptotik bir ilişkinin varlığından söz edilebilir. Bu incelemede elde edilen tecrübe, şap harcının basınç dayanımındaki nispeten düşük bir artış, malzemenin aşınma direncinde büyük bir değişime neden olduğudur. Özellikle şap harcının basınç dayanımı >17.5 N/mm²’nin üzerindeki değerler olarak geliştiğinde, şap harcının aşınmaya karşı çok daha yüksek bir direnç kazandığı görülmektedir. Farklı malzeme bileşenleriyle üretilmiş çimento esaslı alternatif şap malzemelerinde benzer dayanım değerlerine karşın çok daha düşük değerlerde aşınmaya karşı direnç özellikleri görülebilmektedir. Ancak, pomza agregası bileşenli şap harçlarında pomza malzemenin doğasında yer alan yüksek silis içeriği, şap malzeme yüzeyini aşınmaya karşı çok daha yüksek bir direnç özelliği kazandırdığı düşünülmektedir. TS EN 13813 standardında [2] çimento esaslı şap harçlarının aşınma direnci için “A” sınıflama sistemi öngörülmüştür. Bu sınıflamaya göre 28 günlük test örneklerinin aşınma miktarı irdelendiğinde SD1 karışımının aşınma direnci A2.5 sınıfında yer almaktadır (A=2.35 m³/50cm²). Aşınma miktarı değerinin sayısal büyüklüğü ne kadar düşük ise malzemenin aşınmaya karşı dirençliliği o derece yüksektir anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, SD1 harcı çalışma kapsamındaki aşınmaya karşı en yüksek dirençli şap tasarımı olarak görülmektedir. Bununla birlikte SD2 – SD5 aralığındaki örneklerin ise aşınma direnç sınıfı A3 olduğu belirlenmiştir. Diğer serilerden SD6 – SD10 karışımlarının aşınma direnç sınıfının ise A3.5 olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamındaki şap harcı tasarımlarında doğal gözenekli pomza agregası kullanımı sebebiyle, matris yapıda oluşan toplam gözenekliliğin de şap harcının aşınma miktarını etkileyebilecek önemli bir parametre olduğu düşünülmüştür. Bu bağlamda, tüm test örneklerinin belirlenen gözeneklilik oranı ile aşınma miktarı değerleri arasındaki ilişki istatistiksel olarak irdelenmiş olup, parabolik bir ilişkinin varlığı gözlenmiştir (Şekil 17). Şap harcı örneklerinin gözeneklilik oranı arttıkça genel bir eğilim olarak aşınma miktarı da artmaktadır. Özellikle %18.5 gözeneklilik oranından daha yüksek gözenekliliğe sahip olan matris yapıların hacimsel veri bağlamında aşınma miktarlarının da hızla arttığı, aşınmaya karşı daha dirençsiz bir forma dönüştüğü görülmektedir. Gözenekliliğin yüksek oluşu aynı zamanda, malzeme yüzeylerinde daha belirgin formlarda açık gözeneklerin varlığı ve bu sebeple malzeme yüzeylerinden daha kolay bir şekilde partiküllerin koparak/ayırarak daha kolay bir şekilde deforme olmasına neden olmuştur.



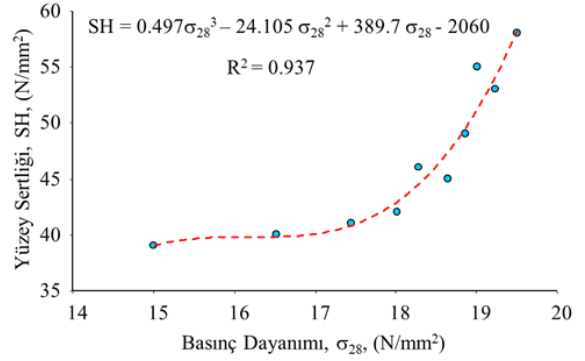
Şekil 17. Test örneklerinin gözeneklilik - aşınma miktarı ilişkisi

3.4 Yüzey sertliği özellikleri

Çimento esaslı şap malzemelerde yüzey sertliği özelliği genellikle opsiyonel bir parametre olarak ele alınmaktadır. Bu öngörü TS EN 13813'de de açıkça beyan edilmiştir. Ancak <4 mm'den daha düşük boyut fraksiyonunda ince agrega içeren şap malzemeler için yüzey sertliği özelliğinin de irdelenmesi gerekliliği tavsiye olunmaktadır. Bu bağlamda tüm ÇEKYTS test örneklerinin hazırlanmasında kullanılan malzeme boyutlarının tamamı <4 mm olduğu için, bu çalışma kapsamında 28 gün kür sonrası her bir seriden 3'er adet örneğin yüzey sertliği özelliği TS EN 13892-6 standardında [22] öngörüldüğü prensiple analiz edilmiştir. ÇEKYTS test örneklerinin yüzey sertliği, SD1 karışımı için 58 N/mm² olarak belirlenmiştir. Bu değer, çalışmadaki şap örneklerinin elde edilen en yüksek yüzey sertliği değeridir. Karışım tasarımlarında artan pomza agrega miktarına (azalan çimento oranı) bağlı test örneklerinin yüzey sertliği değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu bağlamda, diğer karışım serilerinin (SD2 – SD10) yüzey sertliği değerleri 55 N/mm²'den 39 N/mm²'e ye kadar azalmıştır. Bunda en etken parametrenin pomza agrega miktarına bağlı birim hacim ağırlığının ve dolayısıyla basınç dayanım değerlerinin düşmesi olduğu tecrübe edinilmiştir. TS EN 13813 standardında çimento esaslı şap harçlarının yüzey sertliği sınıflaması için "SH" sınıflama sistemi öngörülmüştür. Bu sınıflamaya göre 28 günlük test örneklerinin yüzey sertliği irdelendiğinde SD1-SD3 karışımlarının yüzey sertliği SH50 sınıfında yer almaktadır (yüzey sertlikleri sırasıyla 58, 55 ve 53 N/mm²). Yüzey sertliği değerinin sayısal büyüklüğü ne kadar büyük ise malzemenin yüzey bozulmalarına ve deformasyonlara karşın dirençliliği o derece yüksektir anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, SD1 harcı çalışma kapsamındaki yüzey bozulmalarına ve deformasyonlara karşın en yüksek dirençli şap tasarımı olarak görülmektedir. Bununla birlikte SD4 – SD9 aralığındaki örneklerin ise yüzey sertliği sınıfı SH40 olarak öngörülebilmektedir. SD10 karışımının yüzey sertliği sınıfının ise SH30 olabileceği öngörülmüştür (yüzey sertlik değeri 39 N/mm²).

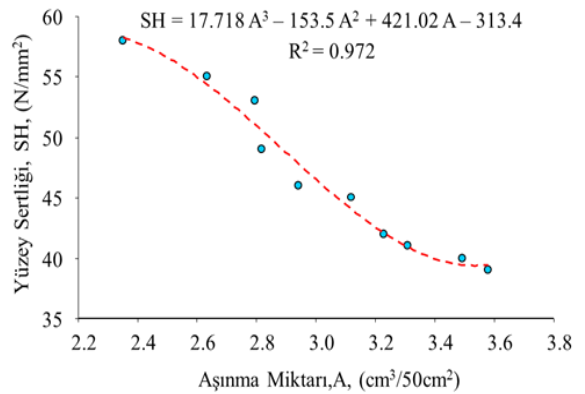
Yapılan irdelermelerde şap harcının yüzey sertliği ile basınç dayanımı arasında parabolik bir ilişkinin varlığı belirlenmiştir. Şap harcının dayanımı arttıkça, yüzey sertliği değeri de artmaktadır. ÇEKYTS test örnekleri için bu değişim Şekil 18'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu analiz bulgusunda da görüleceği üzere özellikle 17.5 N/mm²'lik

basınç dayanımından daha büyük dayanımlı şap örneklerinin yüzey sertliği önemli ölçüde iyileşme göstermektedir. Diğer bir değişle, malzemenin dayanım kazanması aynı zamanda yüzey sertliğini de geliştirerek daha dirençli bir yüzey özelliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır.



Şekil 18. Test örneklerinin basınç dayanımı – yüzey sertliği ilişkisi

Çimento esaslı şap harçlarında yüzey sertliği ile aşınma miktarı arasında istatistiksel kabul edilebilecek bir trendin olduğu düşünülmüş olup, çalışma bulguları bu bağlamda da irdelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulgulardan Şekil 19'da verilen grafiksel ilişki oluşturulmuştur.



Şekil 19. Test örneklerinin aşınma miktarı – yüzey sertliği ilişkisi

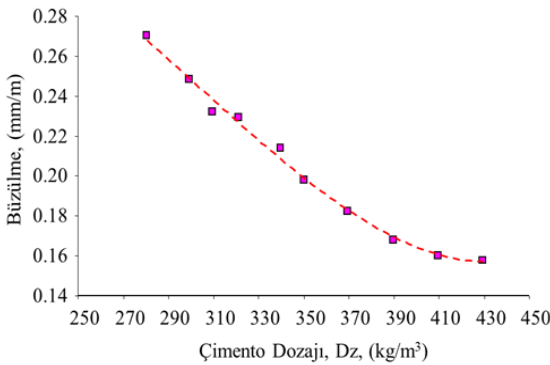
Bu analiz irdelendiğinde, şap harcının aşınma miktarı hacimsel olarak arttığında, yüzey sertliğinin de parabolik bir yaklaşımla düştüğü görülmektedir. Aşınma miktarının artışına sebep olan porozite, pomza agrega malzeme miktarının artışı, bağlayıcı malzeme miktarının düşmesi vb gibi bileşenler sebebiyle malzeme yüzeyinin daha kolay deforme olabilme olasılığı artmakta ve buna bağlı olarak da yüzey sertlinin zayıfladığı düşünülmektedir.

3.5 Rötire özellikleri

Çimento esaslı kompozit malzemelerin büzülmesi, dayanıklılıklarını etkileyen çok önemli bir faktördür. Bu, teknolojik açıdan istenmeyen bir özellik olup, bu nedenle birçok araştırma faaliyetinin konusu olmuştur [31]. Çimento esaslı harçlarda büzülme etkileyen bir dizi faktörler

sayılabilmektedir. Bunlar arasında önem kazananları harcın iç faktörleri bağlamında karışım bileşenleri olarak, bağlayıcı malzeme türü, agregalar ve kullanılan katkıları sayılabilir. Bununla birlikte, harç tasarımı ile ilgili faktörler olarak su/çimento oranı ve su miktarı, agrega özellikleri ve hacim oranı sayılabilir. Ayrıca, büzülme özelliğine etken bir diğer faktör grubu ise harcın yapımı ile ilgili olup, yerleştirme, sıkıştırma ve kütleme gibi koşullar düşünülebilir. Pratik nedenlerle, çimento matrisinin büzülmesi, harç yapısının performansı için önemli sorunlara neden olabilir. Çok yüksek büzülme, malzeme yüzeyinde görünen çatlaklara neden olabilir. Çatlak bir yüzey, zararlı ortamların malzemeye nüfuz etmesini kolaylaştırdığından, elemanların dayanıklılığını azaltır ve daha fazla tahribata yol açar [31]. Çimento esaslı kompozit matrislerde beton tasarımlarına göre rötre miktarını sınırlayan iri agrega muhteviyatı olmadığından harç rötresi çok daha yüksek değerlerde görülebilmektedir. Çimento esaslı kompozit malzeme doymamış bir buharla çevrili olarak depolandığında bünyesindeki su, malzeme yüzeyinden buharlaşarak kaybedilir. Büzülme değeri esas olarak sıcaklığa, dış ortamın nem koşullarına ve ortamdaki olası rüzgâr hızına vb. faktörlere bağlıdır. Çünkü bu parametreler suyun buharlaşma oranını etkiler [31].

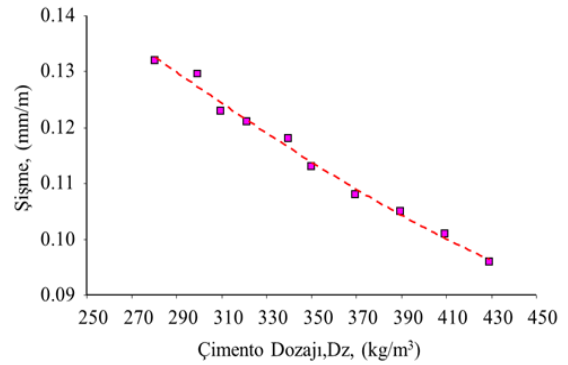
TS EN 13813 standardında mastik asfalt haricindeki şap malzemeleri için şap malzemesinin EN 13454-2'ye [26] veya tasarlanan uygulama kalınlığı 10 mm'den az olan ürünler için EN 13872'ye [32] uygun olarak analiz edilen büzülme ve şişme değerinin "mm/m" biriminde tanımlanabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, 40x40x160 mm³ boyutlarında hazırlanmış tüm ÇEKYTS test örneklerinin 28 gün sonrası EN 13454-2'ye göre büzülme ve şişme değerleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre karışımlarda artan pomza agrega miktarına bağlı olarak büzülme ve şişme özelliklerinin her ikisinde de belirgin bir artış eğilimi olduğu görülmüştür. Büzülme özelliği olarak SD1 – SD10 aralığındaki örneklerin büzülme değerleri 0.158 mm/m'den 0.270 mm/m değerine kadar artarak değişmektedir. Bu değişimde azalan çimento miktarı (artan pomza agrega miktarı) büzülme özelliğinin artmasına neden olmaktadır. Tüm ÇEKYTS test örneklerinin çimento miktarı ile büzülme değerleri arasındaki ilişki Şekil 20'de analiz edilmiştir.



Şekil 20. Karışım tasarımlarındaki çimento miktarı – büzülme değeri ilişkisi

Harcın kuruma etkisinde büzülme değerine etki eden en önemli faktörlerden birisi, harcın gözenekli yapısıdır. ÇEKYTS test örneklerinde karışımdaki artan pomza miktarı matris yapısını daha gözenekli bir forma büründürmekle birlikte, karışımda 0-1 mm boyut pomza ince malzeme miktarının da artması şap harcının rötre özelliğini olumsuz yönde etkileyerek büzülme değerinin artmasına neden olmaktadır.

Bununla birlikte, su, matris yapıdaki büyük kılcal gözeneklerden malzeme yüzeyine taşınarak nispeten kolayca buharlaşır. Bu kapiler su taşınımı olgusu, malzeme gözenekliliği arttıkça ve ayrıca matris yüzeyinin açık gözenek oranı arttıkça daha belirgin bir su buharlaşması oluşabilmektedir. Bu olgunun miktarı ve boyutu, su/çimento oranı bağlamında su miktarı ne kadar büyük olursa kuruma büzülmesi de o kadar büyük olabilmektedir. ÇEKYTS test örneklerinde pomza agrega miktarının artışı, matris yapısını daha gözenekli bir forma ulaştırmanın ötesinde, malzeme bünyesindeki suyun daha hızlı bir şekilde buharlaşmasına da sebep olabilecek ortamı oluşturmaktadır. Bu sebeple, şap harcı kurudukça, ilk olarak kapiler gözeneklerden serbest suyun hızla uzaklaştığı ve ardından şap harcının büzülmesine neden olan suyun adsorbe edildiği düşünülmektedir. Burada önemli olan bir diğer parametre de, karışımda yar alan ince madde oranı arttıkça, matris yapının rötre riski muhtemel hale gelebilmektedir. Bu olgu, aynı zamanda matris yapının gözeneklilik oranının büyüklüğünün, harç tasarımında rötre önleyici özel nitelikli ajan veya katkıların bulunmadığı durumlarda rötreyi tetikleyici bir etken olduğu da teknik olarak tecrübe edinilmiştir. Büzülme değerlerindeki etkileşime benzer şekilde şap harcı örneklerinin şişme özellikleri de karışımlardaki çimento miktarına bağlı olarak değişimi irdelenmiştir. Tüm ÇEKYTS test örneklerinin çimento miktarı ile şişme (genleşme) değerleri arasındaki ilişki Şekil 21'de analiz edilmiştir.



Şekil 21. Karışım tasarımlarındaki çimento miktarı – şişme değeri ilişkisi

Şişme, çimento esaslı harç veya beton numunelerinin sürekli ıslak koşullarda tutulduğunda meydana gelen bir özelliğidir. Sürekli ıslak ortamda kalan numuneler, birim ağırlıklarındaki artışla birlikte hacimlerinde de artış gösterebilirler. Bu gelişim beton örnekler için yaklaşık %1'e kadar değişim gösterebilmektedir [33]. Nem genleşmesi, suyun çimento jeli tarafından emilmesiyle ilgilidir, bu nedenle su parçacıkları, malzemenin ortaya çıkan

yapısındaki kohezyon kuvvetlerine karşı koyan bir etki sergiler [31]. Elde edilen bulgulara göre şişme özelliği olarak SD1 – SD10 aralığındaki örneklerin şişme değerleri 0.096 mm/m'den 0.132 mm/m değerine kadar artarak değişmektedir. Bu değişimde azalan çimento miktarı (artan pomza agregası miktarı) şişme özelliğinin artmasına neden olmaktadır. Burada önemsenen husus, şap harcı tasarımında malzemenin priz sonrası su iticilik özelliğini iyileştirecek özel nitelikli bir ajan veya katkı kullanılmadığı için, test örneklerinde pomza agregası oranının artışına bağlı olarak kapalı ve açık gözenekler oluşan artan gözeneklilik, malzeme matrisinin su emme kabiliyetini de artırıcı bir etki sergilemektedir. Bu nedenle, rutubetli veya sürekli nemli bir ortamda tutulan pomza agregalı şap harcı örneklerinin bünyeye ortamdaki su miktarının artması, buna paralel olarak özellikle agreganın kapalı gözeneklerinde bu emilen suyun uzun süre matriste hapsedilmesi, matristeki çimento jeli tarafından bu suyun emilimi şap harcının nemleşmesi veya şişme özelliğinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı tane boyut ve kullanım oranlarında pomza kullanımlı çimento esaslı tesviye şapı harçları geliştirilmiştir. Çalışma bulgularına göre,

1. Kıvam analizlerinden görüleceği üzere, karışımdaki pomza agregası miktarı arttıkça, pomza malzeme bileşeni içerisinde 1-3 mm boyut oranının da artmasına paralel olarak sabit su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı oranı sebebiyle harcın akıcılığı azalmaktadır.

2. Karışımdaki toplam pomza agregası oranı arttıkça, harcın boşluk oranı artmakta, birim hacim kütlesi azalmakta ve buna bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımlarının da düştüğü görülmektedir.

3. Çalışma kapsamında üretilen kompozit harçların TS EN 13892-2 standardında öngörülen eğilme dayanım kriterlerini sağlayabildiği görülmüştür.

4. Benzer şekilde harçların TS EN 13892-2 standardında öngörülen basınç dayanımı kriterlerini de sağlayabildiği tespit edilmiştir.

5. Harçların gözenekliliğindeki artış aşınma direncinde azalmaya sebep olmuştur. Gözenekliliğin yüksek oluşu aynı zamanda, malzeme yüzeylerinde daha belirgin formlarda açık gözeneklerin varlığı ve bu sebeple malzeme yüzeylerinden daha kolay bir şekilde partiküllerin koparak/ayırılarak daha kolay bir şekilde deforme olmasına neden olmuştur.

6. Karışım tasarımlarında artan pomza agregası miktarına (azalan çimento oranı) bağlı test örneklerinin yüzey sertliği değerlerinin azaldığı görülmüştür.

7. Test örneklerinde karışımdaki artan pomza miktarı matris yapıyı daha gözenekli bir forma büründürmekle birlikte, karışımda 0-1 mm boyut pomza ince malzeme miktarının da artması şap harcının rötre özelliğini olumsuz yönde etkileyerek büzülme değerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, azalan çimento miktarı (artan pomza agregası miktarı) şişme özelliğinin artmasına neden olmaktadır.

Çalışma kapsamında, pomza agregası miktarı artırılarak oldukça hafif kompozit harçlar üretilmiştir. Ortalama %45'den fazla pomza agregası kullanımının (340 kg/m³'den az çimento kullanımı) harcın kendiliğinden yerleşme ve mekanik özelliklerinde hızlı bir kayba neden olduğu görülmüştür. Bununla birlikte üretilen karışımlar ilgili standartlarda öngörülen kriterleri sağlayabilmesine karşın kendiliğinden yerleşme özelliği ön planda tutulduğunda SD1 ve SD2 kodlu örnekler mekanik özellikler de dahil en iyi sonucu vermektedir.

Bu çalışma ile pomza agregalı hafif ve kendiliğinden yerleşebilen kompozit şapların üretilebilirliği tespit edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] A. Anderberg, Moisture properties of selflevelling flooring compounds. Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, LTH, Lund University, TVBM-3120 Licentiate Thesis, ISSN 0348-7911 TVBM, 2004.
- [2] TS EN 13813, Şap malzemeleri ve zemine uygulanan şaplar - Şap malzemeleri - Özellikler ve gerekler, TSE, s31, Ankara, 2004.
- [3] J. F. Georjın, J. Ambroise, J. Péra, J. M. Reynouard, Development of self-leveling screed based on calcium sulfo aluminate cement: Modelling of curling due to drying, Cem. Concr. Compos., 30, 769–778, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.004>.
- [4] M. Canbaz, I. B. Topçu and Ö. Ateşin, Effect of admixture ratio and aggregate type on self-leveling screed properties, Construction and Building Materials, 116, 321–325, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.084>.
- [5] J. Bizzozero, K. L. Scrivener, Limestone reaction in calcium aluminate cement–calcium sulfate systems, Cement and Concrete Research, 76, 159-169, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.019>.
- [6] A. Anderberg and L. Wadso, Drying and Hydration of Cement Based Self-Leveling Flooring Compounds, Drying Technology, 25(12), 1995-2003, 2007. <https://doi.org/10.1080/07373930701728372>.
- [7] S. E. Klemenc, Self Levelers, Concrete Decor Magazine, <https://www.concretedecor.net/author/staceyklemenc/page/18/>, Accessed 18 June 2022.
- [8] J. Kighelman and K. Scrivener, Kinetics of two types of flooring mortar: PC dominated vs CAC dominated. In Calcium Aluminate Cements, Proceedings of the Centenary Conference, Avignon, France, 30 June–2 July 2008; HIS BRE Press: Garston, Watford, pp. 567–572, ISBN 13:978-1-84806-045-6, 2008.
- [9] J. Do and Y. Soh, Performance of Polymer-modified Self-leveling Mortars with High Polymer–cement Ratio for Floor Finishing, Cement and Concrete Research, 33(10), 1497-1505, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01057-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01057-8).

- [10] A. Padilla, I. Panama, A. Toledo and A. Flores, Development of Low Weight Self-leveling Mortars, VII International Congress of Engineering Physics, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 582, 012030, 2015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/582/1/012030>.
- [11] A. De Gasparo, M. Herwegh, R. Zurbriggen and K. Scrivener, Quantitative Distribution Patterns of Additives in Self-leveling Flooring Compounds (underlayments) as Function of Application, Formulation and Climatic Conditions, Cement and Concrete Research, 39(4), 313-323, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.009>.
- [12] L. Evangelista and J. de Brito, Mechanical Behaviour of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates, Cement and Concrete Composites, 29(5), 397-401, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>.
- [13] A. Kiliç, C. D. Atış, A. Teymen, O. Karahan, F. Özcan, C. Bilim and M. Özdemir, The Influence of Aggregate Type on the Strength and Abrasion Resistance of High Strength Concrete, Cement and Concrete Composites, 30(4), 290-296, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011>
- [14] L. A. Sbia, A. Peyvandi, P. Soroushian and A. M. Balachandra, Optimization of Ultra-High-Performance Concrete with Nano- and Micro-scale Reinforcement, Cogent Engineering, 1(1), 990673, 2014. <https://doi.org/10.1080/23311916.2014.990673>.
- [15] G. Barluenga and F. Hernández-Olivares, Self-leveling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste, Construction and Building Materials 24, 1601-1607, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.033>.
- [16] L. U. D. Tambara Júnior, M. Cheriaf and J. C. Rocha, Development of Alkaline-Activated Self-Leveling Hybrid Mortar Ash-Based Composites, Materials, 11(10), 1829, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11101829>.
- [17] Y. T. Altuncı, Ö. Cenk, K. Saphioğlu, H. H. İnce ve M. Çevikbaş, Genleştirilmiş Cam Agregası ve Genleştirilmiş Perlit Agregası İkameli Şap Betonlarının Bazı Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Teknik Bilimler Dergisi, 11(2), 8-13, 2021. <https://doi.org/10.35354/tbed.918849>.
- [18] Y. T. Altuncı, Ö. Cenk, K. Saphioğlu, H. H. İnce ve M. Çevikbaş, Genleştirilmiş Cam Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Şap Harçlarının Performans Özelliklerinin Belirlenmesi. El-Cezeri, 8(1), 11-20, 2021. <https://doi.org/10.31202/ecjse.753475>.
- [19] E. Y. Şahin, İ. Gökalop, A. E. Ormancı ve Y. Akkaya, Kendiliğinden yayılan çimento esaslı şap üretimi. <https://www.thbbakademi.org/wpcontent/uploads/2020/12/B2011180-191.pdf>. Erişim Tarihi: 28/10/2022.
- [20] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [21] TS EN 13892-1, Şap malzemeleri - Deney metotları - bölüm 1: Deneyler için numune alma, hazırlama ve kütleme, TSE, s9, Ankara, 2004.
- [22] TS EN 13892-2, Şap malzemeleri - Deney metotları - bölüm 2: Eğilme ve sıkıştırma mukavemeti tayini, TSE, s7, Ankara, 2004.
- [23] ASTM C642-21, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022.
- [24] TS EN 13892-3, Şap malzemeleri - Deney yöntemleri - Bölüm 3: Aşınma direncinin belirlenmesi - Böhme deneyi, TSE, 11, Ankara, 2010.
- [25] TS EN 13892-6, Şap malzemeleri - Deney metotları - Bölüm 6: Yüzey sertliği tayini, TSE, s7; Ankara, 2004.
- [26] TS EN 13454-2, Bağlayıcılar, kompozit bağlayıcılar ve fabrika yapımı karışımlar - Kalsiyum sülfat esaslı - Şap malzemesi olarak kullanılan - Bölüm 2: Deney metotları, TSE, s22, Ankara, 2004.
- [27] A. Ünsal ve H. Şen, Beton ve Beton Malzemeleri Laboratuvar Deneyleri, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [28] Y. W. Liu, T. Yen and T. H. Hsu, Abrasion Erosion of Concrete by Water-borne Sand, Cement and Concrete Research, 36(10), 1814-1820, 2005.
- [29] R. K. Dhir, P. C. Hewlett and Y. N. Chan, Near-surface Characteristics of Concrete: Abrasion Resistance, Materials and Structures, 24, 122-128, 1991.
- [30] C. D. Atış, High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 14(3), 274-277, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)08991561\(2002\)14:3\(274\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)08991561(2002)14:3(274))
- [31] M. Lenart, Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use, 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015), Procedia Engineering 108, 309 - 315, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.152>.
- [32] TS EN 13872, Perdah ve/veya tesviye işlerinde kullanılan ve hidrolik priz alabilen bileşiklere uygulanacak deney metotları - Büzülmenin tayini, TSE, Ankara, 2011.
- [33] A. M. Neville, Properties of Concrete, 5th Edition, The Royal Academy of Engineering, ISBN:9788177585872, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012.





TBDY 2018' e göre farklı döşeme tiplerinin yüksek bina sınıfındaki yapıda doğrusal olmayan davranışa olan etkilerinin incelenmesi

Investigation of the effects of different floor types on non-linear behavior in high-rise building class according to TBDY 2018

İlker Fatih Kara¹ , Yunus Emre Akkaş^{2*} 

^{1,2}Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çifilikköy Kampüsü 33343, Yenişehir/Mersin Türkiye

Öz

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'e göre yüksekliği 72 m olan ve Deprem Tasarım Sınıfı 1 (DTS) kategorisine giren yüksek bir betonarme yapının, yönetmelikte belirtilen Şekil Değiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım (ŞGDT) kriterleri altında doğrusal olmayan analiz göz önünde bulundurularak farklı döşeme tiplerinde performans ve yapısal davranışına ait karşılaştırmaları yapılmıştır. Aynı düşey taşıyıcı sistem içerisinde, betonarme yapılarda sıklıkla kullanılan kirişli plak döşeme, mantar döşeme, asmolen döşeme ve döşemenin sistemle birlikte modellenmediği (plak döşemeli) yapı sisteminden oluşan 4 farklı model dikkate alınmıştır. Her yapı sistemi için kullanılan beton ve donatıya ait malzeme seçimlerinde aynı dayanım özelliklerine yer verilmiştir. Analizlerden elde edilen elastik ötesi şekil değiştirmeler birbirleri ile karşılaştırılmış ve farklı döşeme tiplerine göre performans düzeyleri belirlenmiştir.

Sonuç olarak doğrusal olmayan davranış analizlerinde döşeme modellemesinin eleman hasar seviyelerini ve yapı davranışını değiştirebildiği, yapı sistemlerinin katlara ait düzlem içi rijitliğine katkı sağlayarak, düşey elemanların daha çok zorlanmalarına sebep olabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: TBDY 2018, Doğrusal olmayan analiz, Yüksek yapılar, Mantar döşeme, Plak döşeme, Dişli döşeme

1 Giriş

Depremlerin bilinmeyen, öngörülemeyen ve karmaşık yapısı, mühendislerin üstesinden gelmesini gerektiren zorlu problemleri de beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla deprem anında yapılara etki edecek dinamik zorlamalara karşın, birtakım çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yaşanan tecrübeler göstermiştir ki, oluşturulan taşıyıcı sistemlerin servis ömrü boyunca sadece kendi düşey ağırlıklarına göre değil, deprem ve rüzgar, hatta bazı durumlarda ani darbe etkilerine karşı da tasarlanması gerektiği sonucunu doğurmuştur. Bu gibi etkenlerden dolayı, yapılarda taşıyıcı sistem, malzeme ve hesap yöntemlerinin seçimi, yapı tasarımlarında oldukça önemli bir yere sahip olmuştur.

Abstract

In this study, non-linear analysis is considered under the Evaluation and Design Based on Strain (ŞGDT) criteria specified in the regulation, of a high reinforced concrete structure with a height of 72 m according to the Turkish Building Earthquake Code (TBDY) 2018 under the Earthquake Design Class 1 (DTS) category. Considering the performance and structural behavior of different flooring types, comparisons were made. Within the same vertical support system, 4 different models, commonly used in reinforced concrete structures, consisting of conventional slab system, ribbed hardy slab system, flat slab system and non-modeled floor conventional slab system were considered. The same strength properties are included in the material selection of the concrete and reinforcement used for each building system. Inelastic strains obtained from the analyses were compared with each other and performance levels were determined according to different flooring types.

As a result, in non-linear behavior analysis, it has been observed that modeling of slabs can change the element damage levels and building behavior, contributing to the horizontal in-plane rigidity of the building systems and causing more strain on the vertical elements.

Keywords: TBDY2018, Non-linear analysis, Tall buildings, Conventional slab, Ripped slab, Flat slab

Gelişen teknoloji, mühendislik çalışmalarında önemli bir yol kat etme aracıdır. Bu gelişmeler, yapı sistemlerinde kullanılan 2 boyutlu basit hesaplamaların yerini, 3 boyutlu sonlu eleman modellemelerine bırakabilmiştir. Böylece karmaşık geometrideki yapı sistemlerinin teorik çözüm yapısı, pratikteki yapı davranışına daha çok benzeşerek, aralarında oluşabilecek farklar minimize edebilmiştir.

Bu teknolojik ilerlemeler, çeşitli ülke yönetmeliklerini de destekleyerek, güncelliklerine yön vermiştir. İlerleyen hesap yöntemleri arasında, tarihte yaşanmış depremlerin bire bir etkisini yapı analizlerine dahil edebilen yöntemler de geliştirilmiştir. Bu şekil ileri seviye analizler, yapıların doğrusal olmayan davranış yapısıyla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda geri dönüşü olmayan hasar mekanizmalarını da

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: yunusemreakkas@hotmail.com (Y. E. Akkaş)
Geliş / Received: 09.08.2022 Kabul / Accepted: 25.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1159150

dikkate alabilmektedirler. Bu sayede yapıların, yatay kuvvetler etkisinde, deprem enerjisinin kontrollü şekil değiştirmeler ile sönmülenip sönmülenmediği ve süneklik taleplerinin karşılanıp, karşılanmadığı gibi taşıyıcı sistem için önem arz eden bulgulara ulaşım imkanı sağlayabilmektedirler.

Teknolojik gelişimlerden fayda sağlanabilecek bir diğer husus ise döşeme sistemlerinin çerçeve yapı elemanları ile birlikte modellenebilmesidir. Yapı sistemlerinde mimari veya statik gereksinimlerden dolayı birçok farklı döşeme tipi kullanılabilir. Yatay yük etkisi altındaki yapı sistemlerinin döşeme tiplerindeki bu çeşitlilikler, yapının çerçeve davranışının ve sistem içerisindeki kuvvet dağılımlarının farklı şekilde oluşmasına sebep olabilmektedir. TBDY 2018'e göre tasarlanan yüksek yapı sistemleri başta olmak üzere, farklı döşeme tiplerinin, yapı sistemlerinin doğrusal olmayan davranışlarına olan etkileri üzerine yapılmış sınırlı düzeyde de olsa çalışmalar bulunmaktadır[1-10].

Uzun [1] çalışmasında, 3 Bodrum, 1 zemin ve 29 normal kat olmak üzere, toplamda 33 katlı yüksek bir betonarme yapıda, farklı döşeme tiplerinin etkisini Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY) 2007' ye göre yapılan doğrusal analiz sonuçlarını göz önünde bulundurarak irdelemiştir. Çalışmasında, kirişli plak döşeme, bir doğrultuda çalışan dişli döşeme, kirişsiz plak döşeme, bina çevresinde kirişleri bulunan, kirişsiz plak döşeme ve rijit bodrum katı bulunan kirişli plak döşeme sistemi olmak üzere toplamda 5 Farklı döşeme tipini ele almıştır. Doğrusal analizden elde edilen sonuçların karşılaştırmalarından, yüksek bir yapının döşeme tipi seçimindeki farklılıklar yapının deprem davranışında önemli derecede farklılıklar oluşturduğu sonucuna ulaşmıştır.

Ahmed ve Gunesekekan [2], betonarme çerçevelerin sismik performansında döşemelerin etkisini araştırmışlardır. Kat yüksekliği 3,5 m olan 5 katlı ve 4 açıklıklı çerçeve sistemli bir yapıda, örnek olarak seçilen orta akstaki bir çerçeveye ait kolon kiriş birleşim bölgesinde, analitik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışma, birleşim bölgesine ait kesitlerin yarısı olacak şekilde ölçeklendirilip, döşemeli ve döşemesiz sistemler olarak hazırlanmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda yazarlar, yapılarda döşeme etkisini ihmal etmenin, yapının dayanımını önemli ölçüde göz ardı etmek olduğunu ve yapının mekanizma oluşumunda öngörülen davranışının, gerçek davranışından uzaklaşabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Abera [3] çalışmasında, dikdörtgen, U, L ve ortasında boşluk bulunan, değişken plan geometrilerine sahip yapı tiplerinde, döşemelerde rijit ve esnek diyafram kabulünün etkilerini araştırmıştır. 4, 5 ve 6 kattan oluşan yapı sistemlerinin, plan geometrisinde perde eleman bulunma durumları ile bulunmayan durumlar için karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalarında çeşitli yönetmeliklerin (UBC-97, ASCE7, EC8) döşemeler için verilen esnek ve rijit diyafram kabul yaklaşımlarını dikkate almıştır. Sonuçta U ve L tipindeki yapıların perde içermediği durumlarında, rijit ve esnek diyafram kabulü ile elde edilen sonuçların benzer olduğu sonucuna varmıştır.

Nandeesh ve diğ. [4] 30 katlı bir yapıda döşeme sistemlerine ait esnek ve rijit diyafram kabulündeki farklılıkları irdelemişlerdir. Yapının ayrıca dış çerçevesinde sadece bir yön boyunca perde duvarlar eklenerek, çalışma çeşitlendirilmiştir. Doğrusal analiz yöntemlerinin kullanıldığı çalışmada, rijit diyafram kabulüne göre hesaplanan çerçeve sistemdeki deformasyonların, esnek diyafram kabulüne göre yapılan hesaplamalardan %30 daha büyük olduğu belirtilmiştir. Aynı hesaplamaların kenar bölgelere eklenen perde duvarlı çerçeve sisteme uyarlanmasında, bu fark %3,5' e gerilemiştir. Rijit diyafram kabulü yapılan çerçeve sistemli yapının görel kat öteleme oranların esnek diyaframa göre %42 daha fazla olduğu, perde duvar eklenmiş sistemlerde ise bu farkın %5' te kaldığı belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise farklı döşeme modellerinin, yapının doğrusal olmayan dinamik davranışa olan etkileri incelenmiştir. Döşeme tiplerinin seçiminde, yapı sektöründe sıklıkla kullanılan kirişli plak döşeme, asmolen döşeme ve mantar döşeme sistemleri tercih edilmiştir. Önceki yapılan çalışmaların genelinde, aynı düzey taşıyıcı sistem elemanlarda kullanılan farklı döşeme tiplerinin doğrusal analiz yöntemleriyle karşılaştırılmalarına yer verilmiştir. Bu çalışmada, hesaplar detaylandırılarak doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz yöntemleri kullanılmıştır. Hesaplamalar, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [11] (TBDY 2108) kriterleri eşliğinde hazırlanarak, hem güncel deprem yönetmeliğinden, hem de yapıların tahmin edilmesi güç olan doğrusal olmayan davranış biçimlerinden faydalanılmıştır. Böylece hesaplamalarda gelişmiş yönetmelik, donanım ve yazılım destekleriyle daha detaylı sonuçlara ulaşılabilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

TBDY 2018' e göre Bina Yükseklik Sınıfı 1 (BYS1) kategorisine giren 72 m yüksekliğindeki bir yapının, farklı döşeme sistemlerinde doğrusal olmayan davranışlarının karşılaştırması yapılmıştır. Seçilen döşeme tipleri ve kesitleri projelendirme süreçlerinde sıkça karşılaşılan özelliklere sahip olacak şekilde belirlenmiştir. Kesitlerde minimum donatı oranları dikkate alınarak tasarım yapılmıştır. Her katın 4 m yüksekliğe sahip olduğu yapıda, toplamda 18 adet kat bulunmaktadır. Farklı döşeme tipindeki sistem modelleri sınıflandırılarak aşağıdaki şekilde isimlendirilmiştir;

- Sistem 1, Plak döşemeli yapı sistemi.
- Sistem 2, Asmolen döşemeli yapı sistemi.
- Sistem 3, Mantar döşemeli yapı sistemi.
- Sistem 4, Döşeme modellemesiz (plak döşemeli) yapı sistemi.

Döşeme modellerinin sistem ile birlikte çözümlendiği yapılarda yarı-rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Döşeme modellenmeyen "döşeme modelsiz (kirişli plak döşeme)" durum için ise tam rijit diyafram kabulü yapılmıştır.

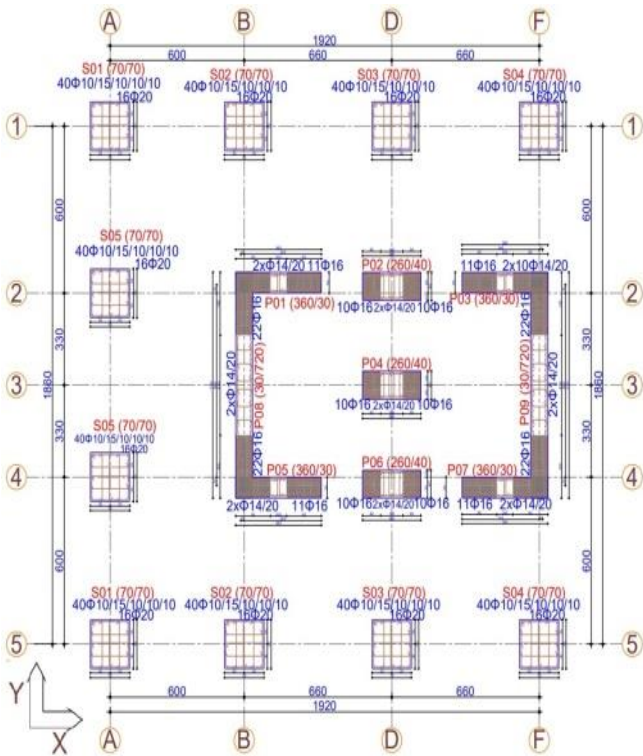
Yapının, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm Binasının konumunda olduğu varsayımı yapılmıştır. Konumun seçimindeki sebep, yapıdaki dinamik zorlamaların belirgin derecede yüksek olabilmesini sağlamaktır. Zemin değerleri için de aynı amaç izlenilmiş olup, zemin sınıfı

olarak TBDY 2018' e göre ZD zemin sınıfı seçilmiştir. Bu sayede yapıda yüksek iç kuvvet değerleri, deformasyonlar ve mafsallaşmalar elde edilmeye çalışılmıştır. Gerekli koordinat değerleri ve depremsellik verileri belirtilen konum üzerinden alınmıştır. Zaman tanım alanına göre yapılan analizlerde, deprem kaydı verileri için PEER [12] web uygulamasından yararlanılmıştır. Yine aynı uygulama üzerinden Deprem Düzeyi 1 (DD1) tasarım spektrumuna göre ölçeklendirme işlemleri yapılmıştır. Analizlerde, her bir deprem ivme kaydı birleşeni 90° döndürülerek, yapının her iki doğrultusu içinde deprem etkisi uygulanabilmektedir. Döşemeler ile birlikte modellenen yapı sistemlerinin doğrusal olmayan analiz sürelerinin oldukça uzun sürmesinden dolayı 11 x 2 adet deprem ivme kaydı yerine, 7 x 2 adet deprem ivme kaydı kullanılmıştır. Doğrusal olmayan çözümlemelerde SAP2000 V19 [13] hesap yazılımından faydalanılmıştır. Sistemlerin karşılaştırılmalarında ortak sonuçlar verebilecek davranış etkileri üzerinde durulmuştur. Bunun sağlanabilmesi için de yapılar aynı yüklemeler altında zorlamalara tabi tutulmuşlardır.

2.2 Metot

2.2.1 Sistemlerde kullanılan ortak veriler

Şekil 1' de, kolon aplikasyon planı verilen sistem, tüm farklı döşeme tiplerinde kullanılacak olan düşey taşıyıcı eleman kesitlerini ve donatı detaylarını içermektedir.



Şekil 1. Kolon aplikasyon planı

Yapıya ait özellikler kısaca Tablo 1' de belirtilmiştir.

Tablo 1. Yapı özellikleri

Toplam Kat Adedi	18
Kat Yüksekliği	4 m
Plan Alanı	19.20x18.6 m

Tüm farklı yapı sistemleri için malzeme özellikleri Tablo 2' de belirtilmiştir.

Tablo 2. Malzeme özellikleri

Beton Sınıfı	C35
Donatı Kalitesi	B420C
Plan Alanı	19.20x18.6 m

Kolon, perde ve kiriş elemanlarda enine donatı aralığı ve şekilleri farklı olduğu için, 2 farklı beton sargı modeli kullanılmıştır. Sargısız beton modeli, donatı pas payı bölgesinde kullanılacağından dolayı, ayrıca sargısız beton etkisi de hesaplarda dikkate alınmıştır.

Yapıya etki eden düşey yükler belirlenirken, yapının bir işyeri ofisi kullanımına uygun nitelikte olması amaçlanmıştır. Kaplamaların tesviye betonu + seramik, duvarların ise mimari fonksiyonlara göre yarım veya tam tuğla duvar olabilme ihtimaline karşın tüm kiriş ve döşeme elemanlara aynı yükleme değerleri verilmiştir. Ofis kullanımlarında zaman içerisinde mekânsal işlevlerin değişebileceği düşünülerek, hareketli yüklerde standart 2 kN/m² yerine artırım yapılarak, 3 kN/m² değeri kullanılmıştır.

Tablo 3. Servis yükleri

Yapı Kendi Ağırlığı (Dead)	Döşeme tipine göre değişken
Kaplama Yüğü (G)	1.7 kN/m ²
Duvar Yüğü (G)	4 kN/m ²
Hareketli Yüğü (Q)	3 kN/m ²

Tablo 4' de depremsellik ile ilgili bilgilere, Tablo 5 ise yapılara ait kesit özelliklerine yer verilmiştir.

Tablo 4. Depremsellik bilgileri

Bina Yükseklik Sınıfı	BYS 1
Bina Kullanım Sınıfı	BKS 3
Deprem Tasarım Sınıfı	DTS 1
Yapı Koordinat Bilgileri	40.7424 30.3277
Deprem Düzeyi	DD-1
Kısa Periyot Harita	2.921
Spektral İvme Katsayısı (S _s)	0.835
Spektral İvme Katsayısı (S ₁):	
En Büyük Yer İvmesi (PGA)	1.148 g
En Büyük Yer Hızı (PGV)	99.58 cm/sn ²
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Kısa Periyot Tasarım	2.921
Spektral İvme Katsayısı (S _{Ds})	
1 Sn Periyot İçin Tasarım	1.419
Spekt. İvme Katsayısı (S _{D1}):	

Tablo 5. Kesit özellikleri

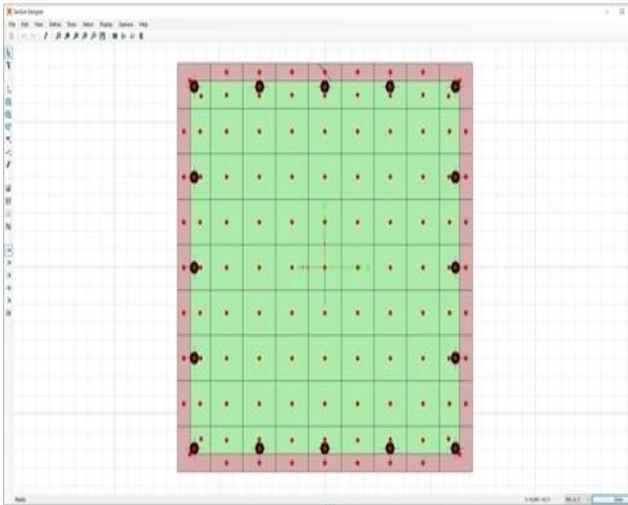
Tüm Kolonlar	70x70 (cm)
P08–P09 Perdeleri	30x720 (cm)
P01–P03–P05–P07 Perdeleri	30x360 (cm)
P02–P04 –P06 Perdeleri	40x260 (cm)
Kirişler (Döşeme Çeşidine Göre Değişken)	30x60 (cm) 40x60 (cm) 60x32 (cm)
Döşemeler	Sistem Bazında Değişken

Tablo 6’ da farklı kesitlerde kullanılan donatı miktarları gösterilmiştir.

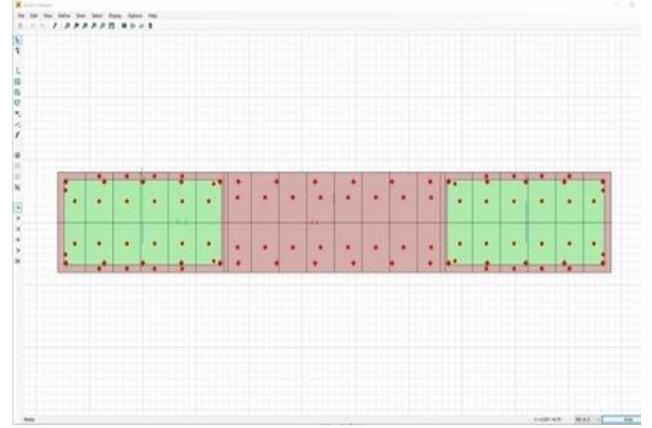
Tablo 6. Donatı kullanımı

70x70 Kolon	16ø20
30x720 Perde Başlık	22ø16
30x720 Perde Gövde	ø14/20
30x360 Perde Başlık	11ø16
30x360 Perde Gövde	ø14/20
40x260 Perde Başlık	11ø16
40x260 Perde Gövde	ø14/20
30x60 Kiriş	3ø20 Üst 3ø20 Alt
40x60 Kiriş	4ø16 Üst 4ø16 Alt
60x32 Kiriş	6ø16 Üst 6ø16 Alt

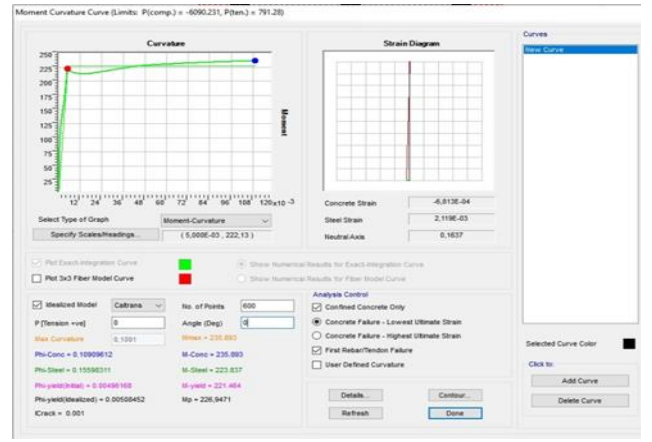
Şekil 2 ve Şekil 3’ te sırasıyla 40x260 cm boyutlarındaki perde ve 70x70 cm boyutlarındaki kolon elemanlarının kesit (lif) hücrelerine bölünüş şekillerinin gösterimi yapılmıştır. Diğer yandan Şekil 4’ te 30x60 cm boyutlarına sahip kirişin yığılı plastik mafsal tanımlanması için gerekli olan moment eğrilik grafiği, Şekil 5’ te ise moment-eğrilik grafiğinden elde edilen plastik mafsal tanıtımı gösterilmiştir.



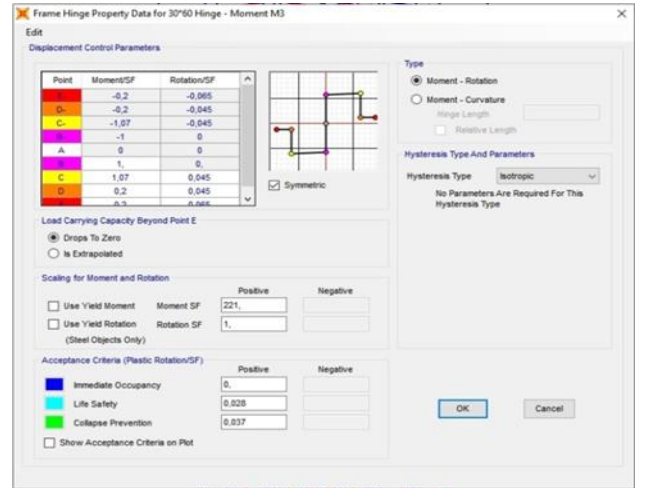
Şekil 2. 70x70 Kolon kesit (lif) hücre tanımtı



Şekil 3. 40x260 cm perde kesit (lif) hücre tanımtı



Şekil 4. 30x60 kirişi moment-eğrilik ilişkisi



Şekil 5. Kiriş elemanlarda plastik mafsal tanımtı

Deprem ivme kayıtları seçilirken olabildiğince farklı depremlerden ve ivme kayıtlarından yararlanılmaya çalışılmıştır. Toplamda 11 adet ivme kaydı seçilmiş ve seçimlerde PEER web uygulamasından yararlanılmıştır. Birleşimi yapılan 11 kaydın ortalaması yine aynı web uygulaması üzerinden ölçeklendirilmiştir (Tablo 7). Benzer deprem etkilerinin oluşabilmesi için, tüm sistemlere aynı deprem ölçek katsayıları uygulanmıştır.

Tablo 7. DD1' e göre ölçeklendirilmesi yapılmış 11 kayıt ve ölçek katsayıları

Kayıt Sıra Numarası	Deprem	Yıl	İstasyon	Büyüklik (Mw)	Vs30(m/s)	Ölçek Katsayısı
143	Tabas, Iran	1978	Tabas	7.35	766.77	1.10
779	LomaPrieta	1989	LGPC	6.93	594.83	1.13
828	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7.01	422.17	1.59
963	Northridge-01	1994	Castaic - OldRidgeRoute	6.69	450.28	1.89
1106	Kobe, Japan	1995	KJMA	6.9	312.0	1.17
1158	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.51	281.86	1.91
1197	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY028	7.62	542.61	1.27
1602	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.14	293.57	1.59
1605	Duzce, Turkey	1999	Duzce	7.14	281.86	1.45
5837	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	El Centro - Imperial&Ross	7.2	229.25	2.21
6911	Darfield, New Zealand	2010	HORC	7.0	326.01	1.42

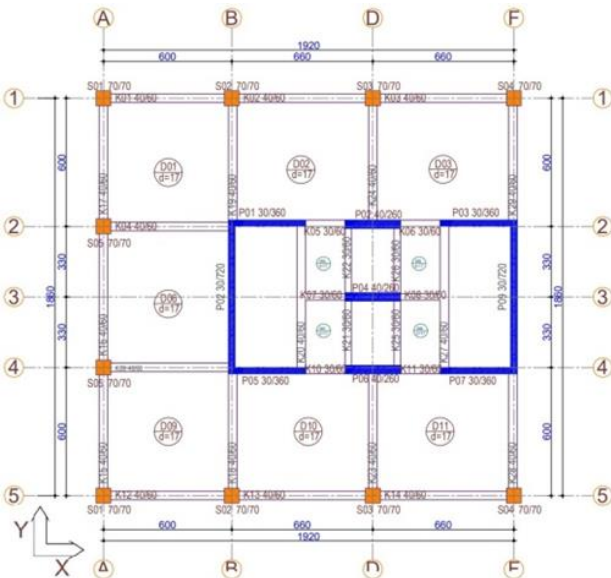
Yapının periyot değerlerinde her iki doğrultu için de %95 kütle katılım oranı sağlanarak, bu değere ulaşılabilmesi için de 18 adet mod sayısının yeterli olduğu görülmüştür.

Döşemelerde yarı rijit diyafram kabulü yapılmıştır. Böylece döşeme rijitliklerinin düşey taşıyıcı elemanlara olan etkileri gözlenmeye çalışılmıştır. Karşılaştırmalarda döşeme modeli oluşturulmayan plak döşemeli yapı sisteminde ise geleneksel rijit diyafram kabulü yapılarak analizlere dahil edilmiştir.

Zaman tanım alanı analizlerinde doğrusal entegrasyon yöntemleri kullanılmıştır. Yönetmelik gereği %2.5 sönüm oranı göz önünde bulundurulmuştur. Tüm analizlerde TBDY 2018' de belirtilen etkin kesit rijitlikleri kullanılmıştır.

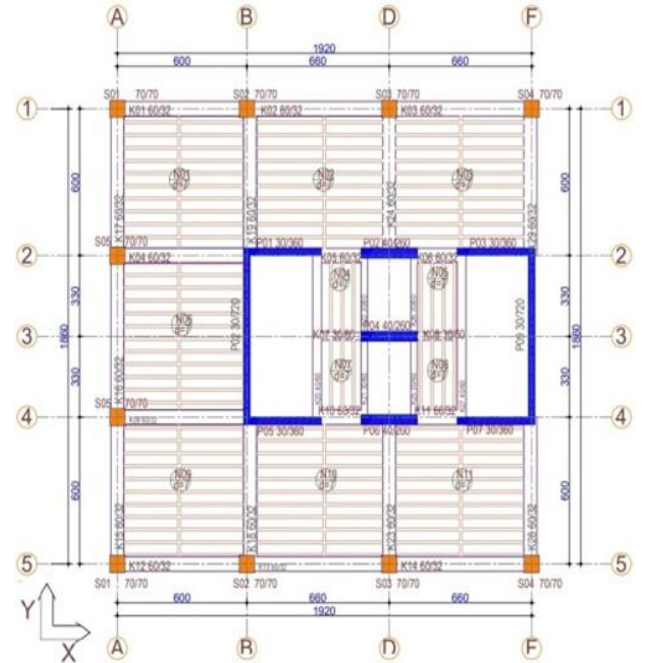
2.2.2 Farklı döşeme sistemlerine ait özellikler

Şekil 6' da kalıp planı verilen kirişli plak döşemeye sahip sistemde, 40x60 cm, 30x60 cm kiriş elemanları ile 17 cm kalınlığında betonarme döşeme elemanı kullanılmıştır. 18 kat adedine sahip yapıda toplam ağırlık 101.937.5 kN' dur.



Şekil 6. Plak döşemeli yapı sistemi kalıp planı

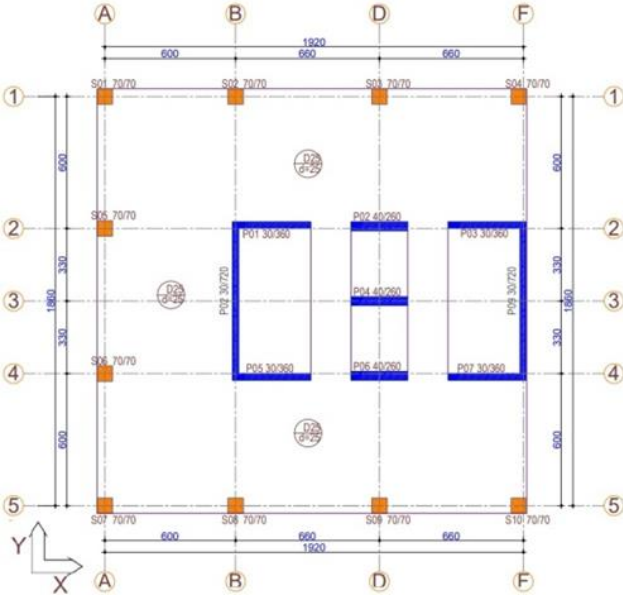
Şekil 7' de kalıp planı verilen asmolen döşemeli yapı sisteminde 60x32 cm' lik kesite sahip kirişler, 12x32 cm kesitindeki nervür dışları ve 7 cm kalınlığındaki tabliye kullanılmıştır. Yapının toplam ağırlığı 105.758.4 kN' dur.



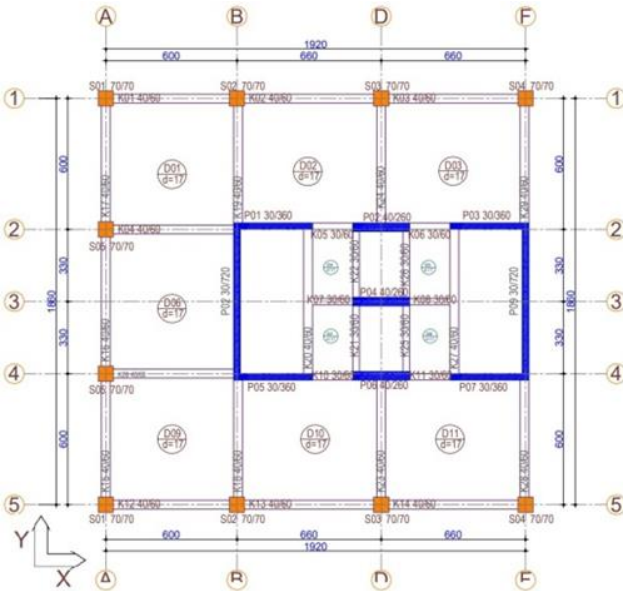
Şekil 7. Asmolen döşemeli yapı sistemi kalıp planı

Şekil 8' de kalıp planı verilen mantar döşemeli yapı sisteminde de 25 cm kalınlığında betonarme döşeme kullanılmıştır. Yapının toplam ağırlığı 97.558.55 kN' dur.

Şekil 9'da kalıp planı verilen döşeme modelsiz yapı sisteminde 40x60 cm ve 30x60 cm kesitlerinde kiriş elemanları bulunmaktadır. Sistemin modellenmesinde döşeme göz önünde bulundurulmamış olup 17 cm kalınlığındaki plak döşemeye ait ölü ve hareketli yükler kirişlere aktarılmıştır. Söz konusu yapı sisteminin toplam ağırlığı 102.369.92 kN' dur.



Şekil 8. Mantar döşemeli yapı sistemi kalıp planı



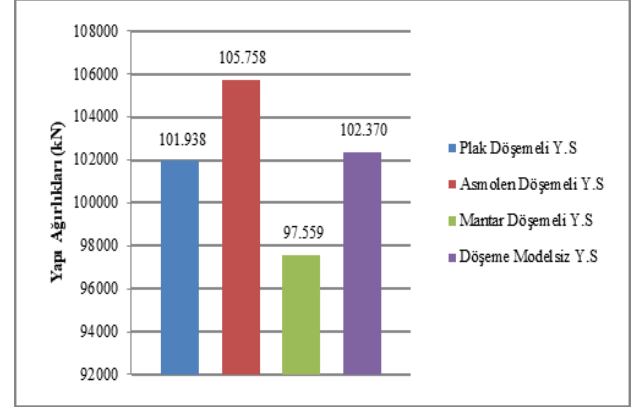
Şekil 9. Döşeme modellemesiz (plak döşemeli) yapı sistemi kalıp planı

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Yapı ağırlıkları

Farklı tiplerde döşeme içeren yapı sistemleri aynı düzey servis yükleri etkisi altındadır. Yapı ağırlıklarındaki farklılıklar Şekil 10' da gösterilmektedir.

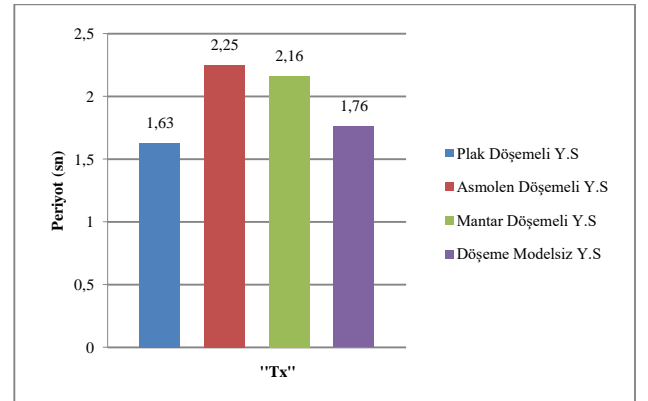
Şekil 10' dan görüldüğü üzere 105.758 kN ile asmolen döşemeli sistem en ağır yapı sistemdir. Onu sırasıyla 101.938 kN ile plak döşemeli yapı sistemi ve 97.559 kN ile mantar döşemeli yapı sistemi takip etmektedir. Döşeme modelsiz yapı sisteminde, sistem ile birlikte modellenmeyen döşeme elemanlarının yük dağılımları, döşeme ölçülerine göre kiriş elemanlara aktarılmış olup, Yapı ağırlığı, 102.370 kN olarak elde edilmiştir.



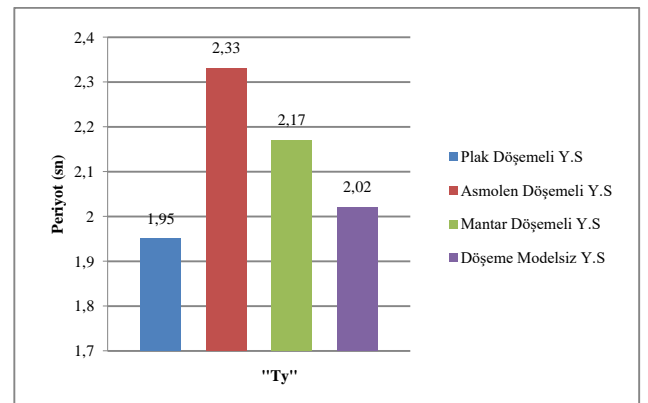
Şekil 10. Farklı döşeme sistemlerine sahip yapı ağırlıkları (kN)

3.2 Yapı periyotları

Yapı sistemlerinin periyot değerleri karşılaştırıldığında "X" doğrultusunda en uzun periyot değeri, 2.25 sn ile asmolen döşemeli yapı sistemine ait olup, bunu 2.16 sn ile mantar döşemeli yapı sistemi, 1.76 sn ile döşeme modelsiz yapı sistemi ve 1.63 sn periyot değeri ile plak döşemeli yapı sistemi izlemektedir. "Y" doğrultusunda da benzer şekilde, asmolen döşemeli yapı sisteminde 2.33 sn, mantar döşemeli yapı sisteminde 2.17 sn, döşeme modelsiz yapı sisteminde 2.02 sn ve plak döşemeli yapı sisteminde ise 1,95 sn değerlerine ulaşılmıştır.



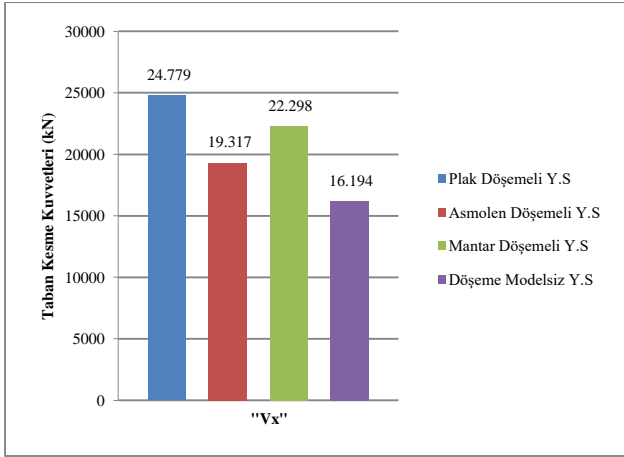
Şekil 11. "X" doğrultusu yapı periyotları (sn)



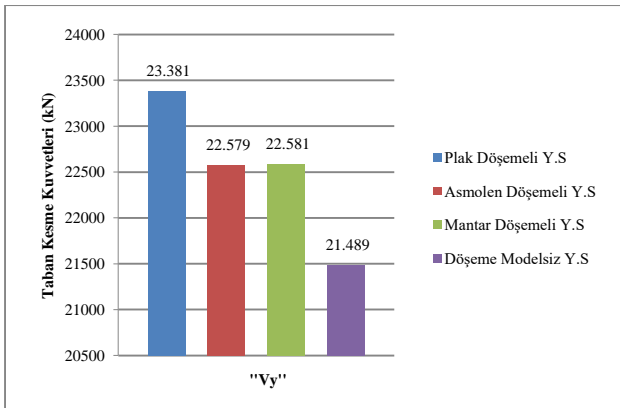
Şekil 12. "Y" doğrultusu yapı periyotları (sn)

3.3 Taban kesme kuvvetleri

14 farklı deprem kaydının yapı sistemlerine uygulanması neticesinde elde edilen ortalama taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılmaları Şekil 13 ve 14’ de verilmiştir. Her iki durum için de en yüksek taban kesme kuvveti değeri plak döşemeli yapı sistemine ait olurken, en düşük değer ise döşeme modelsiz yapı sistemine ait olmuştur. Sistemlerin daha rijit doğrultusu olan “X” yönünde plak döşemeli yapı sistemi, mantar döşemeli yapı sistemine göre %11, asmolen döşemeli yapı sistemine göre %22, döşeme modelsiz yapı sistemine göre %35 daha yüksek deprem kuvveti almaktadır. Tüm sistemlerde periyot değerlerinin 2 sn’ ye yakın ve üzerinde olan “Y” doğrultusunda ise, plak döşemeli yapı sistemi, asmolen döşemeli yapı sistemine göre %3, mantar döşemeli yapı sistemine göre %4, döşeme modelsiz yapı sistemine göre %9 daha yüksek deprem etkisine maruz kalmaktadır. Kayıtlardan oluşan ortalama taban kesme kuvveti değerlerinde, her iki doğrultuda da en yüksek değerleri plak döşemeli yapı sistemi, en düşük taban kesme kuvveti değeri ise döşeme modelsiz yapı sistemine ait olmuştur. Farklı döşeme sistemleri arasında döşeme modellenmeyen yapı sisteminin en düşük taban kesme kuvveti değerini alması dikkat çekmektedir.



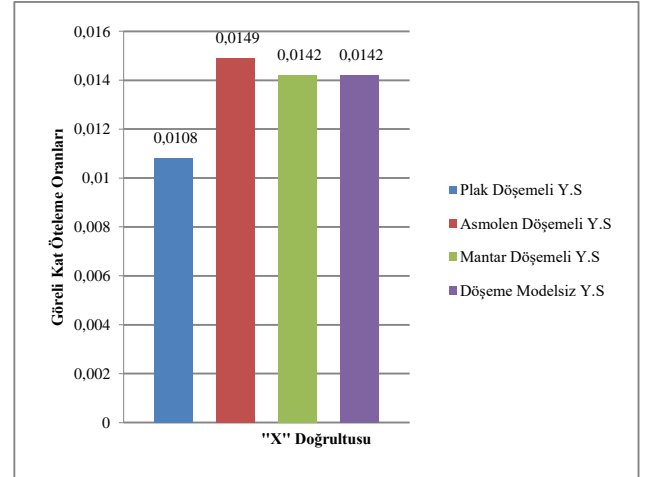
Şekil 13. "X" doğrultusu 14 kayıt ortalaması taban kesme kuvveti değerleri (kN)



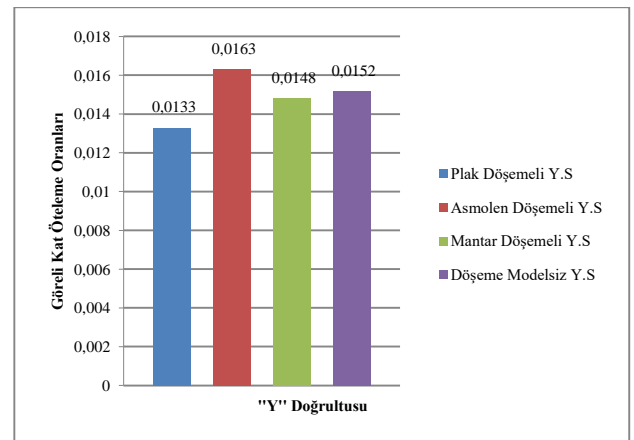
Şekil 14. "Y" doğrultusu 14 kayıt ortalaması taban kesme kuvveti değerleri (kN)

3.4 Görelî kat öteleme oranları

Şekil 15 ve 16’ da farklı sistemlere ait ilgili deprem doğrultusundaki maksimum ortalama görelî kat öteleme oranı değerleri verilmiştir. Depremin “X” yönü görelî kat öteleme oranları, en düşük değere sahip olan plak döşemeli yapı sistemiyle kıyaslandığında, mantar döşemeli yapı sisteminin %32, döşeme modelsiz yapı sisteminin %32 ve asmolen döşemeli yapı sisteminin de %38 daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı durum depremin “Y” yönü için değerlendirildiğinde plak döşemeli yapı sistemine göre sırasıyla, mantar döşemeli yapı sistemde %11, döşeme modelsiz yapı sistemde %14 ve asmolen döşemeli yapı sistemde de %22 daha yüksek görelî kat öteleme oranları oluşmuştur. Ortalama görelî kat ötelemelerinde en rijit davranışı plak döşemeli yapı sistemi göstermekte olup, onu sırasıyla mantar döşemeli yapı sistemi, döşeme modelsiz yapı sistemi ve asmolen döşemeli yapı sistemi takip etmektedir. Asmolen döşemeli yapı sistemi görelî kat ötelemelerinde en düşük performansı gösteren sistem olmuştur.



Şekil 15. "X" doğrultusu ortalama görelî kat öteleme oranları



Şekil 16. "Y" doğrultusu ortalama görelî kat öteleme oranları

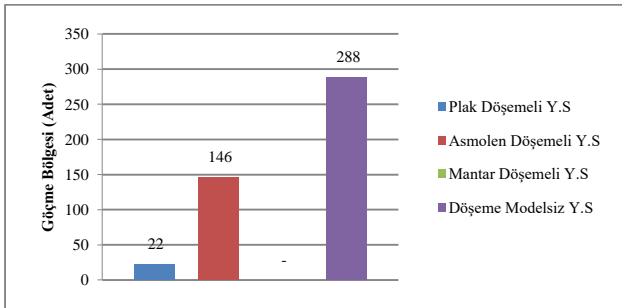
3.5 Kiriş dönme değerleri

Farklı döşeme sistemlerine sahip yapıların kiriş elemanlarında oluşan maksimum dönme değerlerinin karşılaştırması Şekil 17 ve 18’ de gösterilmiştir.

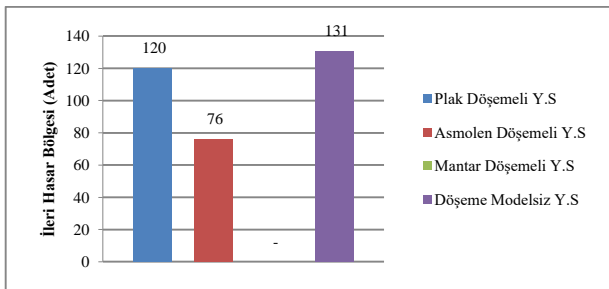
Değerlendirmelerde herhangi bir kiriş elemanı içermeyen mantar döşemeli yapı sistemi karşılaştırmalara dâhil edilmemiştir.

Kiriş elemanlarda en yüksek dönme değerlerinin dikkate alındığı karşılaştırmalar yapılmıştır. Her bir sistemde toplam 558 adet kiriş elemanı mevcuttur. Plak döşemeye sahip yapı sisteminde toplam 22 adet kiriş göçme bölgesinde, 120 adet kiriş ileri hasar bölgesinde ve kalan 416 adet kiriş belirgin hasar ve sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Asmolen döşemeli yapı sisteminde ise 146 adet kiriş göçme bölgesinde, 76 adet ileri hasar bölgesinde ve kalan 336 adet kiriş belirgin hasar ve sınırlı hasar bölgesinde kalmıştır. Döşeme modelsiz yapı sisteminde toplam 288 adet kiriş göçme bölgesinde, 131 adet kiriş ileri hasar bölgesinde ve kalan 139 adet kiriş belirgin ve sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda hasar oluşumu en düşükten en yükseğe doğru, plak döşemeli yapı sistemi, asmolen döşemeli yapı sistemi ve döşeme modelsiz yapı sistemi şeklinde olmuştur.

Elde edilen sonuçlara bağlı kalınarak, döşeme modellemesinin çerçeve sistemle birlikte tasarlanması, kiriş elemanların hasar düzeylerinde önemli ölçüde azalışa sebep olmuştur. En yüksek kiriş göçme durumu sayısı döşeme modelsiz plak döşemeli yapı sisteminde olurken, bu konuda en düşük hasar sayısına plak döşemeli yapı sistemi ulaşmıştır. Bu doğrultuda plak döşemeye sahip yapı sisteminin doğrusal döşeme elemanlarıyla birlikte modellenmesi, döşeme elemanlarının kiriş elemanlarına olan katkısını belirgin bir şekilde ortaya koymuştur.



Şekil 17. 14 kayda ait maksimum dönme değerlerinin, tüm kiriş elemanlarda oluşturduğu göçme bölgesi sayısı



Şekil 18. 14 kayda ait maksimum dönme değerlerinin, tüm kiriş elemanlarda oluşturduğu ileri hasar bölge sayısı

3.6 Kolon-perde şekil değiştirme (uzama-kısalma) değerleri

Tüm kolon elemanlardaki donatıdaki birim uzama ve betondaki birim kısalma şekil değiştirme değerleri sınırlı hasar bölgesinde kalmaktadır. Tüm sistemlerde önemli ölçüdeki deprem etkileri çekirdek perdeler tarafından karşılandığı için kolon elemanlardaki hasar düzeyleri de oldukça sınırlı kalmıştır. Dolayısıyla karşılaştırmalardan etkin bir sonuç alınamayacağı için kolonlardaki birim uzama ve kısalma şekil değiştirme değerleri dikkate alınmamıştır. Perde elemanların birim uzama ve birim kısalma şekil değiştirme değerlerine göre en yüksek hasar düzeyi, belirgin hasar bölgesinde kalmıştır. Bu doğrultuda plak döşemeli yapı sisteminde 5 adet, asmolen döşemeli yapı sisteminde 6 adet, mantar döşemeli yapı sisteminde 6 adet ve döşeme modelsiz yapı sisteminde 3 adet perde elemanı belirgin hasar bölgesinde kalmıştır.

Belirgin hasar bölgesi seviyelerine ulaşan perdeler, çekirdekteki “U” tipi perdeler olmaktadır. Elde edilen sonuçlara bağlı kalınarak, döşeme ile birlikte modellenen sistemlerde çekirdek perdeler daha yüksek eğilme momenti etkileri olmaktadır. Dolayısıyla döşeme elemanlarıyla birlikte modellenen sistemlerin, perde elemanlarında oluşan deformasyon değerleri de yüksek çıkmaktadır.

“Perdelerde en düşük şekil değiştirme değerleri döşeme modelsiz yapı sistemine ait olurken, en yüksek değerlere mantar döşemeli yapı sisteminde ulaşılmıştır.”

Bu sonuçlar göz önüne alındığında, sistemlerde döşemelerin birlikte modellenmesi, perde elemanların hasar düzeyinde artışa sebep olduğunu göstermiştir.

3.7 Perde elemanlarındaki kesme kuvveti

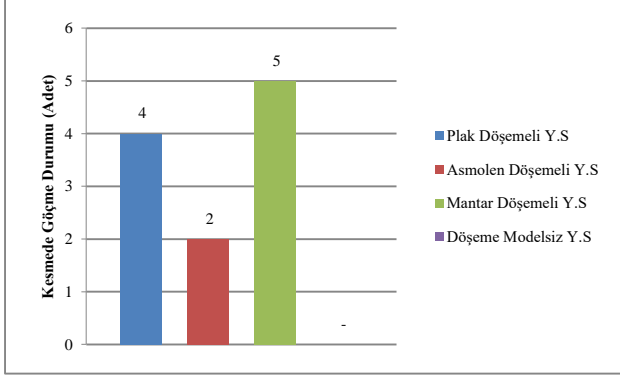
Perde kesme dayanımları hesaplanırken, yönetmelikte belirtilen diyagonal basınç gerilmelerine karşı dayanım kullanılmıştır. Bu dayanımın üstüne çıkan kesme kuvveti değerleri, perde elemanlar için göçme bölgesi olarak dikkate alınmıştır.

Tüm yapı sistemlerinde deprem kaynaklı olarak çekirdek bölgeyi oluşturan “U” tipi perdelerde daha yüksek kesme kuvveti değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 19 incelendiğinde kirişli plak döşeme sisteminde 4 adet perde, asmolen döşemeli yapı sisteminde 2 adet perde, mantar döşemeli yapı sisteminde 5 adet perde elemanı göçme bölgesinde kalmaktadır. Tüm göçme bölgesinde kalan perdeler, çekirdek yapıyı oluşturan “U” tipi perdelerden oluşmaktadır. Döşeme modelsiz yapı sisteminde ise perdelerin hiçbirinde gevrek düzeyde kesme kırılması oluşmamıştır.

Farklı sistemler içerisinde, perdelerin en yüksek kesme kuvvetlerine maruz kaldığı sistem, mantar döşemeli yapı sistemi, daha sonra plak döşemeli yapı sistemi ve onu asmolen döşemeli yapı sistemi izlemektedir. Döşeme modelsiz yapı sisteminde ise perde elemanlara gelen kesme etkisi, diğer sistemlere kıyasla daha düşük seviyelerdedir.

Elde edilen bu sonuçlara bağlı olarak, döşemelerin modellendiği sistemlerin, perdelerle iletilen kesme kuvvetlerini etkilediği ve artışlara sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca mantar döşemeli yapı sistemine ait sonuçlardan, döşeme kalınlığından kaynaklanan rijitlik artışına paralel

olarak, perde elemanlara gelen kesme kuvveti etkilerinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 19. Kesme kuvvetleri etkisindeki perde elemanlarda göçme durumu sayısı

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018'e göre yüksekliği 72 m olan ve Deprem Tasarım Sınıfı I (DTS) kategorisine giren yüksek bir betonarme yapının, yönetmelikte belirtilen Şekil Değiştirmeye Göre Değerlendirme ve Tasarım (ŞGDT) kriterleri altında doğrusal olmayan analiz göz önünde bulundurulularak farklı döşeme tiplerinde performans ve yapısal davranışına ait karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar kısaca özetlenmiştir.

- Plak döşeme, asmolen döşeme, mantar döşeme ve döşeme modelsiz sistemlerinin kullanıldığı 4 farklı yapıda, en ağır yapı asmolen döşemeye sahip sistem olmuştur.
- 4 farklı sistemin X ve Y doğrultusundaki en uzun yapı periyod değerleri asmolen döşemeli yapı sistemine ait olmuştur.
- Farklı deprem ivme kayıtlarının ortalamalarından oluşan en yüksek taban kesme kuvveti değerleri plak döşemeli yapı sistemine ait olmuştur.
- X ve Y doğrultusundaki 14 ivme kaydına ait ortalama görel kat ötelemelerinin en yüksek değerleri asmolen döşemeli yapı sisteminde oluşmuştur. Görel kat ötelemesi oranlarına göre en iyi performansı plak döşemeli yapı sistemi göstermiştir.
- 14 ivme kaydından alınan en yüksek giriş dönme değerlerinden, en çok göçme bölgesinde çıkan giriş adedinin, döşeme modelsiz yapı sistemine ait olduğu görülmüş olup, döşemelerin sistem ile birlikte modellenmesi, giriş hasar düzeyinde önemli ölçüde azalışa sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- İncelenen yapı sisteminde, döşeme elemanlarının doğrusal olarak modellenmesi, giriş deformasyonlarında önemli ölçüde azalışa sebep olarak, yatay elemanların daha rijit çalışmasını sağlamıştır. Bu durum, çekirdekteki perde elemanlara daha yüksek kesme hasarı ve eğilme deformasyonları olarak yansımıştır. Özellikle kesme kuvvetlerindeki belirgin artış ve hasar

durumlarındaki farklar, döşemelerin sistem ile birlikte modellenip, modellenmemesi durumlarından görülebilmektedir.

- Döşemelerin birlikte modellendiği ve modellenmediği plak döşemeye sahip yapı sistemleri birlikte incelendiğinde, döşemelerin yapı ile birlikte modellendiği plak döşeme sisteminin perde elemanlarında gevrek düzeyde kesme hasarlarının oluştuğu, aynı sistemin döşeme modellenmeden, rijit diyafram kabulü çerçevesinde yapılan analiz sonuçlarında ise kesme hasar durumunun hiç oluşmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Elde edilen bulgular, bu çalışma kapsamında incelenen yapı sistemine ait olup, söz konusu sonuçların farklı taşıyıcı sistemler için de değerlendirilmesi gerektiği ve bu çalışmada elde edilen sonuçların tasarımlara ve bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalara ışık tutabileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] D. Uzun, 33 katlı betonarme yüksek bir binanın deprem davranışına farklı döşeme sistemlerinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [2] S. M. Ahmed, U. Gunesekearan, Effect of floor slabs on the seismic performance of RC frames. NZSEE Conference, sayfa. 10, India, 2014.
- [3] S. Abera, Effects of floor diaphragm flexibility in reinforced concrete structures and code provision. Yüksek Lisans Tezi, AddisAbabaInstitute of Technology School of Civil and Environmental Engineering, 2015.
- [4] N. H. Nandeesh, C. G. Shivanand, R. Kiran, Comparative study of rigid and flexible floor diaphragm. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 5(1), 67-71.2018.
- [5] J. Vielma, A. H. Barbat, S. Oller, Seismic performance of waffled-slab floor buildings. Structures and Buildings , 3, 169-182, 2008.<https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.3.169>
- [6] Ö. Özlem, Doğrusal olmayan taşıyıcı sistemlerde rijit diyafram kabulünün araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2006.
- [7] T. Nyome, T. K. T. Htun, Comparative study of seismic behavior of reinforced concrete building with flat slab and conventional slab floor system. International Journal of Engineering Trends and Applications (IJETA). 5(5), 13-17. Department of Civil Engineering West Yangon Technological University: Myanmar,2018.
- [8] S. K. Moon, D. G. Lee, Effects of inplane floor slab flexibility on the seismic behaviour of building structures. EngngStruct , 16(2), 129-

- 144,1994.[https://doi.org/10.1016/01410296\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/01410296(94)90038-8)
- [9] H. Rezaeian, C. G. Clifton, J. Lim, Inertial forces from floor diaphragms in braced multi-story buildings. NZSEE Conference, .2017.
- [10] Y.E. Akkaş, TBDY 2018' e göre farklı döşeme tiplerinin yüksek bina sınıfındaki bir yapıda doğrusal olmayan davranışa olan etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Mersin, 2021.
- [11] TBDY. 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Başkanlığı. Ankara,2018.
- [12] PEER, NGA Strong Motion Database. <http://peer.berkeley.edu/nga> , 2020
- [13] SAP2000. Integrated Software forStructural Analysis and Design Program. Berkeley, California: Computers and Structures Inc.





Okul servislerinde binış sürelerine ilişkin istatistiklerin Bootstrapping yöntemiyle kestirimi

Estimation of statistics on boarding times in school buses using Bootstrapping

Yusuf Kağan Demir^{1,*}, Hatice Göçmen Demir²

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Bu çalışmada, aynı yaş gruplarından (ilkokul, ortaokul ve lise) oluşan yolcular ile engelli-lise grubu ile ilkököl ve ortaokul öğrenci yolcu grubunun karışık hizmet aldığı okul servislerine ortalama binış süreleri araştırılmıştır. Çalışmada küçük örneklemelerden ana kütleye ait parametre kestirimleri için Bootstrapping Yönteminden yararlanılmıştır. Ortalama binış sürelerinin ilkököl öğrencileri için 4.0, ortaokul öğrencileri için 4.8, lise öğrencileri için 4.2, engelli-lise öğrencileri için 11.9 ve ilkököl-ortaokul karışık öğrencileri için 2.37 s/yolcu olarak kestirilmiştir. Bootstrapping yöntemi uygulamasında, ana örnek sayısının düşük olduğu durumlarda, alt-örnek sayısının artmasının kestirim üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Okul servisi, Ortalama binış süresi, Bootstrapping yöntemi

1 Giriş

Yükleme süresi, toplu taşıma aracının durakta yolcu iniş ve binışleri için harcadığı süreyi temsil etmektedir. Bu süre iniş binış için kapıların açıldığı ve aracın hareket için tüm kapıların kapattığı an arasındaki süreyle ölçülür. Bu süreye içinde kapıların açılıp kapanma süresi de dahildir. Yükleme süresi toplu taşıma kapasite hesabı için önemli parametrelerden birisidir. HCM 2000'de [1] yükleme sürelerinin, duraklarda binış ve iniş hacimlerinin kişi başına ortalama binış ve iniş süreleriyle çarpılarak bulunduğu belirtilmiştir. Tablo 1'de HCM 2000 tarafından önerilen iniş ve binış süreleri görülmektedir. Yükleme zamanı, iniş binış kapılarının genişliği, platform yüksekliği, eş düzey binışler ve inişler ödeme sistemi, yaş, cinsiyet ve kültürel farklılıklar gibi değişkenlerden etkilenmektedir.

Kraft ve Bergen [2] nakit para ödemeli sistemlerde para üstü verildiğinde yolcu başına binış süresini 2-6.5 saniye arasında, tam ücret verildiğinde ise 1.5-3.4 saniye arasında kaldığını bulmuştur. Levinson [3] yükleme süresini durak başına düşen süre olarak gözlemiştir ve yükleme süresinin yoğun hatlarda durak sayısının azaltılması ve farklı ödeme sistemleri ile düşürülebileceği sonucuna varmıştır.

Abstract

In this study, the average boarding times of passengers from the same age groups (primary school, secondary school, and high school) were estimated. Additionally, the boarding times on the shuttles where the disabled high school group and the primary and secondary school student passenger groups get mixed services are taken into account. In the study, the population parameter estimations were made from small samples using the bootstrapping method. As a result of the study, the average boarding times were found to be 4.0 for primary school students, 4.8 for secondary school students, 4.2 for high school students, 11.9 for disabled high school students and 2.37 s/passenger for mixed primary and secondary school students. In cases where the number of main samples is low, the increase in the number of sub-samples in the Bootstrapping method has no effect on the estimation.

Keywords: School shuttle, Average boarding time, Bootstrapping method

Fernandez v.d. [4] kapı genişliğinin binış süreleri üzerine olan etkilerini incelemiştir. Araştırmada kapıların genişliklerinin artmasıyla binış sürelerinin %20'ye kadar azaltılabileceği görülmüştür. York [5] Londra otobüsleri için yaptığı çalışmada yükleme süresi hesabında kişi başına binış sürelerini 1.6-8.4 saniye arasında almıştır. Rajbhandari v.d. [6] otomatik yolcu sayım sistemleri kullanarak yaptıkları analizler sonucu kişi başına en düşük binış süresini 6 ile 7 saniye arasında bulmuşlardır. Neumann v.d. [7] Berlin kentinde farklı toplu taşıma türleri için yürüttüğü çalışmada otobüs için binış süresini 2.04 s/yolcu bulmuştur.

Novales v.d. [8] binış sürelerindeki kayıp zamanı incelemişler ve sonuç olarak yağmurlu havalarda binış sürelerini ciddi oranda arttırdığını bulmuşlardır. Özuysal v.d. [9] İzmir için yaptıkları çalışmada otobüs duraklarında yolcu başına binışlerin 4.23 s/yolcu ya kadar çıkabildiğini bulmuşlardır. Sarısoy [10] İstanbul'da minibüsler için yaptığı çalışmada normal beklemler için yolcu-iniş binışlerinin ortalama 4.5 s/yolcu bulmuştur. Sarısoy ayrıca toplam iniş binış süresinin yolcu sayısı ile doğru orantılı olduğunu, bu sürenin 0.36 s kayıp zamanı artı yolcu başına 2.12 s ye eşit olduğunu belirtmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ykdemir@ohu.edu.tr (Y. K. Demir)

Geliş / Received: 06.11.2022 Kabul / Accepted: 02.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1200186

Tablo 1. HCM 2000 önerilen biniş süreleri [1]

Otobüs Türü	Kapı Sayısı	Atıl Süre(s)	Biniş (s/yolcu) Ödeme Yöntemi		İniş (s/yolcu)
			Ön-Ödemeli	Biletli	
Tek Gövde	1	2.0-5.0	2	2.6-3.0	1.7-2.0
	1		2	-	1.7-2.0
	2		1.2	1.8-2.0	1.0-1.2
	2		1.2	-	1.0-1.2
	2		1.2	-	0.9
Körüklü	4	2.0-5.0	0.7	-	0.6
	3		0.9	-	0.8
	2		1.2	-	-
Özel	2		-	-	0.6
	6		0.5	-	0.4

Sadeghpour [11] İstanbul'da toplu taşıma otobüsleri için yaptığı gözlemlerde biniş sürelerini kadınlarda 3.72 s/yolcu, erkeklerde 3.39 s/yolcu, 65 yaş üzeri yolcularda 5.85 s/yolcu, 25 yaşından küçük yolcularda 3.34 s/yolcu, 25-40 arası yolcularda 3.29 s/yolcu ve 40-65 yaş grubu yolcularda ise 3.18 s/yolcu olarak belirtmiştir. Ayrıca basamaklı otobüslerin biniş süresini %20 arttırdığını belirtmiştir.

Biniş süreleri ve dolayısıyla yüklenme zamanının farklı değişkenlerden etkilendiği görülmektedir. Günümüzde doğrudan servis araçlarıyla ilgili bir çalışma mevcut değildir. Servis araçları ile ilgili çalışmanın avantajı yaş gruplarının bağdaşık biçimde gözlenme şansı olmasıdır. Bu amaçla biniş süreleri için farklı yaş gruplarına hizmet veren servisler incelenmiştir. Çalışmada yaş grupları ilkökul, ortaokul, lise olarak tanımlanmıştır. Engelli lise grubu ve ilkökul-ortaokul grubuna karışık hizmet veren iki grupta çalışmaya eklenmiştir. Gözlem yapılan servis araçlarının tamamı **Şekil 1**'ki gibi benzer türdedir. Binişler için servis basamaklarını tırmanarak iç platforma ulaşılabilir. Ödeme sistemi yoktur ve tüm yolcular oturarak yolculuk etmektedirler.



Şekil 1. Servis aracı

Çalışma hem yalıtılmış yaş gruplarına ait kişi başı ortalama biniş sürelerini belirlemek hem de düşük örnekleme sayısına karşın Bootstrapping yöntemiyle anakütlenin ortalama, standart sapma ve medyanını %95 güven aralığında kestirmeyi amaçlamaktadır.

2 Materyal ve metod

Çalışma için ana örnekleme verileri gözlem yoluyla elde edilmiştir. Sabah ve akşam servisleri için servis başına bir gözlemci toplamda 16 servis aracından gözlem yapmıştır. Gözlemciler her bir durakta sabah saatlerinde, kapıların açılması ve kapanması arasında geçen süreyi servise binen kişi sayısı ile beraber kaydetmişlerdir. Çalışmada ilkökuller için 98, ortaokuller için 177, liseler için 612, engelli-lise grubu için 52 ve ilkökul-ortaokul karma grubu için 52 olmak

üzere toplamda 963 adet biniş verisi elde edilmiştir. Çalışmada farklı yaş gruplarındaki öğrenci popülasyonuna ait kişi başına düşen ortalama biniş süresi istatistikleri ortalama, standart sapma ve medyan değerlerini kestirmek için Bootstrapping yöntemi kullanılmıştır.

2.1 Bootstrapping yöntemi

Bootstrapping yöntemi elli yıla yakın bir geçmişe sahiptir. Yöntemi son dönemde ilgi çekici yapan etken bilgisayarların işlem gücündeki gelişmedir. Efron [12] tarafından 1979 yılında geliştirilen yöntem bağımsız gözlemlerden yeniden örnekleme yöntemiyle popülasyona ait istatistiklerin kestirilmesini sağlamaktadır.

Bootstrapping yöntemi parametrik olmayan bir istatistik yöntemidir ve yeniden örnekleme olarak da anılır. Monte-Carlo simülasyonu kullanarak yığına ait istatistiklerin kestirilmesi için kullanılır. Benzer yöntemlerin geçmişi 1940'lara kadar gitse de bilgisayarların gelişmesi sayesinde Monte-Carlo simülasyonu ile kullanışlı bir uygulamaya dönüşmüştür [13].

Yöntem ana örneklemeden tekrarlı alt örnekleme yapmaya dayanır. Herhangi bir istatistiğe ait alt örneklemlerin ortalamalarına ait dağılımın ortalama ve standart hatası hesaplanarak ana kütleyle ait parametreler ve güven aralıkları kestirilebilmektedir. Yöntemin en önemli kazançlarından biri ana kütle dağılımı için bir ön kabuller yapmadan ana kütle parametrelerini kestirebilmesidir. Örneğin hipoteze dayalı klasik kestirim yöntemleri gibi bir olasılık dağılım kabulüne ihtiyaç duymaz. Tekrar örnekleme sırasında aykırı değerlerin tekrarlı kullanımı örneklerin dağılımını çarpıtması olasılığına sahip olsa da aykırı değerlerin klasik yaklaşım içinde çarpıklığa neden olmasının standart hatayı etkilemesi aynı düzeyde mümkündür. Birçok problemde gerçek güven aralığı bilinemez. Buna karşın Bootstrapping yönteminin güven aralık tahminlerinin normal dağılım kabulüne dayanan örnek varyansından hesaplanan güven aralıklarına göre asimptotik olarak daha tutarlı ve doğru olduğu kabul edilmektedir [14].

Örneklerden yola çıkarak yığına ait parametre kestirimi klasik istatistik ve Bootstrapping yönteminin ortak noktası olsa da klasik kestirim de sonucun geçerliliği için ön kabullere dayanan test istatistikleri kullanılmaktadır. Bootstrapping yöntemi ise sadece ana örnekten alınan tekrarlı alt örnekleri kullanarak ön kabul yapmadan kestirim yapmaktadır.

Dağılımı F olan (dağılımın türü bilinmiyor) bir yığından rastgele alınan örnekler;

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

olsun. $\hat{\theta}$, x örneği kullanılarak kestirilen F dağılımına ait θ parametresi olursa, herhangi bir t değerine eşit ve daha küçük değerlere ait olasılıkları veren deneysel birikimli dağılım fonksiyonu

$$\hat{F}_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(x_i \leq t) \quad (2)$$

ile tanımlanır. \hat{F}_n Dağılımından yerine koyarak yapılan Bootstrapping örneklemeleri;

$$\mathbf{x}^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T \quad (3)$$

ile gösterilir. Bu örneklemeler B gibi yüksek bir sayıyla tekrar edilirse, her bir x^* alt örneklerinden kestirilen $\hat{\theta}^*$ parametrelerinin oluşturduğu dağılım, yığına ait $\hat{\theta}$ parametresinin dağılımına yaklaşır.

$$P = (\hat{\theta}_{(1)}^*, \hat{\theta}_{(2)}^*, \dots, \hat{\theta}_{(B)}^*), \quad (4)$$

Yukarıda belirtilen P vektörü $\hat{\theta}_{(1)}^* \leq \hat{\theta}_{(2)}^* \leq \dots \leq \hat{\theta}_{(B)}^*$ şartını sağlarsa, bu vektör kullanılarak α güven düzeyinde θ için istenen güven aralığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} &(\hat{\theta}_{(m)}^*, \hat{\theta}_{(B-m)}^*) \\ m &= [\alpha/2 * B] \end{aligned} \quad (5)$$

P vektörünün dağılımının simetrik normal dağılım olduğu kabul edilirse %95 güven aralığı için alt ve üst değerler;

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{(0.025)}^* &\cong \bar{\theta}^* - 2 * \frac{\sum(\hat{\theta}_{(i)}^* - \bar{\theta}^*)^2}{n-1} \\ \hat{\theta}_{(0.975)}^* &\cong \bar{\theta}^* + 2 * \frac{\sum(\hat{\theta}_{(i)}^* - \bar{\theta}^*)^2}{n-1} \end{aligned} \quad (6)$$

olarak yazılabilir. θ parametresi yığına ait herhangi bir istatistiğe ait olabilir. Bootstrapping yöntemi ile yığına ait medyan ve standart sapma da güven aralıklarıyla kestirilebilir.

Çalışmada Bootstrapping yöntemini uygulamak için her yaş grubu için ana örnek havuzundan çekilecek en yüksek alt örnek büyüklüğü, en düşük örnekleme sahip ilkökul ve lise öğrencilerinin beraber kullandığı örnek olan 24 olarak seçilmiştir. Karşılaştırma amacıyla denemeler 5,10,15,20 ve 24 adet örnekle tekrar edilmiştir. Öncelikle ana örneklerden yerine koymadan farklı sabit alt örnekler çekilmiştir. Daha sonra bu örneklerden yerine koyarak 1000 defa alt örnekleme yapılmıştır. Ana örneğin 24'den büyük olduğu durumlar için alt örneklemeler 100 defa tekrar edilerek ortalamaları alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de görülmektedir. Tablo 2'de karşılaştırma açısından 1000 ve

5000 alt-örnek denemesi ve bunlara ait farklı örnek büyüklükleri sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda 100 adet sabit-alt örnek ortalamasıyla hesaplanmıştır. Tabloda ana örneklerden kestirilen değerler de görülmektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Bootstrapping yöntemiyle ana kütlelin istatistiklerinin kestiriminde alt örnek büyüklüğü, alt örnek sayısına göre daha etkili bir parametredir. Ana örnek büyüklüğü küçüldükçe standart hata artmaktadır. Özellikle ana örnek büyüklüğü küçükse standart hatalar arasında farklar büyümektedir. Tablo 2'de ortaokul-lise yaş grubu 24 örnekle en düşük gözleme sahiptir. Standart hata 5 örnek büyüklüğünden 24'e çıktığında üç kate yakın azalmaktadır. Bu durum Tablo 1'de görülmektedir. Örnek sayıları arttıkça standart hata da düşmektedir. Diğer yandan alt-örnek sayısı arttıkça dağılım grafiğinin basıklığı artmaktadır. Düşük alt-örnek sayısı kestiriminde, ortalamadan uzak değerlerin olasılıkları yüksek alt-örnek sayısına göre daha yüksek olmaktadır (Şekil 2).

Kestirimler için 5000 örnek sayısı ve 24 örnek büyüklüğü temel alındığında, en yüksek biniş süresi 11.8 s/yolcu ile engelli-lise grubu olmuştur. Bu grup aynı zamanda 5.0 s/yolcu ile en yüksek standart sapmaya sahip grup olmuştur. Buna karşın ortaokul-ilkokul karışık binişler ortalama 2.37 s/yolcu ile en düşük biniş süresine sahiptir. Aynı zamanda bu grup 0.14 s/yolcu ile en düşük standart sapmaya sahip olmuştur. Lise grubu ortalama biniş süresi 4.1 s/yolcu ile ilkökullarına çok yakındır ancak standart sapması daha yüksektir. Ortaokullar 4.9 s/kişi ile engelli-lise grubundan sonra 4.9 s/kişi ile en yüksek biniş süresine sahip grup olmuştur.

Çalışmada farklı yaş gruplarını temsil eden veri toplama sürecinde, bazı gruplara ait örneklemeler düşük sayıda kalmıştır. Diğer ana örneklerden alt-örnekler alınarak, ana kütleyle ait ortalama, standart sapma ve medyanlar kestirilmiştir. Ana örneğin en yüksek olduğu (612-biniş), Bootstrapping yöntemiyle 5000 örnek sayısı ve 24 örnek büyüklüğü ile biniş süresi 4.1 s/yolcu (ana örnek ortalaması 4.3 s/yolcu) olarak kestirilmiştir. Standart sapmalara baktığımızda ana örnekten kestirilen yığına ait standart sapma (1.97 s/yolcu) Bootstrapping yöntemi ile 1.3 s/yolcu olarak kestirilmiştir. Benzer şekilde ana örneğe ait medyan 3.9 s/yolcu iken 24 örnek kullanılarak Bootstrapping yöntemi ile ana örneğe benzer olarak 3.9 s/kişi bulunmuştur.

Ortaokul grubu en yüksek biniş sürelerine sahip olmuştur. İlkokul ve lise grubu ise benzer biniş sürelerine sahiptir. Engelli-lise grubu doğal olarak daha yüksek biniş sürelerine sahiptir. Gruplar karma yapıldığında ortaokulların ve ilkökulların biniş süreleri yarıya düşmektedir.

5000 örnek sayısı ve 24 örnek büyüklüğü temel alındığı kestirimlere göre anakütlenin normal dağılım kabul edildiği teorik olasılık dağılımları **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'te görülmektedir.

Bootstrapping yöntemi ile örnekleme sayılarının az olduğu çalışmalarda anakütleyle ait istatistiklerin tutarlı kestirilmesi mümkün olmaktadır. Ancak hesaplama zamanı geleneksel örnek kestirimine göre uzundur. Python

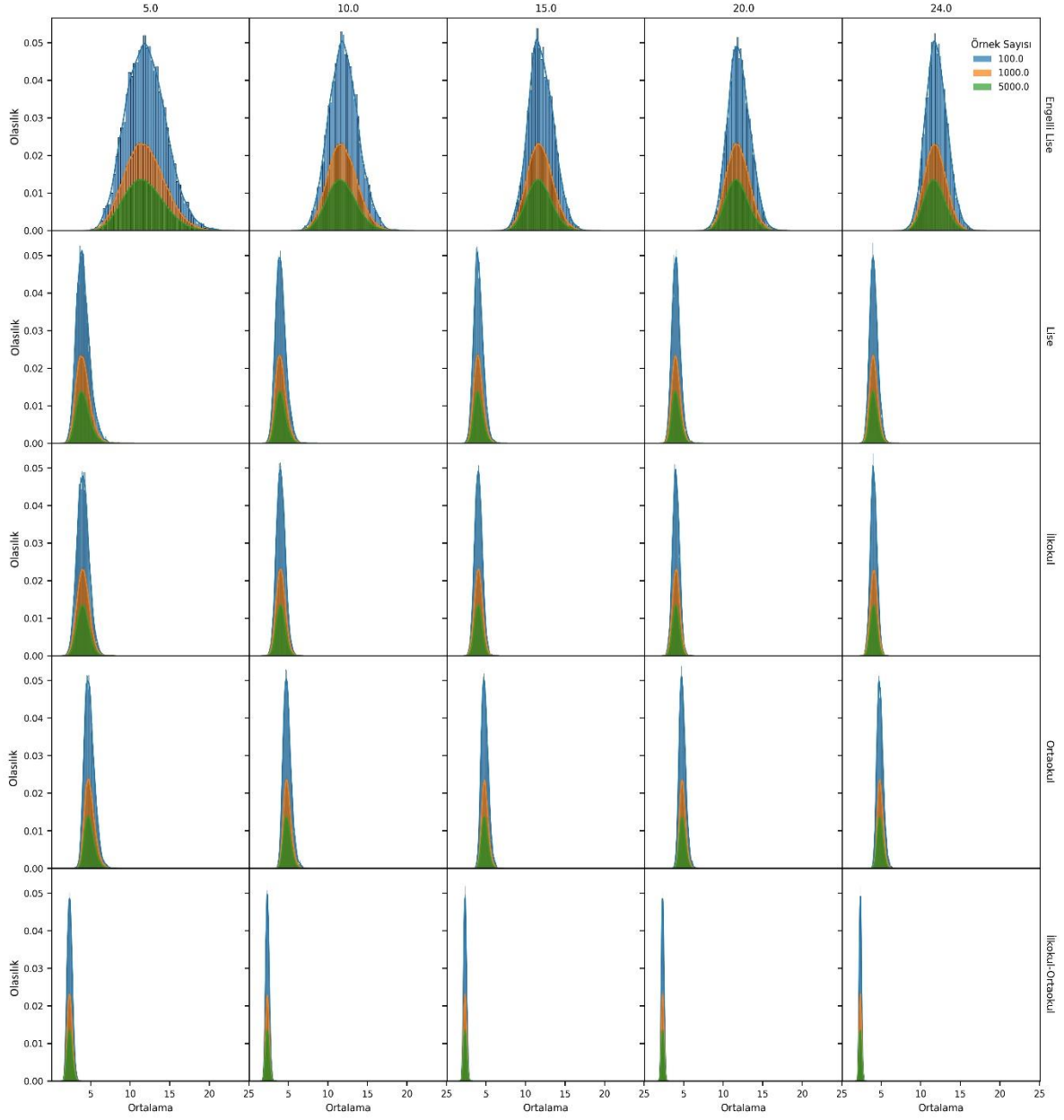
kodlamasında Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz ve 8.00 GB olan donanımlı bir bilgisayarda 5000 alt örnek

sayısı ve 5 farklı örnek büyüklüğü için 5 yaş grubu kestirimi 100 deneme sayısında 27 dakika sürmektedir.

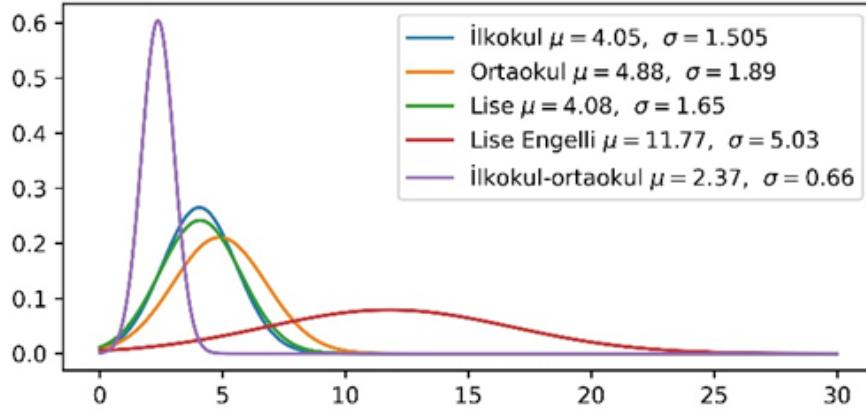
Tablo 2. Ana örnek ve Bootstrapping kestirimleri

Yaş Grubu	Örnek Sayısı	Örnek Büyüklüğü	Ortalama (s/yolcu)		Std. Sapma (s/yolcu)		Medyan (s/yolcu)		%95 Güven Aralığı için Alt ve Üst Sınır Değerleri (s/yolcu)						
			ort.	s.h.	ort.	s.h.	ort.	s.h.	Ortalama	Std. Sapma	Medyan				
									Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	
Engelli Lise	Ana Örnek	52	11.86	0.740	5.33		11.02		10.38	13.34					
	100	5	12.011	2.486	4.432	1.592	11.507	3.378	7.04	16.98	1.25	7.62	4.75	18.26	
		24	11.996	1.342	5.091	0.819	11.358	2.072	9.31	14.68	3.45	6.73	7.21	15.50	
	1000	5	11.864	2.476	4.407	1.589	11.369	3.371	6.91	16.82	1.23	7.58	4.63	18.11	
		24	11.860	1.313	5.061	0.854	11.217	2.060	9.23	14.49	3.35	6.77	7.10	15.34	
	5000	5	11.777	2.443	4.382	1.582	11.245	3.311	6.89	16.66	1.22	7.55	4.62	17.87	
		24	11.768	1.293	5.028	0.829	11.081	1.991	9.18	14.35	3.37	6.68	7.10	15.06	
	Lise	Ana Örnek	612	4.296	0.080	1.97		3.91		4.14	4.45				
		100	5	4.054	0.847	1.385	0.657	3.854	0.975	2.36	5.75	0.07	2.70	1.90	5.80
			24	4.062	0.503	1.622	0.437	3.809	0.559	3.06	5.07	0.75	2.50	2.69	4.93
1000		5	4.071	0.870	1.424	0.663	3.868	1.029	2.33	5.81	0.10	2.75	1.81	5.93	
		24	4.067	0.514	1.659	0.446	3.779	0.566	3.04	5.10	0.77	2.55	2.65	4.91	
5000		5	4.081	0.847	1.408	0.653	3.888	0.997	2.39	5.77	0.10	2.71	1.89	5.88	
		24	4.081	0.490	1.645	0.421	3.824	0.574	3.10	5.06	0.80	2.49	2.68	4.97	
Ortaokul		Ana Örnek	177	4.874	0.098	1.31		4.61		4.68	5.07				
		100	5	4.866	0.637	1.052	0.509	4.675	0.704	3.59	6.14	0.03	2.07	3.27	6.08
			24	4.868	0.385	1.231	0.318	4.620	0.384	4.10	5.64	0.59	1.87	3.85	5.39
	1000	5	4.899	0.638	1.065	0.515	4.713	0.722	3.62	6.18	0.03	2.10	3.27	6.16	
		24	4.897	0.361	1.256	0.320	4.650	0.375	4.18	5.62	0.61	1.90	3.90	5.40	
	5000	5	4.879	0.614	1.012	0.484	4.709	0.689	3.65	6.11	0.04	1.98	3.33	6.09	
		24	4.879	0.354	1.189	0.302	4.656	0.357	4.17	5.59	0.59	1.79	3.94	5.37	
	İlkokul	Ana Örnek	98	4.066	0.161	1.59		4.03		3.74	4.39				
		100	5	4.044	0.739	1.306	0.489	3.966	0.964	2.57	5.52	0.33	2.28	2.04	5.89
			24	4.060	0.404	1.506	0.279	3.960	0.579	3.25	4.87	0.95	2.06	2.80	5.12
1000		5	4.065	0.761	1.326	0.499	4.003	0.986	2.54	5.59	0.33	2.33	2.03	5.97	
		24	4.067	0.430	1.523	0.289	3.996	0.594	3.21	4.93	0.95	2.10	2.81	5.18	
5000		5	4.051	0.739	1.309	0.498	3.961	0.964	2.57	5.53	0.31	2.30	2.03	5.89	
		24	4.050	0.400	1.505	0.289	3.926	0.580	3.25	4.85	0.93	2.08	2.76	5.09	
İlkokul-Ortaokul		Ana Örnek	24	2.369	0.142	0.69		2.223		2.09	2.65				
		100	5	2.371	0.305	0.574	0.205	2.270	0.404	1.76	2.98	0.16	0.98	1.46	3.08
			24	2.371	0.139	0.660	0.084	2.205	0.176	2.09	2.65	0.49	0.83	1.85	2.56
	1000	5	2.371	0.303	0.573	0.204	2.269	0.400	1.77	2.98	0.16	0.98	1.47	3.07	
		24	2.369	0.139	0.659	0.086	2.204	0.178	2.09	2.65	0.49	0.83	1.85	2.56	
	5000	5	2.369	0.304	0.573	0.205	2.268	0.401	1.76	2.98	0.16	0.98	1.47	3.07	
		24	2.369	0.139	0.659	0.085	2.204	0.177	2.09	2.65	0.49	0.83	1.85	2.56	

Ort.: ortalama, s.h.: standart hata



Şekil 2. Ortalamanın örnek sayısı ve büyüklüğüne göre değişimi



Şekil 3. Farklı yaş grupları için ortalama biniş süresi teorik dağılımları

4 Sonuçlar

Okul servislerinin incelendiği bu çalışmada benzer yaş gruplarının ortalama biniş süreleri gözlenmiştir. Çalışma sonucu iki açıdan değerlendirilmiştir. İlki farklı yaş gruplarına ait ortalama biniş süreleri, diğeri ise Bootstrapping yönteminin başarımıdır.

Biniş süreleri açısından çalışma değerlendirildiğinde, ilkokul öğrencilerinin ortalama biniş sürelerinin ve standart sapmalarının lise ve ortaokul öğrencilerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Ortaokul öğrencileri ise engelli-lise grubundan sonra en yüksek ortalama biniş süresine sahiptir. Bu durumun nedeni bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar bu farklılığın nedenleri ortaya çıkartabilir. Lise öğrencileri ise ilkokul öğrencilerine benzer biniş ortalamasına sahip olsa da daha yüksek standart sapmaya sahiptir. Yaş grupları içinde engelli-lise öğrencilerinin ortalama biniş süresi diğer gruplara göre yüksek olmuştur. Farklı engel düzeyleri nedeniyle biniş süreleri daha yüksek standart sapmaya sahiptir. Çalışmanın en dikkat çeken sonucu ilkokul ve ortaokul öğrencilerinin karma biçimde kullandığı servislerde ortalama biniş sürelerinin en düşük değere sahip olmasıdır. Ancak bu örnekleme diğer gruplara göre düşük düzeyde kalmıştır. Çalışma sırasında sadece bir karma servis kullanımında olduğundan gözlem sayısı düşük olmuştur.

Küçük örnek sayılarında, ana kütleyle ait bilgiye ulaşmak için deney tekrarı özellikle ulaştırma bilimi alanında çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Bu çalışmada düşük örnek sayılarıyla ana kütleyle ilişkin istatistiklerin Bootstrapping yöntemiyle kestirilebileceği görülmüştür. Ancak yetersiz örneklerde alt-örnek sayısının artırılması kestirim kalitesine bir etki yapmamaktadır. Diğer yandan küçük ana-örnekleri daha fazla alt-örnek sayılarıyla kestirmenin istatistiğin standart hatası üzerinde bir etkisi olmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, verilerin toplanmasında emeği geçen Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği öğrencileri,

Mehmet Can KÖKSAL, Ömer Faruk EKİNCİ, Ramazan Mert AKDOĞAN, Ahmet GÖKALP, Musa GÜNEŞ, Mehmet ALTUN, Tolgahan DOĞAN, Kader MURAL, Mücahit ŞİMŞEK, Osman Berke ULUDAĞ, Mehmet

GÜNDÜZ ve araçlarında gözlem yapma imkânı veren Niğde ACAR Seyahat yetkililerine teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] TRB, Highway Capacity Manual 2000. Washington, DC, 2000.
- [2] W. H. Kraft, T. F. Bergen, Evaluation of passenger service times for street transit systems. Transp Res Rec, 505,13–20, 1974.
- [3] H. S. Levinson, Analyzing transit travel time performance. Transportation Research Record, 915(1-6), 1983.
- [4] R. Fernández, P. Zegers, G. Weber, and N. Tyler, Influence of platform height, door width, and fare collection on bus dwell time: laboratory evidence for Santiago de Chile. Transp Res Rec, 2143(1), 59–66, 2010. <https://doi.org/10.3141/2143-08>
- [5] I. York, Factors affecting bus-stop times, Transport Research Laboratory, T1/25, 1993.
- [6] R. Rajbhandari, S. I. Chien, and J. R. Daniel, Estimation of bus dwell times with automatic passenger counter information. Transp Res Rec, 1841, 120–127, 2003. <https://doi.org/10.3141/1841-13>
- [7] A. Neumann, S. Kern, and G. Leich, Boarding and alighting time of passengers of the Berlin public transport system, Technische Universität Berlin, Berlin, 2020.
- [8] M. Novales, A. Orro, J. Pérez-López, J. Feal and M. R. Bugarín, Increasing boarding lost time at regular bus stops during rainy conditions: A case study. Journal of Public Transportation, 23,1,63-80,2021, <https://doi.org/10.5038/2375-0901.23.1.4>
- [9] M. Özuysal, S. Tanyel, ve S. P. Çalışkanelli, Otobüs duraklarındaki yolcu iniş-biniş zamanları üzerine bir tartışma. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 460–467, 2016. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.17894>
- [10] G. Sarısoy, İstanbul'da minibüs taşımacılığında yolcu inme binme sürelerinin irdelenmesi. Yüksek Lisans

Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2017.

- [11] M. Sadeghpour, Analyzing passenger boarding and alighting service times for bus transportation in İstanbul, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
- [12] B. Efron, Nonparametric estimates of standard error: the jackknife, the bootstrap and other methods,” *Biometrika*, 68(3), 589, 1981.<https://doi.org/10.1093/biomet/68.3.589>
- [13] M. R. Chernick and R. A. LaBudde, An introduction to bootstrap methods with applications to R, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011,
- [14] G. Cline, Nonparametric statistical methods using R, 1st Edt., Ed - Tech Press, London, 2020.





Yeraltı suyunun spektral davranışa etkisi Effect of groundwater on spectral behavior

Ebru Civelekler^{1,*} , Kamil Bekir Afacan² 

^{1,2} Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir Türkiye

Öz

Kuru ve doymun durumda olan zeminlerin çevrimsel yüklemeye esnasında göstereceği zemin davranışı farklıdır. Özellikle sismik yükler altında doymun olan zeminlerde meydana gelen tekrarlı gerilmeler sonucunda, zeminde sıvılaşma, büyütme ve taşıma gücü kaybı gibi zemin problemlerinden dolayı hasarlar meydana gelebilmektedir. Dinamik yüklerin etkisiyle oluşacak kayma birim şekil değişme seviyeleri de farklılık gösterecek ve sönümlenme seviyeleri de bu durumdan etkilenenektir. Bu çalışmada aynı bölgede yer alan yeraltı suyu bulunmayan 2 sondaj ile yüzeye yakın yeraltı suyu seviyesine sahip doymun zemin tabakalarından oluşan 2 sondaj için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmış ve su seviyesinin etkisi tartışılmıştır. Çalışmada Eskişehir şehir merkezinde alüvyon zemin üzerinde yer alan 4 sondaj için 11 farklı istasyona ait gerçek ivme kayıt verileri kullanılmıştır. Kayma dalgası hızının etkisinin görülmemesi için kayma dalgası hızları yakın olan sondajlar tercih edilmiştir. Analizler hem frekans (eşdeğer doğrusal) hem de zaman tanım alanında (doğrusal olmayan) çözümler yapabilen Deepsoil 7.0 yazılımında yapılmıştır. Analizler sonucunda yeraltı suyu bulunan sondajlarda daha büyük spektral parametreler elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yeraltı suyu, Zemin özellikleri, Bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz, Bir boyutlu doğrusal olmayan analiz

1 Giriş

Türkiye, Alp-Himalaya deprem kuşakları arasında yer almakta ve aktif fay hatlarını bünyesinde barındırmaktadır. Bu nedenle bugüne kadar 1999 Kocaeli, 1999 Düzce, 2011 Van, 2020 Elazığ ve 2020 İzmir olmak üzere aletsel kayıtlara geçmiş; çok büyük kayıplar ve hasarlarla sonuçlanan birçok deprem yaşamıştır. İnceleme alanı olan Eskişehir, 1999 Kocaeli depreminden etkilenerek yapısal hasar ve can kayıpları yaşayan şehirlerden biridir. Ayrıca 20 Şubat 1956'da aletsel kayıtlara göre 6.4 büyüklüğünde Eskişehir merkezli kaydedilen bir deprem sonucunda bölgede büyük can ve mal kayıpları yaşanmıştır.

Dinamik yükler etkisinde farklılaşan zemin davranışları ilk olarak 1964 Niğata Depremi'nden sonra dikkat çekmeye başlamış; sonralarında 1985 San Francisco, 1989 Loma Prieta, 1995 Kobe, 1999 Kocaeli, 2011 Van ve 2020 İzmir depremleri gibi birçok depremde araştırmacılar tarafından

Abstract

The behavior of dry and saturated soils during cyclic loading is different. As a result of cyclic stresses that occur on soils, especially saturated soils under seismic loads, damage caused by ground problems such as liquefaction, amplification and loss of bearing capacity on the soil is expected. During stresses that generated under the effect of dynamic loads, the damping ratio levels may change due to the soil properties (dry sand or saturated sand). In this case, soil behavior analysis is performed in order to determine the amplification-liquefaction risk resulting from high strains. In this study, one-dimensional equivalent linear and non-linear analyzes were performed for two boreholes without groundwater and two boreholes consisting of saturated soil layers with near-surface groundwater levels in the same region. The soil profiles were excited by using real acceleration recording data of 11 different stations for 4 boreholes located on the alluvial ground in Eskişehir city center. For the study, boreholes with the same shear wave velocities were preferred. Analyzes were performed in Deepsoil 7.0 software, which can perform both frequency (equivalent linear) and time history (non-linear) solutions. As a result of the analyzes, larger spectral parameters were obtained in boreholes with groundwater.

Keywords: Groundwater, Soil properties, One-dimensional equivalent linear analysis, One-dimensional nonlinear analysis

daha fazla çalışılmaya başlanmıştır. Araştırmalarda depremler nedeniyle ortaya çıkan yapısal hasarlar incelendiğinde; deprem odak noktasına benzer uzaklıklarda olan hatta daha uzak olan yerleşim alanlarının depremden farklı derecede etkilenmesinin nedenleri incelenmiştir. Bu incelemede anakaya ile yer yüzeyi arasındaki zemin tabakalarının türlerine, kalınlıklarına, anakaya derinliğine ve hareketin özelliği gibi birçok etkene bağlı olarak hasar durumlarının değiştiği gözlemlenmiştir [1-3]. Zemin tabakalarının içerisinde sismik dalgaların yayılmasından kaynaklanan hareketin yoğunluğundaki ve frekans içeriğindeki değişiklik topoğrafik özellikleri ile birlikte zemin etkilerinin doğrudan yansımalarıdır [4]. Bu nedenle yüzeyde hissedilen hareket, anakaya hareketinin başlangıcından yüzeye ulaşmasına kadar saha özelliklerinin tamamından etkilenip oluşturduğu harekettir. Bu da saha koşullarının tüm özelliklerini (geoteknik ve jeolojik) göz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ecivelekler@gmail.com. (E. Civelekler)
Geliş / Received: 11.10.2022 Kabul / Accepted: 06.12.2022 Yayımlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1187363

önüne alarak dinamik davranışın ortaya konmasıyla açıklanmaktadır. Günümüzde depreme yakın sahalarda sismik risk, zemin amplifikasyonu, saha baskın periyodu ve spektral parametre değerlerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmüştür [5-8].

Zemin büyütmesi kavramı, geoteknik deprem mühendisliği çalışmalarında birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve zeminin büyütme faktörünün özellikle yumuşak zeminlerde deprem sırasında yapılarda oluşabilecek hasarı kontrol eden bir parametre olduğu kabul edilmiştir [9]. Bu nedenle deprem zararlarını en aza indirmeyi ve güvenli yapıların tasarımını amaç edinen geoteknik deprem mühendisliği çalışmaları için sahaya özel tasarım davranış spektrumlarının ortaya konması gerekmektedir. Bu çalışmalar kuvvetli yer hareketi etkisinde oluşan gerilme-birim deformasyonların ve bu bağlamda oluşabilecek büyütme-sıvılaşma risklerinin belirlenmesini amaç edinen zemin davranış analizleri ile yapılmaktadır.

Günümüzde bir boyutlu zemin davranış analizleri frekans alanı analizleri olarak bilinen eşdeğer doğrusal zemin davranış analizleri ve zaman alanı analizleri olarak bilinen doğrusal olmayan zemin davranış analizleri olarak iki farklı yöntem ile yapılmaktadır. Eşdeğer doğrusal zemin davranış analizleri; basitliği, pratikliği ve daha az hesaplama gerektirmesi nedeniyle daha fazla tercih edilmiştir [10, 11]. Fakat bir boyutlu eşdeğer doğrusal analizler, özellikle yüksek gerilmelerin olduğu sahalarda zeminin doğrusal olmayan (elastik olmayan) davranışını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu durumlarda doğrusal olmayan zemin davranış analizlerinin yapılması önerilmektedir [10].

Bu çalışmada amaç; yeraltı suyunun yüksek seviyelerde olduğu 2 sondaj ve yeraltı suyu seviyesinin 30 metre derinlik için var olmadığı 2 sondaj örnekleri için bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yaparak, yeraltı suyu seviyesinin zemin davranışına etkisini ortaya koymaktır.

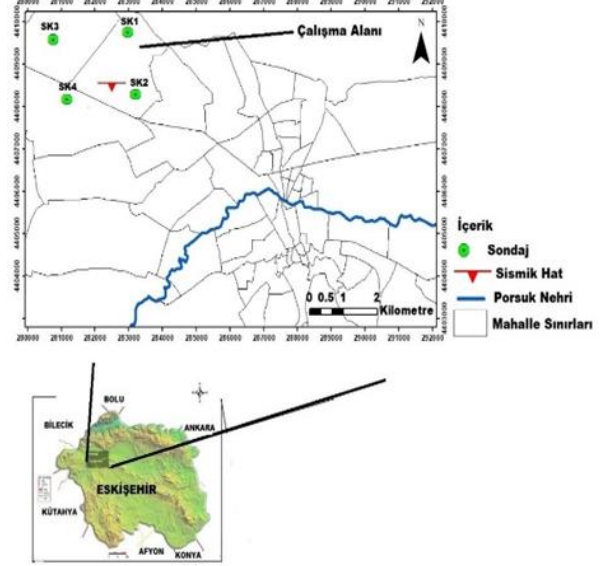
2 Materyal ve metod

2.1 İnceleme alanının özellikleri ve TBDY yaklaşımı

Eskişehir coğrafi olarak İç Anadolu Bölgesi'nde yer almakta ve deniz seviyesinden yaklaşık 790 m yüksekliktedir. 4 sondajın bulunduğu çalışma alanı bölgesi Eskişehir şehir merkezinde yer alan ve birbirine komşu olan alüvyon zemin üzerinde bulunan Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahalleleridir. Çalışma kapsamında yer altı su seviyesinin yüzey davranışına etkisini görebilmek amacıyla kayma dalgası hızı (V_s) değerleri birbirlerine yakın olan sondajlar tercih edilmiştir. Kayma dalgası hız profilleri arazide sismik yöntemler kullanılarak yapılan sismik kırılma-yansıma çalışmasından elde edilmiştir. Çalışma alanı lokasyon haritası Şekil 1'de gösterilmektedir.

Son yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği TBDY (2018) 2. bölümünde yapı taşıyıcı sistemlerinin deprem hesabında kuvvetli yer hareketinin özelliklerinin, tasarıma esas kuvvetli yer hareketi düzeyi ile uyumlu olacak şekilde kullanılmasını önermektedir. Bu da o saha için depremin büyüklüğü, sahanın faya uzaklığı, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin özelliklerinin dikkate alınarak

deprem kayıtlarının seçilmesi ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmesini gerektirmektedir. Yönetmelik, yayınlanan sismik haritayla birlikte, noktasal olarak spektral davranışı vermekte ve tasarımcının kullanımına sunmaktadır. Fakat kayma dalgası hızı 180 m/s'den küçük ve sıvılaşma riski olan zeminler için sahaya özel analiz yapılmasını şart koşmuştur.



Şekil 1. Çalışma alanı lokasyon haritası

2.2 Zaman tanım alanında deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi

Bu çalışmada zemin davranış analizlerinde (eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan) kullanılan 11 farklı istasyona ait kuvvetli yer hareketi verileri Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi PEER veri tabanından (Pasific Ground Motion Database) elde edilmiştir [12].

Çalışmada $M_w > 6.0$ büyüklüğe sahip ve doğrultu atımlı fay üzerinde meydana gelmiş, zemin özellikleri ve sismik risk durumu göz önüne alınarak sahanın özelliklerine yakın olduğu varsayılan 11 kuvvetli yer hareketi tercih edilmiştir.

Analizlerde kullanılan 11 kuvvetli yer hareketi Tablo 1'de yer almaktadır. Ayrıca çalışmada analizlerin yapıldığı 4 sondajın bulunduğu Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahalleleri için AFAD'ın hazırladığı Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulamasına göre DD-2 (konut, işyeri tasarımı için kullanılan) yer hareketi düzeyi için deprem karakteristikleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

Bu çalışmada bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri yapabilmek için Deepsoil 7.0 yazılımı tercih edilmiştir. Bu yazılım; hem frekans alanlı çözümlenmeleri ile eşdeğer doğrusal hem de zaman tanım alanlı çözümlenmeleri ile doğrusal olmayan analizler yapılabilir [13].

4 sondaj üzerinde 11 farklı kuvvetli yer hareketi verisi kullanılarak, toplam 44 eşdeğer doğrusal ve 44 doğrusal olmayan analiz yapılmıştır. Çalışma alanındaki mahallelere yönelik AFAD'ın önerdiği PGA değerlerinin Batıkent mahallesinde 0.290 g, Aşağısöğütönü mahallesinde 0.282 g

ve Zincirlikuyu mahallesinde 0.283 g olarak verildiği görülmektedir (Tablo 2). Bu nedenle çalışmada kullanılan deprem kayıtları PGA =0.3g ve DD-2 durumuna göre ölçeklendirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ölçeklendirilmiş anakaya ivmeleri Şekil 2’de sunulmaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere, seçilen depremler birbirlerinden hem frekans, hem süre hem de döngü sayısı olarak birbirlerinden çok farklıdır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan deprem kayıtları (PEER, 2006)

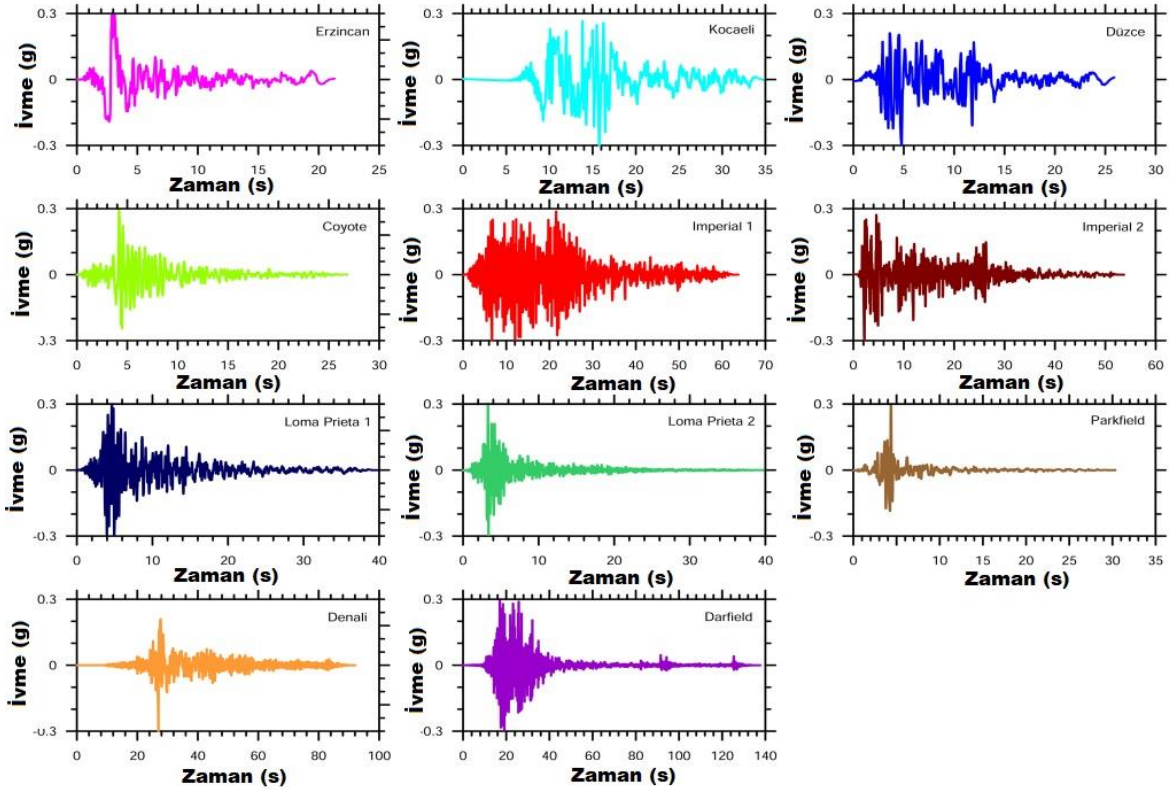
Deprem	Yıl	İstasyon	Büyükük	PGA	Vs30
Erzincan	1992	Erzincan	6.69	0.386	352
Kocaeli	1999	Yarımca	7.2	0.322	297
Düzce	1999	Düzce	7.14	0.404	282
Coyote Lake	1979	SJB	5.7	0.247	561
Imperial Valley	1940	El Centro	6.9	0.274	214
Imperial Valley	1979	Calipatria	6.5	0.282	206
Loma Prieta	1989	Gilroy 3	6.9	0.368	350
Loma Prieta	1989	Gilroy 4	6.9	0.418	222
Parkfield	1966	Benioff	6.1	0.330	493
Denali	2002	TAPS	7.9	0.227	425
Darfield	2010	DSLCL	7.0	0.350	296

Tablo 2. Çalışmada alanının AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen deprem karakteristikleri

Mahalle	Zemin Sınıfı	S _s	PGA(g)	PGV(cm/sn)
Batıkent	ZD	0.684	0.290	17.497
Aşağısöğütünü	ZD	0.667	0.282	17.082
Zincirlikuyu	ZD	0.668	0.283	17.118

2.3 Çalışmadaki sondajların zemin özellikleri

Çalışma alanı Eskişehir’in Tepebaşı bölgesinde yer alan 3 mahalleyi kapsamaktadır. Eskişehir ili Tepebaşı bölgesinin zemin özelliklerinin ayrıntılı laboratuvar testleri ve arazi deneylerinden sonra Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı EVS-MVS yazılımında 3 boyutlu görselleştirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmada sahanın zemin özelliklerinin ince daneli (killi-siltli) zeminlerden başlayarak derinlere doğru kaba daneli (kumlu-çakıllı) zeminlere geçiş yaptığı ve şehir merkezinde alüvyon zeminin yayılım gösterdiği ortaya konmuştur. Ayrıca yeraltı suyu seviyesi şehir merkezinde yüksek seviyelerde görülmektedir [14]. Çalışmamızda kullanılan SK1 ve SK3 sondajlarında yeraltı suyu bulunmamaktadır. SK1 sondajında 3.50 metreye kadar çakıllı zemin olarak GC, SK3 sondajında düşük plastisiteli kil (CL) yer almaktadır. SK1 sondajında killi seviyelerde plastisite indisi (PI) ilk 3.5-10.50 m arası 31-42 arasında değişmektedir. SK3 sondajında ise killi zeminlerde plastisite 15-20 arasında değişmektedir. Derinlere doğru zemin sınıfında killi seviyelerden kumlu zeminlere geçişin olduğu görülmektedir. SK2 sondajında ise yeraltı suyu seviyesinin 6.00 m, ilk 3 metresi PI=24 olan CH zemin sınıflarından oluşmaktadır.



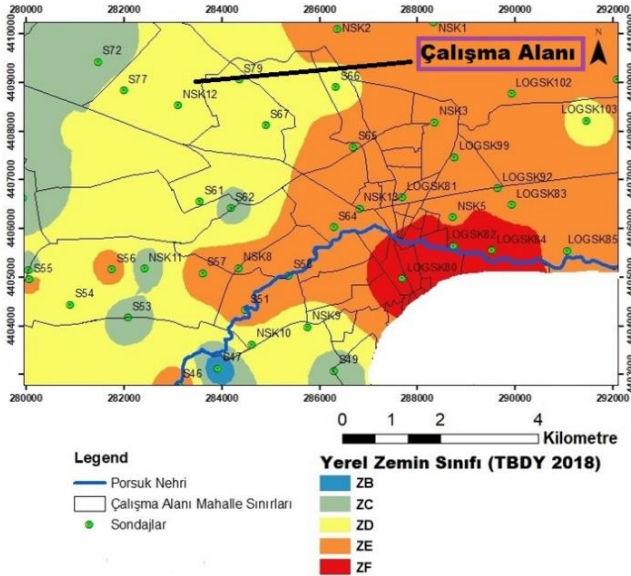
Şekil 2. Çalışmada kullanılan PGA: 0.3 g olarak ölçeklendirilmiş deprem kayıtları

Derinlere doğru iri daneli zeminlere geçiş yapan; kumlu seviyelerin yer aldığı zemin profilinden oluşmaktadır. SK4 sondajında yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'dedir. İlk 3.00 m düşük plastisiteli zemin profilinden oluşmakta; derinlere doğru araldanmalı olarak siltli-killi-kumlu seviyelere geçiş yapmaktadır. Çalışmada eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin yapıldığı bu 4 sondajın zemin özellikleri Tablo 3'de sunulmaktadır.

Tablo 3. Çalışmada alanda yer alan sondajların zemin özellikleri

Derinlik (m) / Sondaj	SK1	SK2	SK3	SK4
0.00-3.50	GC	CH	CL	CL
3.50-7.00	CH	SC	SC	SM
7.00-10.50	CH	CL	CL	ML
10.50-14.00	SM	SP-SM	SM	SW-SM
14.00-17.50	SC	SM	CL	SM
17.50-21.00	SC	SM	SC	SP
21.00-24.00	SC	SC	SC	SM
24.0-27.50	ML	SM	CH	CL
27.50-30.00	ML	MH	CH	CH

Çalışma alanının da içinde bulunduğu Eskişehir şehir merkezinin belirli bir bölümünün yerel zemin özelliklerinin TBDY (2018)'e göre haritası Şekil 3'de sunulmaktadır. Bu haritada çalışma alanını da kapsayan Aşağısöğütönü, Zincirlikuyu ve Batıkent mahallelerinin ZD yerel zemin sınıflarında yer almakta olduğu gösterilmektedir [15].



Şekil 3. Çalışma alanı yerel zemin sınıfı haritası [15]

Çalışma alanını da kapsayan bölgede Güney vd. (2013) tarafından Eskişehir Havzası'nda alüvyon üzerinde P Tabancası kullanarak sismik kırılma-yansıma çalışmaları yapılmıştır. Burada P-Tabancada (sismik kaynak) belirli uzunluktaki hatlar (örneğin Söğütönü 480 m) için atışlar yapılarak sismik kaydediciden (Geometrics 24 Kanallı Geode Modülleri) zeminin kayma dalgası hız verileri elde

edilmektedir. Bu çalışmada yapılan eşdeğer doğrusal-doğrusal olmayan analizler için zemin tabakalarının kayma dalgası hız profilleri gerekmektedir. Bu gerçek değerler doğrudan Güney vd., (2013) tarafından sahada sondajlara yakın lokasyonda yapılan sismik kırılma-yansıma çalışmasından alınmıştır [16].

Çalışma alanına ait sismik-yansıma-kırılma profili Şekil 4'de sunulmaktadır. Deepsoil'de yapılan analizler sırasında her bir zemin profili için zemin katmanlarının geoteknik ve dinamik özellikleri tanımlanmıştır. Çalışma alanında yapılan arazi çalışmaları kapsamında 4 sondaj için kullanılan sismik hat verilerine göre kayma dalgası hız profiline 0-8 m arası 238 m/sn, 8-55 m arasının ise 622 m/sn olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmamızdaki her bir sondajın zemin tabakaları için 0-8 m arası 238 m/sn, 18-30 m arası 622 m/sn kayma dalgası hız değerleri kullanılmıştır.

2.4 Sahaya özel zemin davranışı

Sismik dalgaların zemin içerisinde oluşturduğu hareketi ve tabakaların bu hareket sırasında göstereceği davranışı inceleyebilmenin en temel prensibi tabakaları izotropik, homojen ve elastik; dalgaları da düşey kayma dalgaları olarak kabul eden bir boyutlu zemin davranışdır [17]. Sahaya özgü yapılan zemin davranış analizleri zemin içerisinde hareket eden sismik dalgaların zemin yüzeyinde oluşturacağı hareketin etkisini ortaya koymak amacıyla yapılmaktadır.

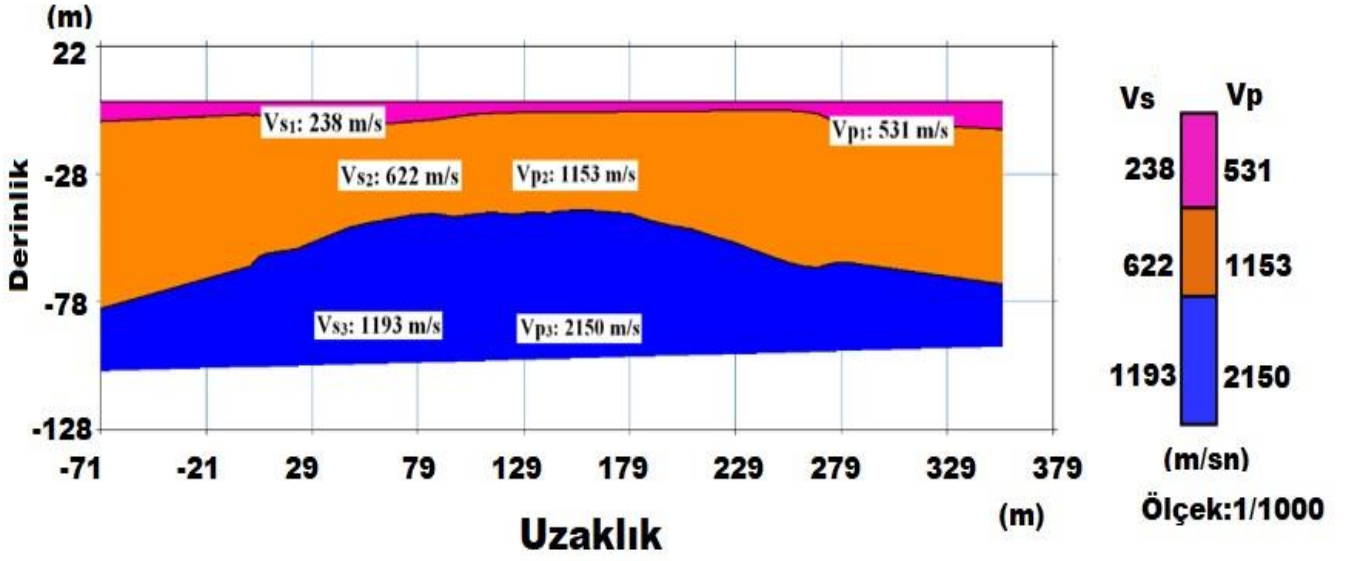
Menç (2003) çalışmasında kuru kum ile doymuş kum arasındaki farkı iyi görebilmek amacıyla zemin davranış analizleri yapmıştır. Bu analizlerde kumlu (iri daneli) zeminlerde, zemin içeriğindeki suyun artışıyla davranışın doğrusal olmama eğilimine yaklaştığını belirlemiştir. Bu nedenle referans gerilmenin artan su içeriği ile azaldığını öne sürmüştür. Çalışmasında farklı örnekler üzerinde değerlendirmeler yapmıştır. Bu değerlendirmelerde su içeriğinin küçük gerilimli kayma modülü üzerinde çok az etkisi olduğunu, ancak küçük gerilimli malzeme sönümleme oranı üzerinde önemli etkisi olduğunu belirlemiştir [18].

Bu çalışmada yapılan analizlerde kumlu zemin tabakaları için Menç (2003) ve killi zemin tabakaları için Darendeli (2001) modeli eğrileri [19] kullanılmıştır.

2.4.1 Bir boyutlu eşdeğer doğrusal analiz

Bir boyutlu eşdeğer doğrusal yaklaşım, zemin tabakalarının yatay ve sonsuz olduğu ve her bir zemin tabakasının sabit kayma modülü ve sönüm oranına sahip olduğu yaklaşımını kabul etmektedir. Eşdeğer doğrusal yaklaşımda zemin tabakaları doğrusal malzemeler olarak kabul edilir. Doğrusal olmayan yaklaşımda ise birim deformasyona bağlı zeminin kayma modülü ve sönümleme oranı dikkate alınmaktadır [18].

Bu çalışmada yer alan 30 metre derinliği temsil eden 4 sondaj için; birim hacim ağırlığı, zemin sınıfı, tabaka kalınlığı ve kayma dalgası hızı değerlerini kullanarak zemin tabakalarının tanımlamaları yapılmıştır. Analizlerde birim deformasyon ve malzeme parametreleri için zemin sınıflarına göre her tabaka için ayrı model eğrileri tanımlanmıştır.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan sismik kırılma hattı hız kesiti [16]

2.4.2 Bir boyutlu doğrusal olmayan (nonlinear) analiz

Deprem dalgalarının yayılmaları sırasında oluşan tekrarlı gerilmeler sonucunda zemin davranışı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yaklaşımda zeminin histeretik gerilme-şekil değiştirme (kayma modülü-sönümleme) ilişkisi göz önüne alınmakta ve bu nedenle eşdeğer doğrusal yaklaşımdan farklı olarak daha gerçekçi kabul edilmektedir [20].

Bir boyutlu zemin davranış analizlerinde doğrusal olmayan modellerde, eşdeğer doğrusal yaklaşımda sabit kabul edilen gerilme-deformasyon ilişkisinin her bir zemin tabakasında değiştiği temel prensibine dayanmaktadır [17]. Çalışma kapsamında 30 m derinliğe sahip 4 sondaj için 11 farklı kuvvetli yer hareketi kullanılarak doğrusal olmayan (nonlinear) analizler yapılmıştır

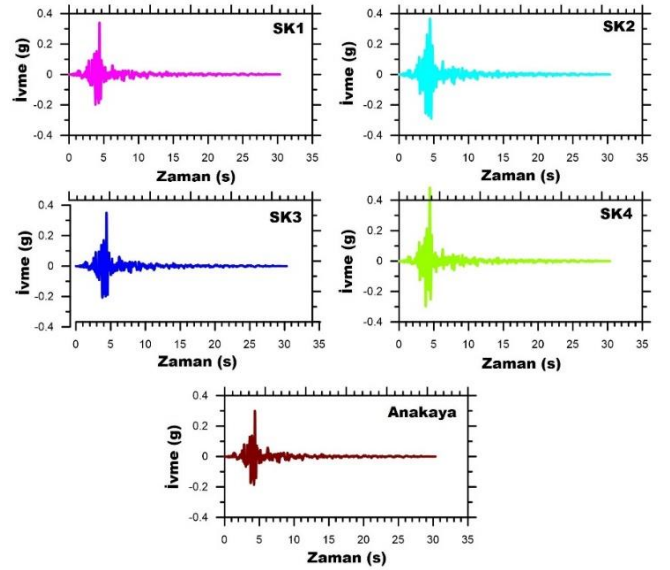
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Eşdeğer doğrusal analiz sonuçları

3.1.1 Zemin yüzeyinde oluşan ivmeler

Eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için ivme-zaman değerleri elde edilmiş ve örnek bir grafik seti Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5 Parkfield 1966 depremi verisine göre elde edilen yüzey ivme zaman davranışını gösterilmektedir. Bu grafiklerde yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında maksimum pik ivmelerin 0.4 saniyede 0.3 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6.0 m'de olan SK2 sondajında 0.4 saniyede 0.38 g yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'de olan SK4 sondajlarında 0.4 saniyede yaklaşık 0.5 g maksimum pik ivme değerleri elde edilmiştir.

Pik ivmelerin görüldüğü süreçten bağımsız yüzey ivmesinden 1.5 kat farklılık görülmüştür. Zemin profillerinin tabaka farklılığının da etkisi olmasına rağmen, bu etkinin aynı Vs ile ana faktör olmadığı; bunun yerine yer altı su seviyesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. Çalışmadaki sondajlar için Parkfield (1966) deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş ivme-zaman grafikleri

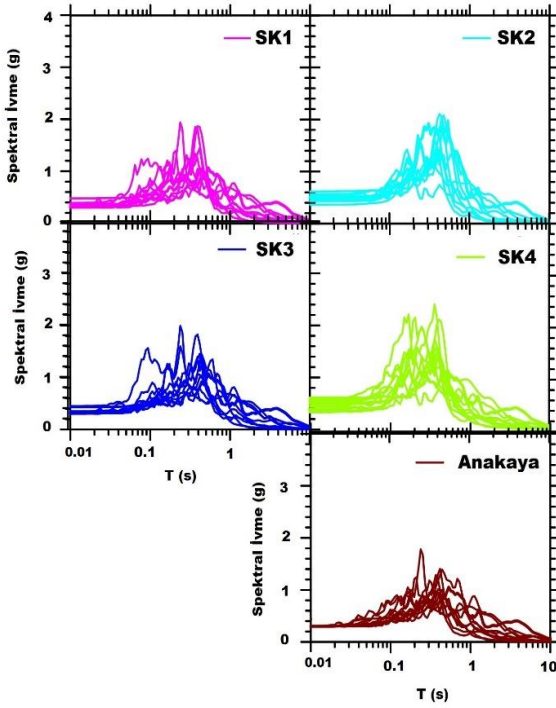
3.1.2 Zemin tepki spektrumu

Yerel zemin koşullarının belirlenerek sınıflandırılması ve sahanın mühendislik özelliklerinin ortaya konmasında zemin tepki spektrumu kullanılmaktadır. Ayrıca yapının dinamik analizinde en önemli parametrelerden biri olması nedeniyle depreme dayanıklı yapı tasarımı için kritik bir role sahiptir. Bu çalışma kapsamında 11 deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için zemin tepki spektrumları belirlenmiş ve spektral ivme (g)-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler Şekil 6'da sunulmaktadır.

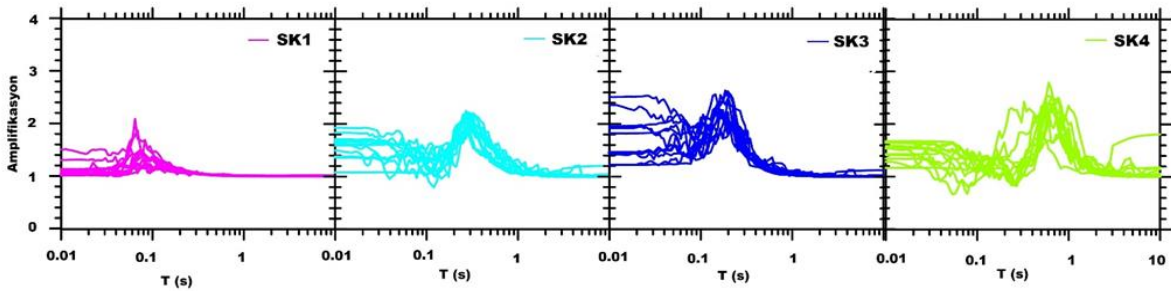
Şekil 6 dikkatlice incelenirse, başlangıç spektral ivmelerin yer altı su seviyesi olmayan profillerde daha dar

bir aralıkta seyrettiği fakat yer altı su seviyesi olan profillerde daha geniş aralıklara yayıldığı tespit edilmiştir. Bir deprem kaydı hariç bütün profillerde başlangıç bölgesinin 0.1 sn'lere kadar genel olarak düz bir eğilimde olduğu görülmüştür. Grafiklerde görülen pik ivmelerin büyüklüğü ve bu pik ivmelerin farklı zamanlarda oluşması deprem karakteristiğinin zemin profiline yansımalarıdır. Burada farklı davranış gösteren bir deprem kaydı SK1 ve SK3 sondajında farklı zemin parametrelerinin etkisiyle oluşmuştur.

Maksimum spektral ivme değerleri düşünüldüğünde, yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında 0.2 saniyede sırasıyla 1.9g ve 2.0g olarak elde edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 ve 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında ise pik spektral ivmelerin sırasıyla 0.2 saniyede 2.1g ve 2.4g olarak belirlenmiştir. Yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip SK4 sondajında daha büyük spektral ivme değerleri oluşmuştur.



Şekil 6. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş spektral ivme-periyot grafikleri



Şekil 7. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilmiş amplifikasyon-periyot grafikleri

3.1.3 Zemin büyütme (amplifikasyon) oranı

Deprem dalgalarının hareketi neticesinde, dalgaların zemin tabakalarının içerisinde yayılarak yüze ulaştığında genliklerindeki artış zemin büyütmesi olarak tanımlanmaktadır [18]. Bu çalışmada yapılan eşdeğer doğrusal analizler sonucunda 4 sondaj için zemin büyütme değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlerden amplifikasyon-periyot (s) grafikleri oluşturulmuş ve bu grafikler Şekil 7'de gösterilmektedir. Kısa periyotlarda su seviyesinin olmadığı profillerde daha dar alana sıkışmışken (iki kayıt hariç), SK2 ve SK4 büyütme oranları daha geniş bir banda yayılmıştır.

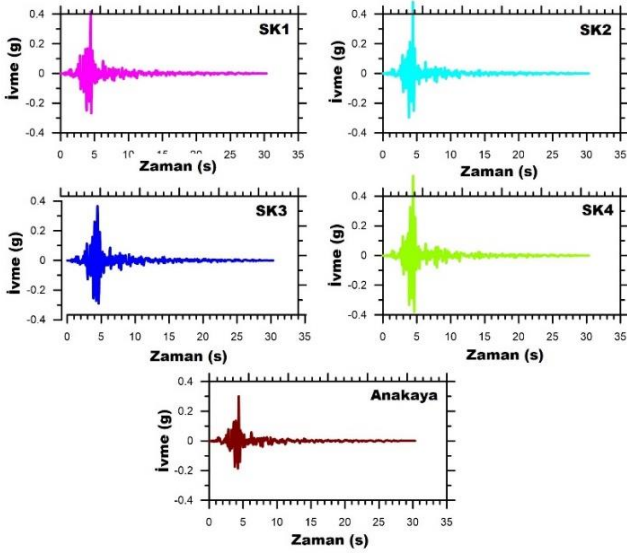
Pik spektral ivmeler göz önünde bulundurulduğunda, amplifikasyon oranlarının SK1 ve SK3 sondajlarında 2-2.1 arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m olan SK2 sondajında amplifikasyon oranının 2.3, Yeraltı suyu seviyesi 1.5 m olan SK4 sondajında ise 2.6 olarak belirlenmiştir. Bu değerler birbirlerinden çok uzak değillerdir. Fakat oldukları periyotlar farklılık göstermektedir. SK1 ve SK3 için 0.07-0.2 sn'lerde görülen pik değerler, SK3 ve SK4 için 0.4-0.8 sn'lere çıkmaktadır. Bu da tasarımda büyük önem arz etmektedir.

3.2 Doğrusal olmayan (nonlinear) analiz sonuçları

3.2.1 Zemin yüzeyinde oluşan ivmeler

Yüksek genliklere sahip depremlerin yaşandığı sahalarda zemin tabakalarında farklılaşan kayma modülü-sönüm oranları nedeniyle zeminin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmalıdır [21]. Bu durum daha çok zemin tabakalarında düşük gerilme genliklerinde elastik, büyük gerilme genliklerinde ise elasto-plastik veya plastik davranışın oluşması ile açıklanmaktadır [22].

Bu çalışma kapsamında tamamlanan doğrusal olmayan analizler sonucunda 4 sondaj için Şekil 8'de gösterildiği gibi ivme- zaman değerlerini içeren grafikler oluşturulmuştur. Grafik yine Parkfield depremi için sunulmaktadır. Görüldüğü üzere, yeraltı suyu seviyesi bulunmayan SK1 ve SK3 sondajlarında maksimum pik ivmelerin 0.4 saniyede sırasıyla 0.4 (g) ve 0.35 (g) değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 6.0 m'de olan SK2 sondajında 0.4 saniyede 0.5 g, yeraltı suyu seviyesi 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında 0.4 saniyede yaklaşık 0.6 g maksimum pik ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre de daha büyüktür.



Şekil 8. Çalışmadaki sondajlar için Parkfield (1966) deprem verisi kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş ivme-zaman grafikleri

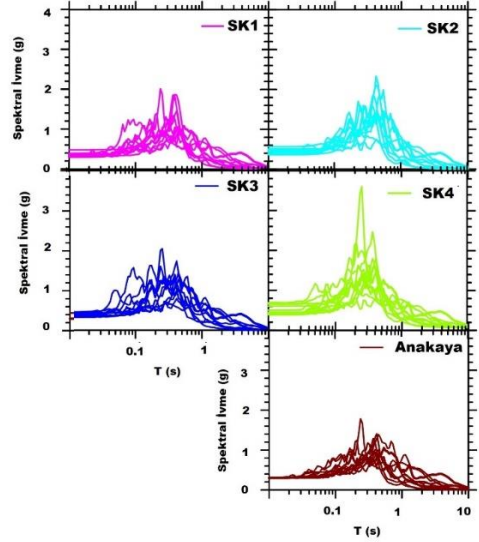
3.2.2 Zemin tepki spektrumu

Farklı zemin tabakalarından oluşan 4 sondaj için yapılan doğrusal olmayan analizler sonucunda 11 deprem verisi için tepki spektrumu değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerden spektral ivme (g)-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler Şekil 9'da sunulmaktadır. Bu grafiklere göre pik spektral ivmelerin yeraltı suyu olmayan SK1 ve SK3 sondajlarında 0.2 saniyede 2.1 (g) değerleri olarak gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 ve 1.5 m'de olan SK4 sondajlarında ise pik spektral ivmelerin sırasıyla 0.2 saniyede 2.4 (g) ve 3.6 (g) olarak belirlenmiştir. Yüksek yeraltı suyu seviyesine sahip SK4 sondajında doğrusal olmayan analizlerde en yüksek spektral ivme değerleri oluşmuştur.

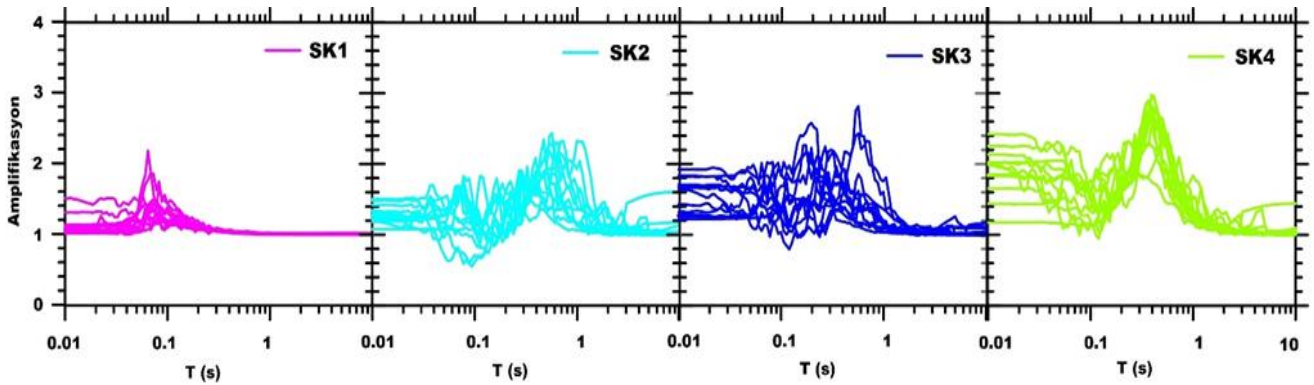
3.2.3 Zemin büyütme (amplifikasyon) oranı

Doğrusal olmayan analizler sonucunda çalışmada kullanılan 4 sondaj için amplifikasyon-periyot (s) grafikleri oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında oluşturulan bu

grafikler Şekil 10'da sunulmaktadır. Bu grafiklerde yeraltı suyu seviyesi bulunmayan ve ilk 3.50 m çakıllı zemin tabakasından oluşan SK1 sondajında eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına yakın olan 2.1 büyütme değeri elde edilmiştir. Yeraltı suyu seviyesi olmayan kum ve yüksek plastisiteli killi zeminlerden oluşan SK3 sondajında maksimum büyütme oranının 2.4 olduğu gözlemlenmektedir. Yeraltı suyu seviyesi 6 m'de olan SK2 sondajında maksimum büyütme değeri 2.6 olarak belirlenmiştir. Yeraltı suyu seviyesi 1.5 m'de olan daha çok düşük plastisiteli kil ve kumlu tabakalardan oluşan SK4 sondajında ise maksimum büyütme oranının 3.2'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 10). Eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre, amplifikasyon değerlerinde farklılık görülmüştür. Özellikle su seviyesi en yüksek olan SK4 profilinde, deprem kaydının farklılaşmasının davranışa olan etkisi bariz bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bunun yanında SK1 profili için ise eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin yüzey büyütmesine etkisi çok farklı değildir.



Şekil 9. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş spektral ivme-periyot grafikleri



Şekil 10. Çalışmadaki sondajlar kullanılarak yapılan doğrusal olmayan analizlerden elde edilmiş amplifikasyon-periyot grafikleri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek ve yeraltı suyunun dinamik davranışa etkisini ortaya koymak amacıyla eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Çalışmada birbirine yakın lokasyonlarda yer alan 4 sondaj kullanılmıştır. Birbirine yakın sondajlar zeminin sismik özelliklerinin benzer olması nedeniyle tercih edilmiştir. Analizlerde kullanılan SK1 ve SK3 sondajlarında yeraltı suyu seviyesi bulunmamakta, SK2 ve SK4 sondajları ise farklı seviyelerde yeraltı suyu seviyesine sahiptir. 11 farklı deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden her bir sondaja ait spektral parametreler elde edilmiş ve elde edilen veriler grafikler ile sunulmuştur. Bu grafiklerde yeraltı suyu bulunan SK2 ve SK4 sondajlarında, yeraltı suyu bulunmayan SK1-SK3 sondajlarına göre %25 daha büyük spektral parametreler elde edilmiştir. En büyük spektral değerler yeraltı suyu seviyesi yüzeye yakın olan SK4 sondajında oluşmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında eşdeğer doğrusal analizler ve doğrusal olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında yeraltı suyu seviyesi 1.50 m'de olan SK4 sondajında en büyük farklılık gözlemlenmiştir. SK4 sondajında doğrusal olmayan analizlerde diğer sondajlara göre daha büyük spektral ivme ve büyütme değeri elde edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında sahaya özgü dinamik karakterizasyonu belirlemek amacıyla yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu yumuşak zemin tabakalarından oluşan sahalar için doğrusal olmayan analizlerin yapılması önerilmektedir. Yeraltı suyu bulunmayan SK1 sondajında yüzeyde çakıllı zemin tabakasının olması ve derinlerde kumlu ve yüksek plastisiteli zeminlerden oluşması nedeniyle SK3'e göre daha küçük spektral ivme ve büyütme değerleri elde edilmiştir. Sahada farklılaşan zemin özelliklerinin zeminin dinamik özelliklerini oldukça etkilediği ve zeminlerde yüksek yeraltı suyu varlığının doğrusal olmayan zemin davranışındaki önemini açıkça göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %16

Kaynaklar

- [1] P. Y. Bard PY, Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. In: Duma, editor. 10th European conference on earthquake engineering. Rotterdam: Balkema p. 305–23, 1995.
- [2] G. A. Athanasopoulos, P. C. Pelekis, e. A. Leonidou, Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake. Soil Dyn Earthq Eng 18(1999):135– 149, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00041-4)
- [3] A. Roca, C. S. Oliveira, A. Ansal, S. Figueras S, Local site effects and microzonation, in assessing and managing earthquake risk, edited by Oliveira CS, Roca A, Goula X Springer, 67–89, 2008.
- [4] Y. M. A. Hashash, C. Phillips, D. R. Groholski, Recent advances in non-linear site response analysis. 5th International Conference on Recent Advances in

- Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, May 24-29, San Diego, Paper no. OSP 4, 2010.
- [5] M. K. Akın, T. Topal, S. L. Kramer, A newly developed seismic microzonation model of Erbaa (Tokat, Turkey) located on seismically active eastern segment of the north Anatolian fault zone (NAFZ). Nat Hazards 65:1411–1442, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0420-1>
- [6] B. Sonmezer, S. Bas, S Isik, O Akbas, Linear and nonlinear site response analyses to determine dynamic soil properties of Kirikkale. Geomech Eng 16 (4):435–448, 2018. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.4.435>
- [7] E. Garini, G. Gazetas, K. Ziotopoulou, Inelastic soil amplification in three sites during the Tokachi-oki MJMA 8.0 earthquake. Soil Dyn Earthq Eng 110:300–317, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.01.017>
- [8] E. Civelekler, K. B. Afacan, D. V. Okur, Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlara göre sismik yük etkisindeki zeminlerde davranış analizi. ESOĞÜ Müh Mim Fak Derg. 29(2), 158 – 171, 2021. <https://doi.org/10.31796/ogummf.839703>
- [9] M. Vucetic and R. Dobry, Effect of soil plasticity on cyclic response. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1): 89-107, 1991.
- [10] C. Phillips and Y. M. Hashash, Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(7), 1143–1158, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.004>
- [11] P. Arduino and S. L. Kramer, Site response. In: CEE 526 Geotechnical Earthquake Engineering lecture notes, University of Washington, Seattle, WA-USA, 2009.
- [12] P. E. PEER, PEER ground motion database. Berkeley, 2006. <http://peer.berkeley.edu/smcat/>
- [13] Y. M. A. Hashash, M. I. Musgrove, J. A. Harmon, D. R. Groholski, C. A. Phillips, D. Park, DEEPSOIL 6.1, User Manual, Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016.
- [14] E. Civelekler and E. Pekkan, The application of GIS in visualization of geotechnical data (SPT-Soil Properties): a case study in Eskisehir-Tepebaşı, Turkey. International Journal of Engineering and Geosciences, 7 (3), 302-313, 2022. <https://doi.org/10.26833/ijeg.980611>
- [15] E. Civelekler, D. V. Okur, K. B. Afacan, A study of the local site effects on the ground response for the city of Eskişehir Turkey. Bull Eng Geol Env, 2021. <https://doi.org/10.1007/S10064-021-02285-4>
- [16] Y. Güney, B. Ecevitöglu, E. Pekkan, U. Avdan, M. Tün, O. Kaplan, S. Mutlu, E. Akdeniz, ve ...; Eskişehir Yerleşim Yeri, CBS Teknikleri Kullanılarak Geoteknik, Yapı ve Jeofizik Bilgi Sisteminin Oluşturulması. Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Proje No:080240, 2013.

- [17] S. L. Kramer, *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 653 pp., 1996.
- [18] F. Menq, *Dynamic properties of sandy and gravelly soils*. Ph.D. Dissertation. University of Texas, Austin, TX, 2003.
- [19] M. Darendeli, *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Ph.D. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, 2001.
- [20] C. Bolisetti, A. S. Whittaker, H. B. Mason, I. Almufti, M. Willford, *Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures*. *Nuclear Engineering and Design*, 275, 107–121, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.04.033>
- [21] J. P. Pruiksma, *Nonlinear and Equivalent Linear Site Response Analysis for The Groningen Area*, TNO Report, TNO 2016 R10460, 1-30, 2016.
- [22] P. Akdoğan, *Dynamic soil amplification in saturated soil profiles using effective stress based nonlinear methods*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2019.





Yakıt biyokatki maddesi ve yeşil solvent metilalin UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membran kullanılarak pervaporasyon prosesi ile saflaştırılması

Purification of fuel bioadditive and green solvent methylal by pervaporation process using UiO-66 doped PEI nanocomposite membrane

Derya Ünlü^{1,*} 

¹ Bursa Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, metilal/metanol ikili karışımlarının pervaporasyon prosesi ile saflaştırılması için UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membranlar hazırlanmıştır. Membranlar, Taramalı elektron mikroskopisi (SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve Termogravimetrik analiz (TGA) ile karakterize edilmiştir. Pervaporasyon testleri farklı operasyon sıcaklıklarında, besleme metanol konsantrasyonunda, UiO-66 yükleme oranında ve membran kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Optimum çalışma koşulları 30°C çalışma sıcaklığı, ağırlıkça %6 besleme metanol konsantrasyonu, ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membran ve 50 µm membran kalınlığı olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında akı ve metanol seçicilik değerleri sırasıyla 1.48 kg/m².h ve 80126 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, pervaporasyon işlemi ile yüksek saflıkta metilal yakıt biyokatki maddesi ve yeşil solvent elde edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Metilal, Nanokompozit membran, UiO-66, Pervaporasyon

1 Giriş

Biyoyakıtlar ve yakıt biyokatki maddeleri; çevre dostu olmaları, ülkelerin enerji kaynaklarını çeşitlendirmeleri ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmaları nedeniyle stratejik öneme sahip sürdürülebilir yakıt malzemeleridir. Metilal, asit katalizörü varlığında formaldehit ile metanolün reaksiyonu sonucu elde edilen önemli bir yakıt biyokatki maddesidir. Dizel ve biyodizel ile % 100 karışabilen metilal, yakıtın yanma özelliklerini ve emisyon seviyelerini önemli ölçüde iyileştirerek, çevreye zararlı emisyon salınımının azalmasını sağlar [1-3]. Metilal ayrıca yüksek çözücü gücü, oldukça düşük viskozitesi, yüksek buharlaşma hızı gibi özelliklerinden dolayı endüstride yeşil solvent olarak kullanılmaktadır [4].

Metilal üretimi sırasında yan ürün olarak su elde edilirken, karışımda reaksiyona girmemiş metanolün de varlığı söz konusudur. Metilal ve metanol ağırlıkça %94.06 oranında metilal içeren karışımda atmosferik basınç altında azeotrop karışım oluşturmaktadır [1]. Geleneksel ayırma yöntemleri ile bu azeotrop karışımları ayırmak oldukça güçtür. Literatürde pervaporasyon, reaktif distilasyon ve

Abstract

In this study, UiO-66 doped PEI nanocomposite membranes were prepared for the purification of methylal/methanol binary mixtures by pervaporation process. Membranes were characterized by Scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and Thermogravimetric analysis (TGA). Pervaporation tests were performed at different operation temperature, feed methanol concentration, UiO-66 loading ratio and membrane thickness. The optimum operation conditions were determined as 30°C of operation temperature, 6 wt. % of feed methanol concentration, 0.5 wt. % doped PEI membrane and 50 µm of membrane thickness. Under these conditions, flux and methanol selectivity values were 1.48 kg/m².h and 80126, respectively. The obtained results show that high purity methylal fuel bioadditive and green solvent can be acquired by pervaporation process.

Keywords: Methylal, Nanocomposite membrane, UiO-66, Pervaporation

ekstraktif distilasyon gibi ayırma proseslerinin metilal/metanol karışımlarını ayırmak için kullanıldığı görülmüştür. Carretier ve arkadaşları pervaporasyon ile metilal/su, metilal/metanol ve metilal/metanol/su gibi ikili ve üçlü karışımları ayırmayı denemiş ve %99.5 saflıkta metilal elde etmişlerdir. Ancak ticari membranların kullanıldığı bu çalışmada membranların aktif tabakasının zamanla zarar görüp bozunmasına bağlı olarak uzun süreli ve tekrar kullanım mümkün olmamıştır. Ayrıca ticari membran kullanımı ekonomik bir proses olan pervaporasyonun maliyetini arttırmaktadır [4]. Liu ve arkadaşları katalitik distilasyon ile ekstraktif distilasyonu tek bir kolonda birleştirerek metilal üretimini incelemişlerdir. Farklı operasyon parametrelerinin de incelendiği proseste metilal saflığı %98.7 olarak elde edilmiştir. Wang ve arkadaşları da metilal/metanolü ekstraktif distilasyon ile ayırmışlar ve yüksek saflıkta metilal elde etmişlerdir. Ekstraktif distilasyonda sürükleyici kimyasal adı altında ilave bir solvent kullanılarak metilalin metanole uçuculuğu artırılır. Metilal/metanol karışımlarını ayırmak için kullanılan en yaygın solvent dimetilformamiddir. Wang ve arkadaşları

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: derya.unlu@btu.edu.tr (D. Ünlü)

Geliş / Received: 21.09.2022 Kabul / Accepted: 18.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1178087

gibi literatürdeki diğer ekstraktif distilasyon uygulamalarında da dimetilformamid sürükleyici kimyasal olarak kullanılmaktadır. Dimetilformamid güçlü bir karaciğer toksinidir. Deri yoluyla emilmektedir ve cilt problemlerine neden olduğu bilinmektedir. İlave kimyasal kullanımı gerektirmesi, aynı zamanda sürükleyici kimyasal olarak kullanılan bu solventin çevre ve insan sağlığına zararlı olması ekstraktif distilasyon prosesinin önemli dezavantajlarıdır [3]. Zhang ve arkadaşları ise katalitik distilasyon kullanarak hem metilalin sentezini hem de saflaştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir. İşlem sonucunda %92.1 saflıkta metilal elde etmişlerdir [5]. Kullanılan tüm bu prosesler çevreye zararlı ilave kimyasal gerektiren, atık üreten, yoğun enerji tüketen, yüksek maliyetli proseslerdir. Bu çalışmada kullanılan pervaporasyon prosesi ise düşük enerji tüketimi ve maliyeti, ilave kimyasal gerektirmemesi gibi özelliklerinden dolayı geleneksel ayırma proseslerine önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır.

Pervaporasyon, sıvı-sıvı karışımları ayırmak için seçici geçirgen membranların kullanıldığı membran destekli bir ayırma prosesidir. İtici güç kimyasal potansiyel farkıdır. Bu proseste, membranın ilgisine göre besleme karışımındaki bileşenlerden biri membranın yüzeyinde çözünür, çözünen madde membran boyunca difüze olur. Bu bileşene “geçen akım” adı verilir. Çözünemeyen madde ise ‘kalan akımı’ oluşturmaktadır. Membran çıkışında uygulanan vakum basıncı, atmosferik basınçtaki besleme karışımının buhar basıncından düşük olduğundan dolayı sıvı madde membranı buhar olarak terk eder. Buharlaşan akım kaparlarda yoğunlaştırılarak tekrar sıvı olarak elde edilir. Membrandaki bu taşınım çözünme difüzyon mekanizması olarak adlandırılır. Bu proses ekonomik, enerji ve çevre dostudur [6-7].

Pervaporasyon prosesinde taşınım, beslemedeki bileşenler ve membran arasındaki etkileşim temellidir. Başarılı bir ayırma performansı elde etmek için doğru membran malzemesi seçimi oldukça önemlidir [8]. Ayırma için polimerik malzeme seçiminde üç önemli faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar; yüksek kimyasal direnç, sorpsiyon kapasitesi ve polimerik filmin mekanik dayanımıdır. İyi bir ayırma performansı elde etmek için istenilen özellikte membranların hazırlanması oldukça önemlidir [9]. Bu projede metilalin saflaştırılması amaçlandığından metilal ile karışım halinde bulunan bileşenler olan metanolün giderimi hedeflenmektedir. Bu sebeple metanole seçici özellikte olan Polieterimid (PEI) polimeri kullanılarak hazırlanan membranlar ile çalışılacaktır.

Polieterimid (PEI) ise yüksek camsı geçiş sıcaklığı (216°C) nedeniyle plastik deformasyona uğramadan yüksek basınç ve sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca yüksek ısı, kimyasal, mekanik kararlılığı ve ekonomik olması dolayısıyla polimerik membran malzemeleri arasında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [10].

Polimerik membranların üretimi kolaydır ve diğer membran türlerine göre nispeten daha ucuzdur. Ancak polimerik membranlar şişme özelliği gösterirler ve genel anlamda polimerik membranların geçirgenlik değerleri,

seçicilik ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle, yüksek geçirgenliğe sahip membranlar istenen seçicilik değerlerine ulaşamamaktadır. Ayrıca kimyasallara ve sıcaklığa karşı sınırlı direnç gösterirler. Bu nedenle, bu sorunların üstesinden gelmek için, yeni tip organik-inorganik kompozit membranlar geliştirilmiştir. Bu membranlarda zeolitler, gözenekli moleküler elekler, karbon nanotüpler ve silisler gibi birçok katkı maddesi kullanılabilir. Ancak hem organik hem de inorganik yapılara sahip olduklarından dolayı, polimerlerle etkileşimleri daha iyi olacağı öngörülen metal organik kafes yapıların katkı maddesi olarak kullanımı oldukça popülerdir. Bu çalışmada da PEI membrana metanole seçici özellikte UiO-66 metal organik kafes yapı ilave edilerek ayırma performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

UiO-66, yüksek gözeneklilik, mükemmel kimyasal ve termal dayanım ve ayarlanabilir kimyasal özellikler gibi membranda kullanılabilir özelliklere sahiptir [11-12].

Bu çalışmada sentezlenen UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membran yakıt biyokatki maddesi ve yeşil solvent metilalin pervaporatif saflaştırılmasında kullanılmıştır. Hazırlanan nanokompozit membranda polimer ile katkı maddesinin uyumluluğu SEM analizi ile görüntülenmiştir. Membranın kimyasal bağ yapısı FTIR ile termal dayanımı TGA ile belirlenmiştir. UiO-66 katkı miktarının, besleme metanol konsantrasyonunun, operasyon sıcaklığının ve membran kalınlığının ayırma performansına etkisi incelenerek optimum operasyon koşulları belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Malzemeler

Membran hazırlamada kullanılan polimer PEI (Eriyik Akış İndisi: 9 g/10 dak, 337°C/6.6 kg) Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Çözücü N-Metil-2-Pirolidon Carlo Erba'dan satın alınmıştır. UiO-66 sentezinde kullanılan tereftalik asit, asetik asit ve dimetil formamid Sigma Aldrich'ten zirkonyum klorid ise abcrGmbH firmasından tedarik edilmiştir. Ayırmada kullanılacak olan metilal Acros'tan, metanol ise Merck'ten temin edilmiştir.

2.2 UiO-66 sentezi

Ağırlıkça %0.375 tereftalik asit ve ağırlıkça %0.535 Zirkonyum (IV) klorür, ağırlıkça %2 asetik asit içeren 30 mL dimetil formamid (DMF) içerisine ilave edilerek oda sıcaklığında homojen karışım elde edene kadar karıştırılmıştır. Karışım ardından teflon hidrotermal reaktöre alınarak 120°C'de 24 saat reaksiyona sokulmuştur. Reaksiyon sonunda oda sıcaklığına soğutulduktan sonra UiO-66 parçacıkları santrifüj ile ayrılmış ve saflaştırmak için birkaç kez DMF ile yıkanmıştır. Ardından 80°C'de 48 saat kurumaya bırakılmıştır [11].

2.3 UiO-66 katkılı PEI nanokompozit membran sentezi

Ağırlıkça %15 PEI polimeri, N-Metil-2-Pirolidon (NMP) solventi içerisinde 90°C'de homojen bir polimerik membran çözeltisi elde edilinceye kadar oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Daha sonra içerisine ağırlıkça %0.125, %0.25, %0.5 ve %0.75 oranlarında UiO-66 eklenerek

karıştırılmıştır. Ardından cam yüzeye dökülerek 90°C'de 24 saat kurumaya bırakılmıştır [13-14].

2.4 Nanokompozit membran karakterizasyonu

Polimerik ve nanokompozit membranların karakterizasyonu SEM, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Termogravimetrik Analiz (TGA), kullanılarak yapılmıştır. Membran yüzeyinde bulunan katkıların morfolojik yapısı SEM (Carl Zeiss/Gemini 300) ile analiz edilmiştir. Katkılı ve saf membranların bağ yapılarındaki fark FTIR (PerkinElmer, Spectrum Two) ile belirlenmiştir. Membranların ısıl kararlılıkları ve ısıl davranışları TGA (TA Instruments, SDT650) kullanılarak incelenmiştir.

2.5 Pervaporasyon prosesi ile metilalin saflaştırılması

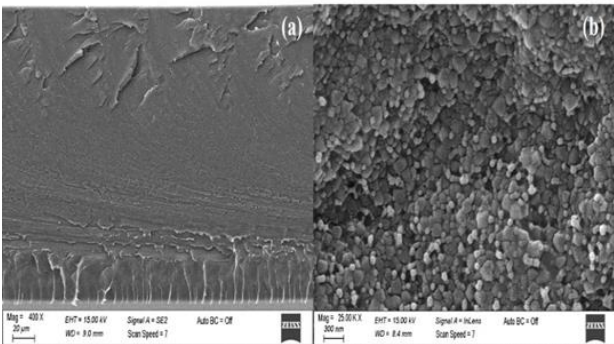
Üretim prosesi sonucunda metilal/metanol ikili azeotropik karışımları şeklinde elde edilen metilal pervaporasyon sistemi ile saflaştırılmıştır. Saf ve nanokompozit membranlarda akı ve seçicilik değerlerine operasyon sıcaklığının, besleme konsantrasyonunun, UiO-66 yükleme miktarının ve membran kalınlığının etkisi incelenmiştir. Membran hücresinin sıcaklık kontrolü etüv ile sağlanmıştır. Besleme karışımı, bir mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Pervaporasyon prosesinde membranın üst akımı atmosfer basıncında iken, diğer yanında vakum bulunmaktadır. Metanole yüksek afinite gösteren PEI membran ve UiO-66 katkı maddesi kullanıldığından metanol membrandan geçerek saflaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Alt ve üst akım arasındaki basınç farkından dolayı, alt akımdan elde edilen metanol düşük basınçta buharlaştığı için buhar fazında elde edilmektedir. Buhar fazında elde edilen metanol, sıvı azot ile yoğunlaştırılıp tekrar sıvı fazda elde edilmiştir. Ürün ve beslemeden alınan örnekler gaz kromatografisi (Shimadzu - GC-2014AFsc) cihazı ile analiz edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Nanokompozit membran karakterizasyonu

3.1.1 SEM

PEI membranın yapısal analizi SEM ile belirlenmiştir. Katkısız PEI ve UiO-66 katkılı PEI membranın SEM kesit görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.

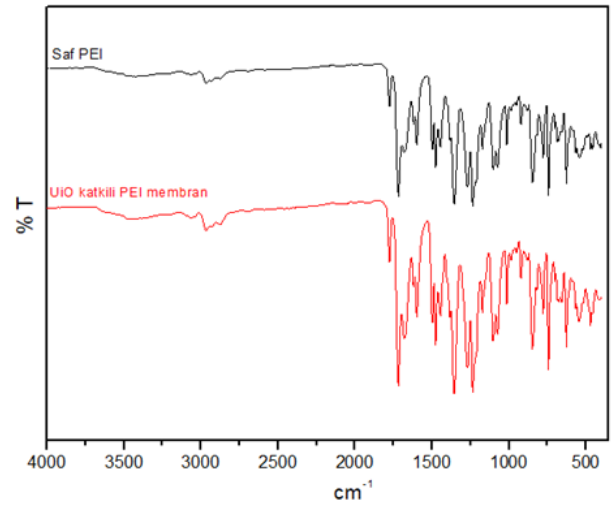


Şekil 1. SEM analizi (a) katkısız PEI membran (b) UiO-66 katkılı PEI membran

Katkısız PEI membranın kesit görüntüsüne bakıldığında tek bir polimer matrisinden oluştuğu, yapısında herhangi bir katkı bulunmadığı, homojen, yoğun bir yapı sergilediği görülmüştür. UiO-66 katkılı PEI membrana bakıldığında ise yapıdaki UiO-66'nın varlığı açıkça görülmektedir. UiO-66'nın PEI polimeri ile uyumlu bir yapı sergilediği, polimer matrisi içinde homojen bir dağılım gösterdiği, herhangi bir gözenek ve boşluk oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Hem katkısız hem de UiO-66 katkılı PEI membranda hedeflenen yapılara ulaşılmıştır.

3.1.2 FTIR

Sentezlenen membranların kimyasal bağ yapılarındaki değişim FTIR analizi ile belirlenmiştir.



Şekil 2. FTIR analizi

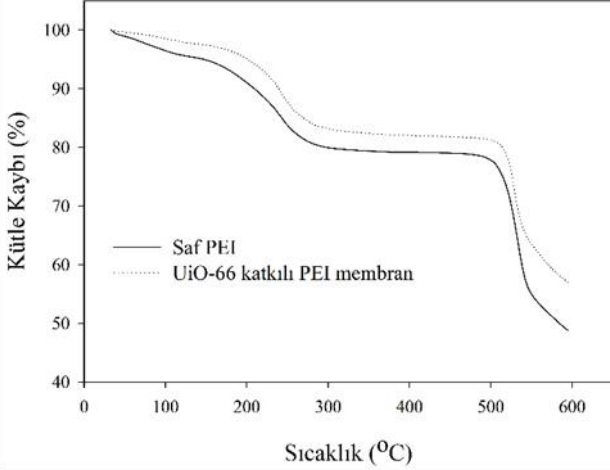
Saf PEI membranın FTIR spektrumundaki imid karbonil asimetrik ve simetrik gerilim bantları 1777 ve 1717 cm^{-1} 'de, C-N gerilim ve eğilme bantları 1352 ve 742 cm^{-1} 'de, aromatik eter C-O-C 1234 cm^{-1} 'de görülmektedir [15]. 3000-3500 cm^{-1} 'de aralığında geniş bant, membranda bulunan -OH ve ikincil amin gruplarının germe titreşiminden kaynaklanmaktadır. 2962 cm^{-1} 'de gözlenen absorpsiyon bantları, $-\text{CH}_2$ gruplarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. 1643 ve 1570 cm^{-1} 'deki iki yeni absorpsiyon bandı, C=O (amid I) ve N-H (amid II) gerilme titreşimi ile ilişkilidir. UiO-66 katkılı PEI membran, 3400 cm^{-1} , 1585 cm^{-1} , 1395 cm^{-1} ve 1506 cm^{-1} 'de FT-IR pikleri vermiştir. Bu pikler sırasıyla adsorbe edilen suyun O-H germe titreşimine, tereftalik asitteki O-C-O bağına ve benzen halkasındaki C=C bağına karşılık gelmektedir. 1570 cm^{-1} 'de absorpsiyon bandının görünümü $-\text{COOH}$ 'nin Zr^{4+} ile reaksiyonunun varlığını göstermektedir [16-17].

3.1.3 TGA

Membranların termal dayanımı TGA ile belirlenmiştir. Şekil 3'te saf PEI ve UiO-66 katkılı PEI membranların TGA eğrileri gösterilmiştir.

Saf PEI ve UiO-66 katkılı PEI membranlarda görülen ilk aşamadaki kütle kaybı 100-200°C sıcak aralığında meydana gelmiştir ve membran yapısında kalan ya da katkı maddelerinin sentezinde kullanılan çözücülerin yapıyı terk

etmesi nedeniyle olduğu düşünülmektedir [18]. Ana kütle kaybı, 450-500°C sıcaklıklarından sonra başlamıştır. Saf PEI membranda katkı olarak kullanılan UiO-66'nın membranın bozunma sıcaklığını yükselttiği görülmüştür. UiO-66 katkılı PEI membranda %56 kalıntı değeri elde edilmiştir. Saf PEI membranda ise bu değer %48 olarak elde edilmiştir. TGA sonuçları sentezlenen membranların yüksek termal dayanıma sahip olduğunu göstermektedir.

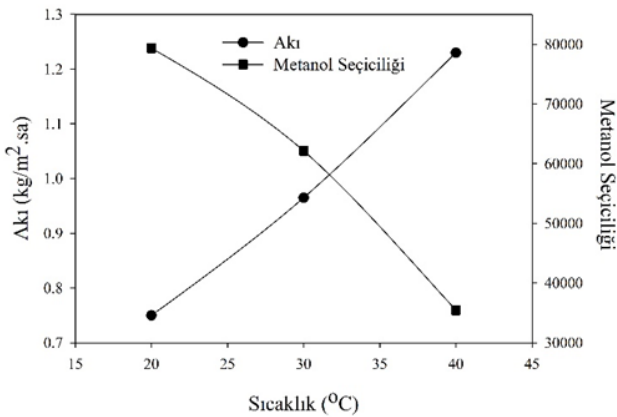


Şekil 3. Membranların TGA eğrileri

3.2 Pervaporasyon deneyi sonuçları

3.2.1 Operasyon sıcaklığının etkisi

Ağırlıkça %6 metanol içeren besleme karışımı, 150 µm kalınlığında ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membranın 20, 30 ve 40°C operasyon sıcaklıklarında ayırma performansı incelenmiştir. Şekil 4'te sıcaklığın akı ve metanol seçiciliği üzerine etkisi verilmiştir.



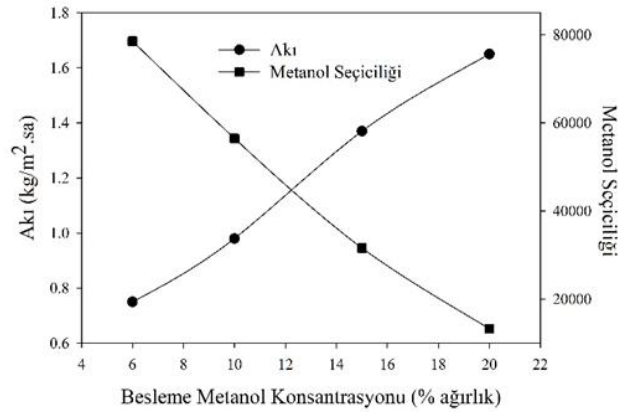
Şekil 4. Sıcaklığın ayırma performansına etkisi (Çalışma koşulları: ağırlıkça %6 besleme metanol konsantrasyonu, ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membran, 150 µm kalınlık)

Sıcaklık arttıkça, akı değeri artış göstermiştir. Sıcaklıktaki artış, hem metanolün hem de metilalin doymuş buhar basınçlarında artışa neden olur. Yüksek doymuş buhar basıncı farkı, bir itici güç yaratmış ve bu itici kuvvetle geçirgenlik akısı artmıştır. Ayrıca membranın geçirgenliği,

besleme bileşenlerinin çözünürlüğü ve membran boyunca difüzyonu ile de ilgilidir. Bileşenlerin difüzyonu çalışma sıcaklığı ile artmış ve dolayısıyla metanolünde taşınımı artmıştır. Ayrıca sıcaklığın artması polimer zincirlerinin termal hareketini kolaylaştırmış ve serbest hacim artmıştır. Bileşenlerin kütle transferi hızlanmış, böylece akı değeri artış göstermiştir. 20°C'de 0.75 kg/m².sa akı değeri elde edilirken, 40°C'de bu değer 1.23 kg/m².sa'ye yükselmiştir. Ancak metanolün seçicilik değerleri azalmıştır. Bu durum, serbest hacim ve hareketliliğin artması, polimer zincirlerinin esnekliği ile ilgilidir. Sıcaklıkla genişleyen difüzyon kanalları, metanol molekülleri ile birlikte metilal moleküllerinde membran boyunca transferine izin verir [19-20]. 20°C'de metanol seçiciliği 79349 iken 40°C'de 35455'e düşmüştür. Ancak metanol seçiciliği değeri 20°C'de yüksek olarak elde edilse de akı değeri oldukça düşüktür. 40°C'de ise akı yüksek olmasına rağmen seçicilik değeri düşmüştür. Bu sebeple optimum sıcaklık değeri 30°C olarak belirlenmiştir.

3.2.2 Beslemede metanol konsantrasyonunun etkisi

Beslemedeki metanol miktarının pervaporasyon performansına etkisi ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı 150 µm kalınlığında PEI membran kullanılarak, 30°C'de incelenmiştir. Şekil 5'te besleme metanol konsantrasyonunun akı ve metanol seçiciliği üzerine etkisi verilmiştir.



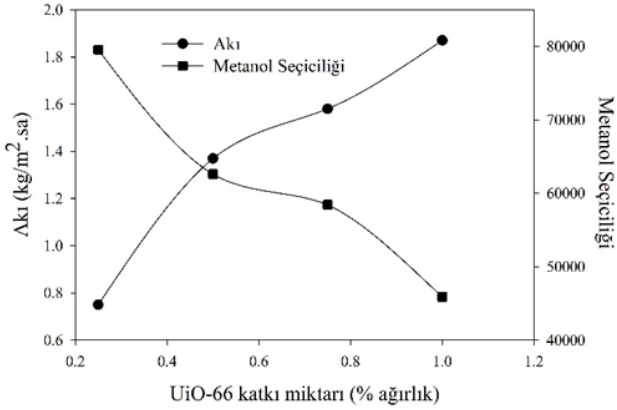
Şekil 5. Besleme metanol konsantrasyonunun ayırma performansına etkisi (Çalışma koşulları: 30°C, ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membran, 150 µm kalınlık)

Besleme karışımındaki metanol konsantrasyonu arttıkça toplam akının arttığı görülmektedir. Pervaporasyonda taşınım, çözünme difüzyon mekanizmasına dayanır. Difüzyon konsantrasyona bağlıdır. Konsantrasyondaki artış difüzyonu kolaylaştırır. Besleme bileşeni ile membran arasındaki etkileşim, yüksek besleme konsantrasyonu ile artar ve akı değeri artar. Yüksek metanol konsantrasyonu, membranın şişme derecesinde de artışa neden olur. Şişme derecesi ile membranın serbest hacmi artmıştır. Genişletilmiş difüzyon kanalları, metilal moleküllerinin metanol molekülleri ile difüzyonunu kolaylaştırır. Bu da akı artışının başka bir nedenidir. Seçicilik değeri ise besleme konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Bu değişiklik, serbest hacimdeki artışla birlikte metilalin membrandan

kolay ve rahat difüzyonu ile ilgilidir. Permeattaki metilal konsantrasyonunun artması, düşük seçicilik değeri ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle beslemedeki metanol konsantrasyonu arttıkça membran şişmiş ve metanol seçiciliği azalmıştır [21-23].

3.2.3 UiO-66 katkı oranının etkisi

Şekil 6’da membrana ilave edilen UiO-66 miktarının akı ve seçicilik üzerindeki etkisi verilmiştir.



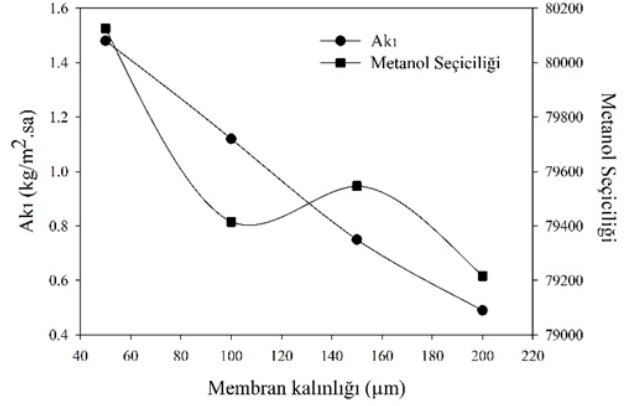
Şekil 6. UiO-66 yükleme oranının toplam akı ve metanol seçiciliğine etkisi (Çalışma koşulları: 30°C, ağırlıkça %6 besleme metanol konsantrasyonu, 150 µm kalınlık)

UiO-66 yükleme oranı arttıkça akı değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum UiO-66'nın hidrofilik karakteri ile açıklanabilir. Metanolde suya yakın polariteye sahip olduğu için UiO-66 metanol/metilal karışımında metanole yüksek ilgi gösterir. Bu nedenle, UiO-66 katkılı membrandan metanolün yüksek oranda difüze olması, yoğun PEI matrisinden ziyade UiO-66 katkı maddesinin seçici taşıma kanallarına dayanır. Öte yandan UiO-66 miktarı arttıkça adsorbe edilen metanol miktarındaki artış, itici gücü ve membranın şişme derecesini arttırmıştır. Şişme derecesindeki artış membranın serbest hacmin artmasına yol açmış, böylece toplam akı artarken, seçicilik azalmıştır [24]. Bu da UiO-66 yükleme oranı arttıkça seçicilikte azalma ile sonuçlanır. Ağırlıkça %0.25 UiO-66 katkılı PEI membranda akı değeri 0.75 kg/m².sa iken, ağırlıkça %1 UiO-66 katkılı PEI membranda akı değeri 1.87 kg/m².sa'e yükselmiştir. Metanol seçiciliği değeri ise ağırlıkça %0.25 UiO-66 katkılı PEI membranda 79547 iken ağırlıkça %1 UiO-66 katkılı PEI membranda metanol seçiciliği değeri 45879 olarak elde edilmiştir. UiO-66 katkılı PEI membranda yükleme oranı arttıkça akı artmış, seçicilik değeri azalmıştır. Ancak akı değeri ağırlıkça %1 UiO-66 katkılı PEI membranda yüksek olarak elde edilse de metanol seçiciliği değeri düşüktür. Ağırlıkça %0.25 UiO-66 katkılı PEI membranda ise akı düşük olmasına rağmen seçicilik değeri yüksektir. Şekil 6'da elde edilen değerlere bakıldığında ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membranda elde edilen değerler optimum olarak kabul edilmiştir. Çünkü akı ve seçicilik değerlerinde en düşük ve en yüksek değerler göz önünde bulundurulduğunda ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membranda akının 1 kg/m².sa'in üzerinde bulunması ve seçiciliğinde yine yüksek

bir değer olması sebebi ile ağırlıkça %0.5 yükleme oranı optimum değer olarak seçilmiştir.

3.2.4 Membran kalınlığının etkisi

Pervaporasyon ile metilal/metanol karışımlarının saflaştırılmasında membran kalınlığının etkisi 50, 100, 150, 200 µm kalınlığına sahip membranlarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de membran kalınlığı ile akı ve seçicilik değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 7. Membran kalınlığının toplam akı ve metanol seçiciliğine etkisi (Çalışma koşulları: 30°C, ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membran, ağırlıkça %6 besleme metanol konsantrasyonu)

Şekil 7'de de görüldüğü gibi membran kalınlığı arttıkça akı değeri azalmaktadır. Akı membran kalınlığı ile ters orantılıdır. Membran kalınlığı arttıkça bileşenlerin çözünme difüzyon mekanizmasına göre difüze olacağı yol artacak, bu da akıda azalma ile sonuçlanacaktır. Bu durum Fick Yasası formülü göz önüne alındığında da açıkça görülmektedir. Ayrıca seçicilik değerlerine bakıldığında metanol seçiciliğinin membran kalınlığı ile değişim göstermediği görülmektedir. Pervaporasyon prosesinde membran boyunca ayırma işlemi çözünme difüzyon mekanizması ile tanımlanmaktadır. Bu mekanizmaya göre membran kalınlığının seçicilik üzerinde etki oluşturmaması ya da çok düşük etki oluşturması beklenen bir sonuçtur.

50 µm kalınlığında hazırlanan UiO-66 katkılı PEI membranın akı değeri 1.48 kg/m².sa iken, 200 µm kalınlığında hazırlanan UiO-66 katkılı PEI membranın akı değeri 0.49 kg/m².sa'e düşmüştür. Metanol seçiciliği ise 50 µm kalınlığında hazırlanan UiO-66 katkılı PEI membranda 80126 iken, 200 µm kalınlığında hazırlanan UiO-66 katkılı PEI membranda 79216 olarak elde edilmiştir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada yeşil solvent ve yakıt biyokatki maddesi olarak kullanılan metilal, UiO-66 katkılı nanokompozit PEI membran kullanılarak pervaporasyon prosesi ile saflaştırılmıştır. Sentezlenen membranlar farklı analiz yöntemleri ile karakterize edilmiştir. UiO-66 katkısının membran matrisinde homojen dağılımı SEM ile, membranın kimyasal bağ yapılarındaki değişim FTIR ile, termal dayanımı ise TGA ile belirlenmiştir. Pervaporasyon testlerinde, operasyon sıcaklığının, besleme metanol

konsantrasyonunun, UiO-66 yükleme oranının ve membran kalınlığının ayırma performansı üzerine etkisi incelenmiştir. Optimum operasyon parametreleri 30°C sıcaklık, ağırlıkça %6 besleme metanol konsantrasyonu, ağırlıkça %0.5 UiO-66 katkılı PEI membran ve 50 µm kalınlık olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında akı ve metanol seçiciliği 1.48 kg/m².h ve 80126 olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar pervaporasyonun metilal/metanol azeotrop karışımlarını ayırmak için alternatif bir süreç olduğunu göstermektedir. Hazırlanan UiO-66 katkılı nanokompozit PEI membran metilal/metanol karışımının ayrılması için yüksek ayırma verimliliği sergilediği sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 210ÖAP03 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] Y. Dong, C. Dai and Z. Lei, Extractive distillation of methylal/methanol mixture using the mixture of dimethylformamide (DMF) and ionic liquid as entrainers. *Fuel*, 216, 503–512, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.043>
- [2] X. Lu, J. Ma, L. Ji and Z. Huang, Experimental Study on the Combustion Characteristics and Emissions of Biodiesel Fueled Compression Ignition Engines with Premixed Dimethoxymethane. *Energy & Fuels*, 21, 3144–3150, 2007. <https://doi.org/10.1021/ef070099w>.
- [3] Q. Wang, B. Yu and C. Xu, Design and Control of Distillation System for Methylal/Methanol Separation. Part 1: Extractive Distillation Using DMF as an Entrainer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51, 1281–1292, 2012. <https://doi.org/10.1021/ie201946d>.
- [4] E. Carretier, P. Moulin, M. Beaujean and F. Charbit, Purification and dehydration of methylal by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 217, 159–171, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00125-X).
- [5] X. Zhang, S. Zhang and C. Jian, Synthesis of methylal by catalytic distillation. *Chemical Engineering Research and Design*, 89, 573–580, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.09.002>.
- [6] I. D. Wilson, E. D. Adlard, M. Cooke and C. F. Poole, *Encyclopedia of Separation Science*. Academic Press, Germany, 2006.
- [7] A., Basile, M.D. Falco, G. Centi and G. Iaquaniello, *Membrane Reactor Engineering: Applications for a Greener Process Industry*. Wiley, United Kingdom, 2016.
- [8] A. Basile, A. Figoli and M. Khayet, *Pervaporation, Vapour Permeation and Membrane Distillation: Principles and Applications*. Woodhead Publishing, UK, 2015.
- [9] S. Das, A. K. Banthia and B. Adhikari, Improved conversion to ethyl acetate through removal of water of esterification by membrane pervaporation. *Indian Journal of Chemical Technology*, 14, 552–559, 2007.
- [10] G. Mensitieri, G. Scherillo, P.L. Manna and P. Musto, Sorption Thermodynamics of CO₂, H₂O, and CH₃OH in a Glassy Polyetherimide: A Molecular Perspective. *Membranes*, 9, 1–30, 2019. <https://doi.org/10.3390/membranes9020023>.
- [11] Y.M. Xu and T.S. Chung, High-performance UiO-66/polyimide mixed matrix membranes for ethanol, isopropanol and n-butanol dehydration via pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 531, 16–26, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.02.041>.
- [12] N. Wang, G. Zhang, L. Wang, J. Li, Q. An and S. Ji, Pervaporation dehydration of acetic acid using NH₂-UiO-66/PEI mixed matrix membranes. *Separation and Purification Technology*, 186, 20–27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.05.046>.
- [13] J. Li, X. Si, X. Li, N. Wang, Q. An and S. Ji, Preparation of acid-resistant PEI/SA composite membranes for the pervaporation dehydration of ethanol at low pH. *Separation and Purification Technology*, 192, 205–212, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.038>.
- [14] R. Gao, Q. Zhang, R. Lv, F. Soyekwo, A. Zhu and Q. Liu, Highly efficient polymer-MOF nanocomposite membrane for pervaporation separation of water/methanol/MTBE ternary mixture. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 688–697, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.11.027>.
- [15] B. K. Chen, C. Su, T. Tseng and M.C. Tsay, Preparation of Polyetherimide Nanocomposites with Improved Thermal, Mechanical and Dielectric Properties. *Polymer Bulletin*, 57, 671–681, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00289-006-0630-3>.
- [16] B. Liu, D. Li, J. Yao and H. Sun, Improved CO₂ separation performance and interfacial affinity of mixed matrix membrane by incorporating UiO-66-PEI@[bmim][Tf₂N] particles. *Separation and Purification Technology*, 239, 116519, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116519>.
- [17] W. Ma, T. Li, Q. Zhang, J. Zhong and H. Matsuyama, Preparation of hybrid membranes by incorporating hydrophilic UiO-66 nanoparticles for high-performance pervaporation dehydration of aprotic solvents. *Journal of Nanoparticle Research*, 22(3),64, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-4778-9>.
- [18] F. Demirciyeva, *Membran Yöntemi Kullanarak Metan-Karbondioksit Gaz Karışımından Metanın Ayrıştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye, 2006.*
- [19] W.F. Guo, T.S. Chung and T. Matsuura, Pervaporation study on the dehydration of aqueous butanol solutions: a comparison of flux vs. permeance, separation factor vs. selectivity. *Journal of Membrane Science*, 245, 199–210, 2004. <https://doi.org/10.1007/s11051-020-4778-9>.

- [20] S. Zhang, Y. Zou, T. Wei, C. Mu, X. Liu and Z. Tong, Pervaporation dehydration of binary and ternary mixtures of n-butyl acetate, n-butanol and water using PVA-CS blended membranes. *Separation and Purification Technology*, 173, 314–322, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.09.047>.
- [21] T.A. Jalal, N.M.S. Bettahalli, N.L. Le and S.P. Nunes, Hydrophobic Hyflon AD/Poly(vinylidene fluoride) Membranes for Butanol Dehydration via Pervaporation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 11180–11187, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02754>.
- [22] A.A. Kittur, B.K. Jeevankumar, M.Y. Kariduraganavar and S.D.M College, Pervaporation separation of water-dioxane mixtures through poly (vinyl alcohol)-silicone based hybrid membranes. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 1, 148–156, 2013.
- [23] C.H. Tsou, Q.F. An, S.C. Lo, M.D. Guzman, W.S. Hung, C.C. Hu and J.Y. Lai, Effect of microstructure of graphene oxide fabricated through different self-assembly techniques on 1-butanol dehydration. *Journal of Membrane Science*, 477, 93–100, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.12.039>.
- [24] H. Zhu, R. Li, G. Liu, Y. Pan, J. Li, Z. Wang, Y. Guo, G. Liu, Liu and W. Liu, Efficient separation of methanol/dimethyl carbonate mixtures by UiO-66 MOF incorporated chitosan mixed-matrix membrane, *Journal of Membrane Science*, 652, 120473, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120473>.





Doğrudan enerji biriktirmesi ve seçimli lazer ergitmesi uygulamalarının Inconel 718 mikroyapısında yol açtığı değişimler

The influence of selective laser melting and directed energy deposition applications on the microstructure of Inconel 718 alloy

Murat Işık^{1,*} 

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16120, Bursa, Türkiye

Öz

Nikel-bazlı alaşımlar ve bunlar arasından Inconel 718, zorlu koşullardaki üstün mekanik özellikleri sebebi ile hava-uzay endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Metal eklemeli imalat teknikleri arasından en popüler olanlar toz yataklı sistemler (seçimli lazer ergitmesi (SLM) ve elektron ışını ergitmesi (EBM)), doğrudan enerji biriktirmesi yöntemleridir. Ancak bu yöntemler ile üretilen Inconel 718 alaşımları üzerinde hala bilinmeyen birçok detay vardır ve üretilen parçaları daha iyi optimize etme ihtiyacı sürmektedir. Mikroyapısal özellikler, mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahiptir ve DED ve SLM gibi yöntemlerle üretilen mikroyapıları bilmek, aralarında bulunan farkları anlamak endüstri ve akademik topluluğa mikroyapısal optimizasyon açısından katkıda bulunacaktır. Bu motivasyondan yola çıkarak DED ve SLM işleminin Inconel 718 alaşıma mikroyapısal özellikleri inceleme ve farkları ortaya koyma fikri benimsenmiştir. DED ve SLM yöntemleri ile üretilen numuneler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar iki ayrı yöntemle üretilen mikroyapı üzerinde belirgin farklılıklar oluşabildiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nikel-bazlı alaşım, Seçimli lazer ergitmesi, Doğrudan enerji biriktirmesi, Isıl işlem

1 Giriş

Eklemeli imalat teknolojileri son zamanlarda akademik camiadan ve endüstriden büyük ilgi görmekte ve gün geçtikçe daha da popüler hale gelmektedir [1, 2]. Biyomedikal, otomotiv ve hava-uzay gibi birçok uygulama alanı mevcuttur [3, 4]. Eklemeli imalat teknikleri seçimli lazer [5] ve elektron ışını ergitmesi [6, 7] gibi toz yataklı sistemlerin yanı sıra, tel-arkı eklemeli imalat [8, 9] ve doğrudan enerji biriktirmesi [10, 11] gibi yöntemleri de kapsamaktadır. Eklemeli imalat yöntemi kafes yapılar ve ince kanalların bulunduğu parçaların üretimi dışında geometrik olarak kompleks parçaların üretilmesi, topoloji optimizasyonu ile dizayn edilen parçaların üretilmesi ve işlenmesi zor malzemelerin imalatına da olanak sağlar [5, 12, 13]. Konvansiyonel imalat yöntemlerinde olduğu gibi bir kalıp veya takım ihtiyacını ortadan kaldırır [14]. Ayrıca kullanılan hammadde yönünden de verimliliği yüksek, sarf malzeme israfı düşüktür [15, 16].

Abstract

Inconel 718 have been widely preferred in aerospace industry due to their outstanding mechanical properties under extreme conditions. Powder bed fusion-based systems, such as selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM), and directed energy deposition (DED) methods are one of the most popular metal additive manufacturing manners. There are still many unknown on additive manufacturing of Inconel 718 alloy and is requirement to further optimize the production of these alloys. Microstructural traits have significant impact on mechanical properties; therefore, better understanding, the microstructure of DED and SLM processed Inconel 718 would contribute the optimization of additive manufacturing of Inconel 718 alloy. The idea of demonstrating microstructural differences and investigation of microstructures formed using DED and SLM has been adopted. DED and SLM samples are investigated using optical microscope and scanning electron microscope. The results show DED and SLM manners promotes major differences in microstructure of Inconel 718 alloy.

Keywords: Nickel-based alloy, Selective laser melting, Directed energy deposition, Heat treatment

Yukarıda bahsedilen işlenmesi zor malzemelerden bir tanesi de Nikel-bazlı alaşımlardır. Nikel bazlı alaşımlardan özellikle Inconel 718, yüksek sıcaklık gibi zorlu koşullar altında üstün mukavemet, sürünme, ve yorulma gibi mekanik özellikler sergilemelerinden dolayı kritik havacılık parçalarında, örneğin türbin bıçakları ve diskler, ve şaftlarında, sıklıkla tercih edilmektedirler [17–19]. Inconel 718 malzemenin üstün mekanik özellikleri mikroyapısal karakteristikleri ile yakından bağlantılıdır. Inconel 718 alaşımların mikroyapısal bileşenlerinden olan yüzey merkezli kübik γ -Ni₃(Al,Ti) fazı ve hacim merkezli tetragonal yapıdaki γ' -Ni₃Nb fazı Inconel 718 alaşımların mukavemetlenme mekanizmalarını oluşturur [20]. γ ve γ' fazları dislokasyonlar üzerinde doğal bariyerler olarak görev yaparak dislokasyon hareketlerine mani olurlar ve bu sayede Inconel 718 malzemenin yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özelliklere sahip olmasını sağlarlar. Önlerine engel çıkan dislokasyonlar çökelti fazlarını keserek veya çevrelerinden geçmek durumunda kalarak hareket ederler.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muratisik@uludag.edu.tr (M. Işık)

Geliş / Received: 08.07.2022 Kabul / Accepted: 05.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1142507

Bunlara ek olarak Inconel 718 mikroyapısı tane sınırlarında mikroçatlaklara yol açan ortorombik kırılğan δ fazı da mevcuttur [21]. Yine diğer bir kırılğan faz olarak hegzagonal yapıda bulunan Niyobyum zengini ve metaller arası bileşik olan laves fazı sıralanabilir [22]. Laves fazı Niyobyum ayrışması ile meydana gelirken ana mukavemetlenme fazlarını zayıflatır ve matristeki Molibden, Titanyum ve Nikel gibi elementleri tüketir. Literatürden bilinen bu verilere dayanarak mikroyapının alaşımın mekanik özellikleri üzerinde ve dolayısı ile endüstriyel uygulamalar üzerine etkisi olacağı açık bir durumdur. Inconel 718 de dahil, eklemeli imalat ile üretilen birçok malzeme üretim işlemi için üretim parametreleri benzeri değişkenlere hassastır [23, 24]. Dolayısı ile buna kullanılan eklemeli imalat yöntemi de dahil edilebilir. Mikroyapı ve dolayısı ile de mekanik özellikler üzerinde değişikliklere yol açan bir diğer uygulama ise ısıtma işlemleridir [25]. Bilgimiz kadarı ile, daha önce literatürde farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş Inconel 718 alaşımın mikroyapısını anlamaya yönelik bir deneysel çalışma ilk elden gerçekleştirilmemiştir. Daha önce farklı metal eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen alaşımların kıyaslamalarında sadece/kısmen literature bağlı kalınırken ve (tek bir cihaz ile üretimi içeren) çalışmalar yoğunlukta iken, mevcut çalışmada farklı iki metal eklemeli imalat ile üretilen mikroyapılar deneysel olarak üretilerek kıyaslanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin daha iyi anlaşılması ve birbiri ile kıyaslanarak bir tartışmanın yapılabilmesi eklemeli imalatın daha kullanılabilir hale gelmesi, eksikliklerinin giderilmesi ve ilerleyen yıllarla beraber geleneksel imalat yöntemlerine sağlam bir alternatif olabilmesi açısından elzemdir; akademik ve endüstriyel topluluklar halen eklemeli imalatın, üretim hızı, porozite, hasar ve yorulma ömrüne doğrudan etkisi bulunabilen yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü gibi konularda eksikliklere sahip olduğu ve daha ileri seviyede geliştirilmesi hususunda mutabıktır [9, 26, 27]. Mevcut çalışma da iki farklı eklemeli imalat yöntemi olan DED ve SLM yöntemleri ile üretilen Inconel 718 malzemelerin özellikle mikroyapılarının ve bir miktar da yüzey morfolojisinin nasıl etkileyebildiğini açıklanarak yukarı bahsedilen amaçlara katkıda bulunabilmeyi dolayısı ile akademik ve endüstriyel topluluğa katkıda bulunmak hedeflemiştir.

DED ve SLM tekniklerinin en çok tercih edilen üretim stratejilerinden ikisi olduğu bilgisini değerlendirerek, Inconel 718 alaşımı bu iki teknik kullanarak üretilmiştir. İki ayrı üretim yönteminin mikroyapıda açtığı değişimleri incelemek, anlamak ve açıklamak amacı ile üretilen parçalar optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yöntemler ile incelenmiştir. İlave olarak ısıtma işleminin etkisi, SLM ile üretilen parça üzerinde incelenmiştir. Dahası üretilen parçaların yüzey pürüzlülükleri de profilometre aracılığı ile incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

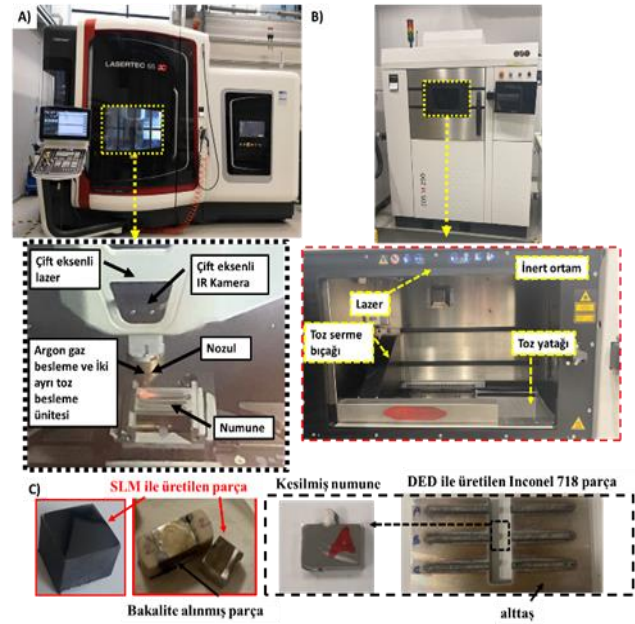
2.1 Numunelerin farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi

Toz boyutu 45-106 μm arasında olan Nikel-bazlı alaşım Inconel 718 tozu (Oerlikon, Freienbach, İsviçre) sürekli

dalga Nd-YAG lazer sistemli doğrudan enerji biriktirmesi kullanılarak 316 L paslanmaz çelik tabla üzerinde üretilmiştir (DMG Mori Seiki LASERTEC 65 DED hibrit cihaz). DED sistemi Şekil 1a'da gösterilmiştir. DED Inconel 718 malzemesi 2000 W lazer gücü, 22.2 m/s tarama hızı kullanılarak üretilmiştir. İki farklı ebatta numune üretilmiştir. Biri ergi havuzunu kolayca gözlemlemek amaçlı $\approx 2.5\text{mm} \times 0.7\text{mm}$, diğeri $3.1\text{mm} \times 3.6\text{mm}$ şeklindedir. Toz boyutu 15-45 μm arasında değişen Inconel 718 tozlarının (EOS, Almanya) bir kısmı seçimli lazer eritmesi (SLM, (EOS M290, EOSINT GmbH-Elektro-Optik cihazı)) yöntemi kullanılarak paslanmaz çelik tabla üzerine standart parametre kullanılarak işlenmiştir. Üretimde kullanılan SLM sistemi Şekil 1b'de verilmiştir. Inconel 718 tozu 285 W lazer gücü ve 960 m/s tarama hızı ve X, Y, değişen ve dönen tarama stratejisi kullanılarak üretilmiştir. Numune ebatları $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ şeklindedir. Deney için seçilen SLM ve DED lazer gücü değerleri endüstriyel uygulamalar için gerçekleştirilen değerler ve standartlar kullanılarak karar verilmiştir. DED ve SLM işlemlerinde kullanılan Inconel 718 tozunun bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Inconel 718 DED ve SLM tozunun kimyasal bileşenleri ve ağırlık yüzdeleri

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti
Inconel 718	53.9	18	18	5	3	0.6	1



Şekil 1. Bu çalışmadaki numunelerin üretiminde kullanılan (a) DMG MORI Lasertec 65 3D doğrudan enerji biriktirmesi ve (b) EOS M290 seçimli lazer eritmesi cihazları (c) SLM ve DED ile üretilen numuneler

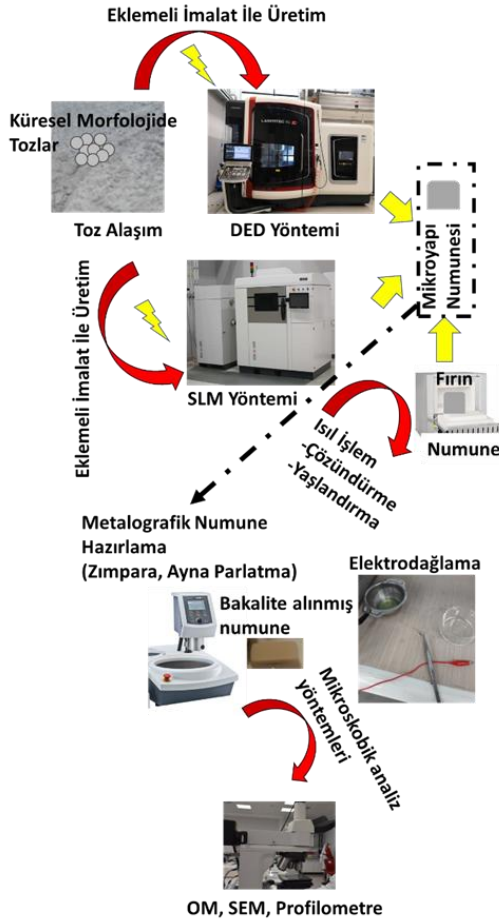
2.1.1 Isıl işlem uygulanması

SLM Inconel 718 ve DED Inconel 718 alaşımın bir diğer kısmı daha sonra iki basamaklı bir ısıtma işleme tabi tutulmuştur. İlk basamakta $1066\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat süre ile çözüldürme işlemi uygulanmıştır. İkinci basamakta ise iki

kısımdan oluşan yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Birinci yaşlandırma işleminde 760 °C'de 10 saatlik yaşlandırma işlemi uygulanırken daha sonra 649 °C'ye saatte 55 °C hızla düşülmüş ikinci kısımda ise 649 °C ve 8 saatlik yaşlanma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemi takiben Inconel 718 numuneler paslanmaz çelik tabladan tel erozyon kesimi aracılığı ile ayrılmıştır.

2.1.2 Mikroyapı ve faz analizi

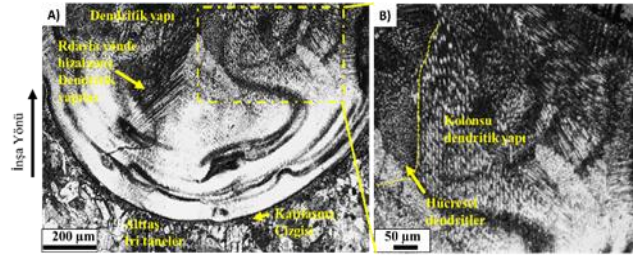
DED ve SLM ile üretilen numuneler, üretim işleminin ardından tel erozyon cihazı ile kesilmeleri gerçekleştirilmiş olup daha sonra soğuk bakalit ile kalıba alınmışlardır. Numunelerin ara kesitleri SiC zımpara kağıdı kullanılarak zımparalanmış daha sonra kumaş üzerinde 0.05 µm Al₂O₃ süspansiyonu kullanılarak ayna seviyede parlatılmıştır. Parlatılan numuneler hazırlanan bir düzenek ve %5'lik HCl asit sulu çözeltisi ve 3V'luk bir potansiyel kullanılarak 10 saniye boyunca elektrolitik olarak dağlanmıştır. DED ve SLM ile üretilen numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM, FE-SEM, Zeiss Leo Supra VP 35) ve optik mikroskop (OM, Nikon Clemex LVN100ND) kullanılarak karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi analizleri temassız 3B NanoFocus Usurf profilometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de genel olarak üretim ve analiz kısmı şema halinde verilmiştir.



Şekil 2. DED ve SLM numunelerin üretim ve analiz şeması

3 Bulgular ve tartışma

Şekil 3, DED ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın yüksek büyültme ve küçük büyültme optik mikroskop resimlerini göstermektedir. Paslanmaz çelik alttaş kısmında geniş taneli mikroyapı göze çarparken DED ile işlenmiş Inconel 718'in olduğu kısımda DED işleminin etkisi ile daha ince mikroyapılı bir malzemenin ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi DED işlemi esnasında gerçekleşen ve 10³-10⁴ K/s arası olan soğuma oranlarıdır [28–30]. Yine DED işleminin bir etkisi olarak, katılaşıma çizgisi yakınlarında ergime ve ardından gerçekleşen hızlı soğumadan kaynaklı kolonumsu bir dendritik yapı oluşumu göze çarpmaktadır; Inconel 718'de benzer bir kolonumsu dendritik yapı daha önce bir kaynak (GTAW) çalışmasında [31] gözlemlendiği bildirilmiştir. Ergime sonrası katılaşıma esnasında katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan çıkıntı benzeri yapıların negatif termal eğim ile birlikte sıvı yönüne doğru ince ve ağaç benzeri yapılarda katılaşıp ilerlemesi sonucu ve bu esnada sıvı kısım tarafından da bir miktar enerji absorbe edilerek dendritik yapıları oluşturmaktadır [32]. Dendritik yapının ergi havuzunun radyal yönüne doğru hizalanmış olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3b'deki yüksek büyültmeli resimden de gözlemlendiği üzere diğer kısımlara göre daha az bir kısmın dağınık olabildiği görülmektedir. Literatürde bazı durumların her zaman düzenli bir dendritik ağ yapısına sahip olamadığı, dendritik ağ yapısının düzensiz olduğu durumlar da mevcuttur [33]. İki kısımda da, düşük ve yüksek büyültmeli Inconel 718 kısımlarında, herhangi göze çarpan bir çökeltiye rastlanmamıştır.

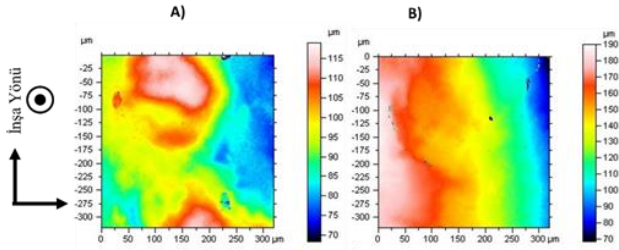


Şekil 3. DED Inconel 718 alaşımının (a) düşük (b) yüksek magnifikasyon mikroskop resimleri

Alttaş kısmından daha fazla uzaklaştıkça dendritik yapının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Dendritik taneli yapısı olarak farklı bölgelerde gözle görülür bir yapı inceliği farkı göze çarpmamaktadır. DED ile üretilen yapıda kalıntı stres kaynaklı herhangi bir çatlak veya dikkat çekici herhangi bir büyük porozite göze çarpmamaktadır. Herhangi bir baskın gaz porozitesi yapısı da numunede gözlemlenmemiştir [34]. Benzer şekilde alttaş üzerine inşa sonucu herhangi bir delaminasyon da gözlemlenmemektedir ki literatürde daha önce Inconel 718 inşası durumunda delaminasyonun gözlemlendiği durumlar da bulunmaktadır [35]. Delaminasyon durumu da yine benzer şekilde malzeme içerisinde kalıntı gerilimlerin homojen olmayan ısı dağılımı ile çekme gerilimlerini oluşturmaya ve alttaşın ayrılmasına sebep olmaktadır. Alttaşın üretim öncesi bir miktar ısıtılması bu tarz durumları engellemek için

kullanılırken mevcut çalışmada ise buna gerek kalmamıştır. Herhangi bir büzülme boşluğu da gözlenmemektedir.

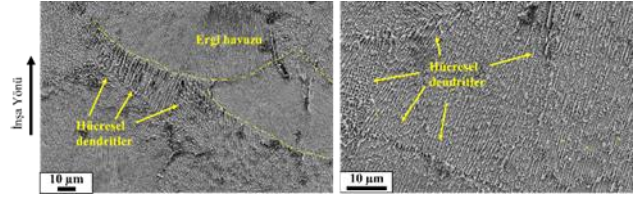
Inconel 718 malzemenin yüzeyinde yapılan profilometre resmi Şekil 4'te verildiği gibidir. DED ile inşa edilen son tabaka olan yüzey kısmında ergimemiş tozlar kaynaklı pürüzlülüğe yol açmaktadır. Yüksek tarama hızı kullanılmasının ergime esnasında ergi havuzunda bulunan tozların ıslanabilirliğini ve yüzey gerilimini etkilediği ve topaklanmaya yol açabildiği bilinmektedir [36]. Topaklanma sorunu da yine yüzey pürüzlülüğü üzerinde negatif etkiye sahiptir. Mevcut çalışmada topaklanma kaynaklı bir pürüzlülük tespit edilememiştir. Yapılan analiz sonucunda DED ile işlenmiş Inconel 718 nunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri Ra: 9.9 µm olarak ölçülmüştür. Isıl işlem uygulanmış DED numunesinin Ra değeri ise 5.6 µm olarak tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü değerinin bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. (a) DED Inconel 718 (b) ısıl işlem uygulanan DED Inconel 718 alaşımın profilometre aracılığı ile gözlemlenen yüzey morfolojisi

SLM ile üretilmiş Inconel 718 numunenin mikroyapısı SEM ile incelenmiş ve Şekil 5'te gözlemlendiği gibi verilmiştir. DED ile üretilmiş numuneye göre daha küçük ergi havuzuna sahip olduğu şekilden gözlemlenebilmektedir; Şekil 6a'da bu fikri destekleyici niteliktedir. SLM işleminde de DED işleme benzer şekilde çok ince mikroyapıda bir durumun ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. SLM işleminde gerçekleşen 10^3 - 10^8 K/s arası soğuma oranlarının [17] çok ince yapıda mikroyapı oluşmasına yol açtığı görülmektedir. SLM mikroyapısının DED mikroyapısına göre daha ince olduğu mikroyapı analizleri sonuçlarında tespit edilmiştir. Bunun sebebinin soğuma oranı farklılıkları olduğu düşünülmektedir; DED için rapor edilen soğuma oranları değerleri SLM prosesine göre daha düşüktür. Ek olarak, daha önce literatürde yapılan bir çalışmada soğuma oranının dendritik yapının büyüklüğü üzerinde etkisi olduğu ortaya konmuştur [37]. Yine DED örneğine benzer şekilde, dendritik yapı ergi havuzunun radyal yönüne doğru hizalanmış durumdadır. Ergi havuzuna yakın olan dendritik yapının bir kısmı Şekil 5'a dan da görülebileceği üzere hücrel karakteristiktir ve numunenin diğer kısımlarından daha geniş yapıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebinin eklemeli imalatın doğası gereği üst üste gelen ergi havuzlarının ve ısı uygulanması sonucu önceki katmanda bir miktar genişlemeye neden olması durumundan kaynaklanıyor olması olası ihtimaller arasında bulunmaktadır. Ayrıca DED numunesine nazaran hücrel kısımların SLM numunesinde daha baskın olduğu gözlemlenmektedir. Dendritik yapıdaki kolonumsu ve

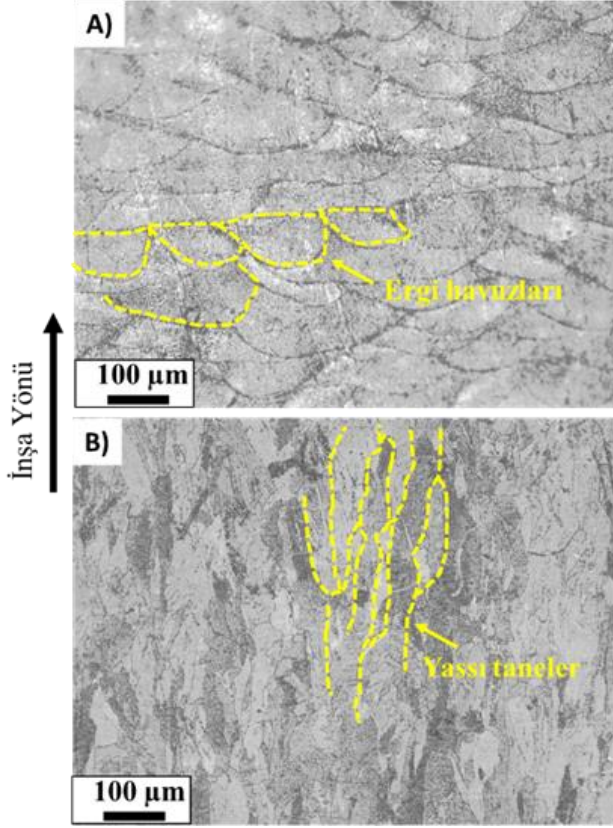
hücrel dendritik yapıların mekanik özellikleri farklı etkileyebileceği daha önce rapor edilmiştir [38]. DED numunesinden farklı olarak resimdeki bazı kısımlarda karbür yapıları benzeri çökeltiler gözlemlenmektedir. Daha önce EBM Inconel 718 üzerinde yapılan çalışmada da MC tip karbür varlığı gözlemlenmiştir [14]. Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda SLM ile üretilen numunede, daha önce EBM ve SLM gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen bazı çalışmalarda gözlemlendiği gibi bir füzyon eksikliği [12, 39, 40], büzülme, porozite veya herhangi bir çatlak ve çarpılma varlığı tespit edilmemiştir.



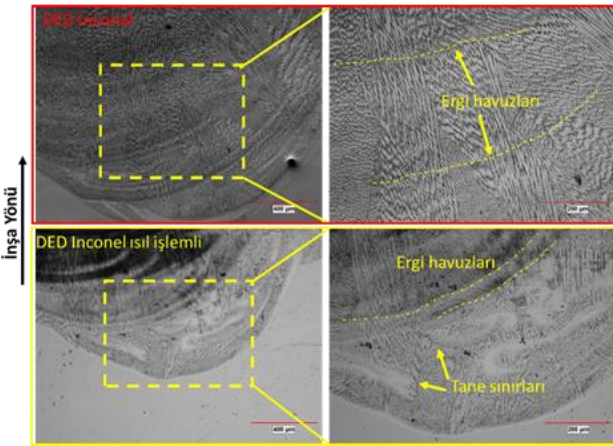
Şekil 5. SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın taramalı elektron mikroskobu resimleri

Şekil 6'da SLM ile üretilmiş numunenin ısıl işleme tabi tutulmadan önce ve sonraki durumlarını gösteren optik mikroskop resimleri yer almaktadır. Isıl işlem SLM ile üretilen parçalara kalıntı gerilimlerden kurtarmak ve tabladan kesim esnasında çarpılma durumlarından kaçınma gibi avantajları sağlamanın yanı sıra yaşlandırma ile mukavemetlenmeyi de amaçlamaktadır. Isıl işlem öncesi SLM numunesinde üst üste örtüşmüş durumda olan 100-150 µm arası ergi havuzlarından oluşan ve bu ergi havuzlarının içi, Şekil 5'te gösterildiği gibi oldukça ince taneli dendritlerden olan mikroyapının ısıl işlem sonrası bambaşka bir şekle değişmiştir. Tanealtı hücre yapısında bulunan mikroyapının, ısıl işlem etkisi ile toparlanma evresine girdiği değerlendirilmiştir. Hücrel yapıdaki mikroyapının yeniden kristallenerek dislokasyonsuz/düşük dislokasyonlu tane yapısına geçtiği ve tane sınırlarının yer değiştirmesi ile tane büyümesi durumunun gerçekleştiği fikri, daha önceki literatür bilgileri de değerlendirilerek, düşünülmektedir [25,41-44]. Isıl işlem sonrasında inşa yönüne paralel hizalanmış yassı bir mikroyapı göze çarpmaktadır. Buna ek olarak mikroyapıda bazı eşeksenli tanelerin varlığı da mevcuttur. Isıl işlem sonrası çok ince yapıda olan mikroyapı belirgin halde değişmiş daha iri taneli bir mikroyapıya doğru değişmiştir. SLM ile üretilmiş Inconel 718'in ısıl işlem uygulanması sonucu elde edilen mikroyapı aynı zamanda EBM ile üretilmiş Inconel 718 ile de büyük benzerlik göstermektedir; EBM Inconel 718'in mikroyapısında da inşa yönüne paralel olarak hizalanmış yassı tanelerin varlığı daha önceki literatür çalışmalarında gözlemlenmiştir [14,45].

Şekil 7'de Inconel 718 alaşımın ısıl işlem öncesi ve sonrası mikroskop resimleri yer almaktadır. Ergi havuzları varlığı ısıl işlem sonrası da korunmuştur. SLM işlemi ile üretilen numunede ısıl işlem sonrası ergi havuzları ortadan kalkarken, DED işleminde mikroyapıda halen gözlemlenmektedir. DED Inconel 718 numunesine ısıl işlem uygulanması sonrası bazı yeni oluşan tane sınırlarının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir (sarı oklar ile gösterilmiştir.) Kolonsu dendritik yapıda bir miktar azalma gözlemlenmiştir.



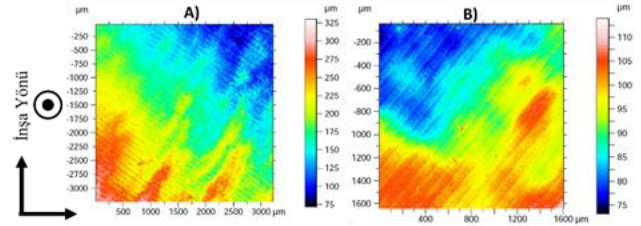
Şekil 6. (a) SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın (b) SLM ile üretildikten sonra ısı işleme tabi tutulan numunenin optik mikroskop resimleri



Şekil 7. DED Inconel 718 alaşımı ve ısı işleme tabi tutulan DED Inconel 718 alaşımın mikroyapı resimleri

Şekil 8’de SLM ile işlenmiş numune ve daha sonra ısı işleme tabi tutulmuş numunenin profilometre resimleri verilmiştir. DED ile üretilmiş numunede olduğu gibi ergimemiş kısımlar sonucu oluşan veya küresel yapıda pürüzlülükler oluşmadığı gözlemlenmiştir. SLM ile üretilmiş numune ve ısı işlem görmüş numunelerin Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri sırası ile 4.0 µm ve 3.9 µm olarak bulunmuştur. Bu durum SLM ile işlenmiş numunede ısı işlemin yüzey morfolojisinde önemli ölçüde bir değişim gerçekleşmediğini tavsiye etmektedir. Bu yönü ile DED

numunesinden farklılık durumu ortaya çıkmıştır. Literatürde daha önce SLM ile üretilmiş Inconel 718 alaşımlar için 5 µm ile 30 µm civarı bir değer tavsiye etmektedir [40,46]. Bu değerlerin frezeleme veya elektrokimyasal işlemlerle daha da düşük değerlere (1 µm civarı) ulaşılabilirdiği ve yüzeyin daha iyi geliştirilebildiği bilinmektedir [46,47]. Yüksek hızda frezeleme ile bu değerlerin daha da ileri, 0.3 µm’ye kadar geliştirilebildiği rapor edilmiştir [48]. Elde edilen sonuçlar SLM işlemi sonucu elde edilen Ra değerinin DED’ye göre daha az olduğunu işaret etmektedir. SLM ile yüzey kalitesi daha iyi sonuçlar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8. (a) SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın (b) SLM ile üretildikten sonra ısı işleme tabi tutulan numunenin yüzey morfolojisi resimleri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada DED ve SLM ile üretilen Inconel 718 alaşımlar arasındaki mikroyapısal farklılıklar ele alınmıştır. Deneysel veriler aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır:

DED üretimi sonucu ortaya çıkan ergi havuzu SLM ile üretime göre daha büyük boyuttadır.

SLM mikroyapısı DED’ye göre daha ince yapıdadır.

DED yapısı daha çok kolonumsu dendritik yapıları içerirken, SLM ile üretilen numune bol miktarda hüresel dendritik yapılar da içermektedir.

SLM numunesine ısı işlem sonucu dendritik yapılar ve ergi havuzu tamamen ortadan kaybolmuş, daha iri bir mikroyapı ortaya çıkmıştır. Bu mikroyapı inşa yönüne paralel yassı taneler ve bir miktar eşeksensiz tane içermektedir.

DED numunesine ısı işlem sonrası ergi havuzları varlığını sürdürmüş, yeni tane sınırlarının oluştuğu ve kolonsu dendritlerin kısmen kaybolduğu gözlemlenmiştir.

DED numunesi SLM ile üretilen duruma göre daha yüksek Ra yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. ısı işlemlili DED numunesinin Ra değeri, üretim sonrası duruma oranla daha düşük iken, SLM numunesine ısı işlem uygulandığında önemli ölçüde Ra yüzey pürüzlülüğü farkı tespit edilmemiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] F. Careri, D. Umbrello, K. Essa, M.M. Attallah and S. Imbrogno, The effect of the heat treatments on the tool wear of hybrid Additive Manufacturing of IN718, Wear, 203617, 470–471, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203617>.

- [2] Y. Zhang and A. Bandyopadhyay, Direct fabrication of bimetallic Ti6Al4V+Al12Si structures via additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 29, 100783, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100783>.
- [3] M. Isik, J.D. Avila and A. Bandyopadhyay, Alumina and tricalcium phosphate added CoCr alloy for load-bearing implants, *Additive Manufacturing*, 36, 101553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553>.
- [4] A. Bandyopadhyay, A. Shivaram, M. Isik, J.D. Avila, W.S. Dernell and S. Bose, Additively manufactured calcium phosphate reinforced CoCrMo alloy: Bio-tribological and biocompatibility evaluation for load-bearing implants, *Additive Manufacturing*, 28, 312–324, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.020>.
- [5] T. Maconachie, M. Leary, B. Lozanovski, X. Zhang, M. Qian, O. Faruque and M. Brandt, SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges, *Materials & Design*, 183, 108137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>.
- [6] M. Isik, E. Kisa, B. Koc, M. Yildiz and B. Pehlivanogullari, Topology optimization and manufacturing of engine bracket using electron beam melting, *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1, 583, 2021. <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111583>.
- [7] M. Isik, E. Kisa, B. Koc, M. Yildiz, B. Pehlivanogullari, A. Orhangul, O. Poyraz and G. Akbulut, Topology optimization and finite elemental analysis for an inconel 718 engine mounting bracket manufactured via electron beam melting, *AMCTURKEY Uluslararası Eklemleri İmalat Konferansı*, 2019. <https://research.sabanciuniv.edu/41130/>.
- [8] H. Nagamatsu, H. Sasahara, Y. Mitsutake and T. Hamamoto, Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining, *Additive Manufacturing*, 31, 100896, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin and S. van Duin, Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 139–150, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.002>.
- [10] K. Dortkasli, M. Isik and E. Demir, A thermal finite element model with efficient computation of surface heat fluxes for directed-energy deposition process and application to laser metal deposition of IN718, *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 369–382, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.049>.
- [11] J.D. Avila, M. Isik and A. Bandyopadhyay, Titanium–Silicon on CoCr alloy for load-bearing implants using directed energy deposition-based additive manufacturing, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12, 51263–51272, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c15279>.
- [12] A.R. Balachandramurthi, J. Moverare, S. Mahade and R. Pederson, Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties, *Materials (Basel)*, 12, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma12010068>.
- [13] M. Langelaar, An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55, 871–883, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1522-2>.
- [14] S.H. Sun, Y. Koizumi, T. Saito, K. Yamanaka, Y.P. Li, Y. Cui and A. Chiba, Electron beam additive manufacturing of Inconel 718 alloy rods: Impact of build direction on microstructure and high-temperature tensile properties, *Additive Manufacturing*, 23, 457–470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.017>.
- [15] Y. Zhai, H. Galarraga and D.A. Lados, Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques, *Procedia Engineering*, 114, 658–666, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.007>.
- [16] J.K. Watson and K.M.B. Taminger, A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption, *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316–1322, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.009>.
- [17] H. Yang, G. Jing, P. Gao, Z. Wang and X. Li, Journal of Materials Science & Technology Effects of circular beam oscillation technique on formability and solidification behaviour of selective laser melted Inconel 718: From single tracks to cuboid samples, *Journal of Materials Science & Technology*, 51, 137–150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.044>.
- [18] R.B. Li, M. Yao, W.C. Liu and X.C. He, Isolation and determination for δ , γ' and γ'' phases in Inconel 718 alloy, *Scripta Materialia*, 46, 635–638, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00041-6).
- [19] J. Sun and H. Yuan, Cyclic plasticity modeling of nickel-based superalloy Inconel 718 under multi-axial thermo-mechanical fatigue loading conditions, *International Journal of Fatigue*, 119, 89–101, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.017>.
- [20] G.H. Cao, T.Y. Sun, C.H. Wang, X. Li, M. Liu, Z.X. Zhang, P.F. Hu, A.M. Russell, R. Schneider, D. Gerthsen, Z.J. Zhou, C.P. Li and G.F. Chen, Investigations of γ' , γ'' and δ precipitates in heat-treated Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting, *Materials Characterization*, 136, 398–406, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.006>.
- [21] Y. Gao, D. Zhang, M. Cao, R. Chen, Z. Feng, R. Poprawe, J.H. Schleifenbaum and S. Ziegler, Effect of δ phase on high temperature mechanical performances of Inconel 718 fabricated with SLM process, *Materials Science and Engineering: A*, 767, 138327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138327>.
- [22] M. Godec, S. Malej, D. Feizpour, Donik, M. Balažic, D. Klobčar, L. Pambaguian, M. Conradi and A. Kocijan, Hybrid additive manufacturing of Inconel 718

- for future space applications, *Materials Characterization*, 172, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>.
- [23] B. Bax, R. Rajput, R. Kellet and M. Reisacher, Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 21, 487–494, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.002>.
- [24] N. Raghunath and P.M. Pandey, Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 985–995, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.07.001>.
- [25] M. Isik, M. Niinomi, H. Liu, K. Cho, M. Nakai, Z. Horita, T. Narushima and K. Ueda, Optimization of microstructure and mechanical properties of Co–Cr–Mo alloys by high-pressure torsion and subsequent short annealing, *Materials Transactions*, 57, 1887–1896, 2016. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016112>.
- [26] E. Atzeni, M. Barletta, F. Calignano, L. Iuliano, G. Rubino and V. Tagliaferri, Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by Direct Metal Laser Sintering (DMLS), *Additive Manufacturing*, 10, 15–23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.01.005>.
- [27] C. Gobert, E.W. Reutzler, J. Petrich, A.R. Nassar and S. Phoha, Application of supervised machine learning for defect detection during metallic powder bed fusion additive manufacturing using high resolution imaging., *Additive Manufacturing*, 21, 517–528, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.005>.
- [28] S.J. Wolff, S. Lin, E.J. Faierson, W.K. Liu, G.J. Wagner and J. Cao, A framework to link localized cooling and properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti-6Al-4V, *Acta Materialia*, 132, 106–117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.027>.
- [29] B. Zheng, Y. Zhou, J.E. Smugeresky, J.M. Schoenung and E.J. Laverna, Thermal Behavior and Microstructural Evolution during Laser Deposition with Laser-Engineered Net Shaping: Part I. Numerical Calculations, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 2228–2236, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9557-7>.
- [30] W.E. Frazier, Metal additive manufacturing: A review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917–1928, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- [31] S.G.K. Manikandan, D. Sivakumar and M. Kamaraj, Influence of weld cooling rate, 2019. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818182-9.00004-9>.
- [32] University of Cambridge, Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification_alloy_s/dendritic.php.
- [33] H. Sahasrabudhe, S. Bose and A. Bandyopadhyay, Laser processed calcium phosphate reinforced CoCrMo for load-bearing applications: Processing and wear induced damage evaluation, *Acta Biomaterialia*, 66, 118–128, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.11.022>.
- [34] Y. Huang, D. Wu, D. Zhao, F. Niu and G. Ma, Investigation of melt-growth alumina/aluminum titanate composite ceramics prepared by directed energy deposition, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3, 2021. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abf71a>.
- [35] M. Miedzinski, *Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition*. Thesis., Chalmers University of Technology, 2017. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/253822/253822.pdf>.
- [36] C.Y. Yap, C.K. Chua, Z.L. Dong, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, L.E. Loh and S.L. Sing, Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews*, 2, 041101, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.
- [37] X. Li, J.J. Shi, G.H. Cao, A.M. Russell, Z.J. Zhou, C.P. Li and G.F. Chen, Improved plasticity of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting through a novel heat treatment process, *Materials & Design*, 180, 107915, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107915>.
- [38] B. Song, S. Wen, C. Yan, Q. Wei and Y. Shi, Chapter 4-Preparation and processing of metal matrix composites, in: B. Song, S. Wen, C. Yan, Q. Wei, Y.B.T.-S.L.M. for M. and M.M.C. Shi (Eds.), *3D Printing Technology Series*, Academic Press, 89–208, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103005-9.00004-3>.
- [39] A.R. Balachandramurthi, J. Moverare, N. Dixit and R. Pederson, Influence of defects and as-built surface roughness on fatigue properties of additively manufactured Alloy 718, *Materials Science and Engineering: A*, 735, 463–474, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.072>.
- [40] G.E. Bean, D.B. Witkin, T.D. McLouth, D.N. Patel and R.J. Zaldivar, Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 22, 207–215, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.024>.
- [41] A. Rollett, G.S. Rohrer and J. Humphreys, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 1–704, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2>.
- [42] J.E. Burke and D. Turnbull, Recrystallization and grain growth, *Progress in Metal Physics*, 3, 220–292, 1952. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0502-8205\(52\)90009-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0502-8205(52)90009-9).
- [43] J.E. Bailey and P.B. Hirsch, The recrystallization process in some polycrystalline metals, *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 267, 11–30, 1962. <https://doi.org/10.1098/rspa.1962.0080>.
- [44] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura and J.J. Jonas, Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation

- conditions, *Progress in Materials Science*, 60, 130–207, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>.
- [45] C. Meier, R.W. Penny, Y. Zou, J.S. Gibbs and A.J. Hart, Thermophysical Phenomena in Metal Additive Manufacturing By Selective Laser Melting: Fundamentals, Modeling, Simulation, and Experimentation, *Annual Review of Heat Transfer*, 20, 241–316, 2018. <https://doi.org/10.1615/annualrevheattransfer.2018019042>.
- [46] Z. Baicheng, L. Xiaohua, B. Jiaming, G. Junfeng, W. Pan, S. Chen-nan, N. Muiling, Q. Guojun and W. Jun, Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing, *Materials & Design*. 116, 531–537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103>.
- [47] A. Shokrani, V. Dhokia and S.T. Newman, Hybrid Cooling and Lubricating Technology for CNC Milling of Inconel 718 Nickel Alloy, *Procedia Manufacturing*, 11, 625–632, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.160>.
- [48] D.M. D’Addona, S.J. Raykar and M.M. Narke, High Speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis, *Procedia CIRP*, 62, 269–274, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.004>.





Elektrohidrolik bir sistemin pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyici ile konum denetiminin gerçekleştirilmesi

Reinforcement learning based position control of an electro-hydraulic system

Mustafa Yavuz Coşkun^{1,*} , Mehmet İtik² 

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

² İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35140, İzmir, Türkiye

Öz

Elektrohidrolik sistemler sağladıkları avantajlar sebebiyle endüstrinin vazgeçilmezi olmuştur. Buna karşın hidrolik sistemlerin doğrusal olmayan karakteristik özellikleri ve çok sayıda parametre belirsizliği barındırması bu sistemlerin denetimini zorlaştıran etmenler olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada ise oransal valf ile sürülen asimetrik bir hidrolik pistonun konumu pekiştirmeli öğrenme ile denetlenmiştir. Pek çok pekiştirmeli öğrenme algoritması olmasına rağmen sürekli uzayda etkinliği ile öne çıkan derin deterministik politika gradyanı yöntemi tercih edilmiştir. İlgili hiper parametreler öncül çalışmalarla belirlenerek çoklu konum referans sinyali için denetleyicinin eğitimi benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçları kıyaslamak için aynı çalışma PID denetleyici ile de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan pekiştirmeli öğrenme yöntemi farklı karakteristiklere sahip konum referans sinyalinin takibinde PID denetleyiciden daha %25.51 oranında daha başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Elektrohidrolik sistem, Modelleme, Konum denetimi, Pekiştirmeli öğrenme, Derin deterministik politika gradyanı

1 Giriş

Orta ölçekli ve ağır sanayi kuruluşlarında elektrohidrolik sistemlerden (EHS) sıklıkla yararlanılmaktadır. Ayrıca bu sistemler tarım aletleri [1-2], robotik kollar [3-4] ve kazıcılar [5-6] gibi mobil uygulamalarda da kendisine yer bulmaktadır. EHS'lerin bu derece yaygın kullanıma sahip olmasının nedeni olarak ağırlıklarına karşın sağladıkları yüksek güç çıktısı gösterilebilir [7]. Bu kadar yaygın kullanılmasına rağmen doğrusal olmayan karakteristik özellikleri ve belirsizlikleri nedeniyle EHS'lerin hassas konum ve kuvvet denetimi zorlu bir süreç olarak kalmaya devam etmiştir [8-9].

Literatürde EHS'lerin konum denetim performansını geliştirmek amacıyla farklı denetleyicilerin kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır. Kayan kipli denetim sistemleri bunlardan birisidir. Kolsi-Gdoura vd. [10] kayan kipli denetleyici ve PI denetleyiciyi beraber kullanarak 4/3 valfle sürülen simetrik pistonu sahip bir EHS'nin basamak konum referansı takibini gerçekleştirmiştir. PI denetleyici ile elde

Abstract

Electrohydraulic systems have become an inseparable part of the industry due to the advantages they provide. On the other hand, the nonlinear characteristics of the hydraulic systems and the parametric uncertainties make their control troublesome. In this study, the position of an asymmetrical hydraulic piston driven by a proportional valve was controlled by reinforcement learning. Although there are many reinforcement learning algorithms, the deep deterministic policy gradient, which stands out with its effectiveness in continuous space, has been preferred. The hyperparameters were found by preliminary studies and the training of the controller for the designed position reference signal was carried out numerically. The obtained results are compared with the PID controller. The reinforcement learning method reached 25.51% more successful results than the PID controller in terms of tracking the position reference signal with different characteristics.

Keywords: Electrohydraulic system, Modeling, Position control, Reinforcement learning, Deep deterministic policy gradient

edilen sonuçlar kararlı haldeki takip hatası açısından yeterli olmasına rağmen oturma süresinin uzun olması çalışmada işaret edilen bir durum olmuştur. Kayan kipli denetim ise bu etkinin ortadan kaldırılması için kullanılmış ve oturma zamanında %80'e yakın iyileştirme elde edilmiştir. Buna karşın, kayan kipli denetiminin doğası sebebiyle denetim sinyalinin yüksek frekanslı bir şekilde işaret değişimi (çatırtı, *İng.* chattering) göstermesi yöntemin olumsuz yönü olarak ortaya çıkmaktadır. Kolsi-Gdoura vd. [11] devam çalışmasında EHS denetimi için uyarlamalı kayan kipli denetimden yararlanarak çatırtı sorununu en alt düzeye indirmeye başarmıştır. Fakat bu süreçte daha karmaşık bir denetleyici yapısı ortaya çıkmıştır. Shaer vd. [12] kayan kipli denetim yaklaşımını bulanık mantıkla birleştirerek EHS'nin konum ve kuvvet denetimi için yeni bir yaklaşım önermiştir. Çatırtının önüne geçmek için ise bu alanda etkinliği bilinen üstel erişim yaklaşımını (*İng.* exponential reaching law) tercih etmişlerdir. Sundukları sonuçlar önerdikleri yöntemin çatırtıyı olabildiğince azaltarak tatmin edici takip performansına ulaşabildiğini göstermiştir. Buna rağmen

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mycoskun@ktu.edu.tr (M. Y. Coşkun)

Geliş / Received: 17.08.2022 Kabul / Accepted: 09.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1163241

çatırtı tamamen ortadan kaldırılamamış, sadece frekansı azaltılmıştır. Bu durum ise takip performansını kötü yönde etkilemiştir.

Bulanık mantık [13] ve ANFIS [14] gibi başarılı denetim yöntemlerinin EHS'ler üzerine uygulaması da literatürde yer almaktadır. Fakat ilgili yöntemler denetim performansını artırmanın yanı sıra karmaşık bir denetim yapısı sunmaktadır. Bununla beraber EHS'den denetleyiciye geri beslenmesi gereken değişken sayısı da artmaktadır. EHS'lerin çalıştığı ortamlar hassas sensörler için uygun olmamakla beraber çoğu kez ilave sensörler için uygun bulmak kolay olmamaktadır. Bu durum ise bahsi geçen denetleyicilerin endüstride karşılık bulmasını güçleştirmektedir.

Bu noktaya kadar etkili fakat karmaşık yapıya ve/veya istenmeyen etkiler oluşturabilecek denetleyicilerden bahsedilmiştir. Bu dezavantajları barındırmayan ve uygulama kolaylığı sayesinde endüstride karşılık bulan PID denetleyici EHS denetiminde yüksek performans sergilemektedir [15-16]. PID denetleyiciler doğrusal denetim yöntemleri altında yer almaktadır, EHS ise doğrusal olmayan bir sistemdir. Bu durum PID ile EHS denetiminde dikkat edilmesi gereken bir husustur. PID denetleyiciyi basamak veya rampa veya sinüs gibi tek bir referans sinyali takip edecek şekilde optimize etmek bu durumda tercih edilen bir yaklaşımdır. Böylelikle, doğrusal denetleyici ile doğrusal olmayan bir sistemi denetlerken ortaya çıkabilecek denetim performansı kaybı en aza indirgenebilir. Fakat bu çalışmadaki gibi birden çok sayıda (rampa, basamak ve sinüs) referans sinyali takibi gerçekleştirilmek istendiğinde PID denetleyicinin denetim performansı gerileyecektir. Bu noktada ise veriye dayalı bir yöntem olan pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyiciler potansiyel gösteren bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Pekiştirmeli öğrenmenin doğrusal olmayan farklı sistemlerdeki başarılı uygulamaları bu önermeyi destekler niteliktedir [17-19].

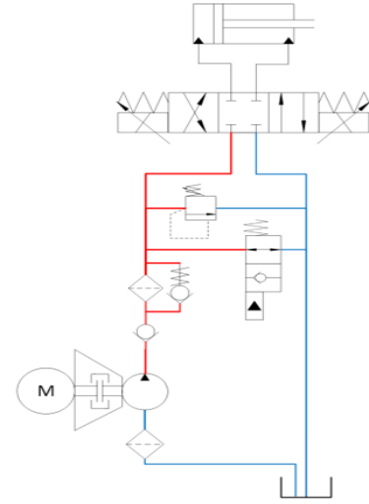
Yapılan bu çalışmada geleneksel bir EHS'nin konum denetimi benzetim ortamında pekiştirmeli öğrenme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürekli çözüm uzayına uygunluğu sebebiyle de pekiştirmeli öğrenme içerisinde yer alan derin deterministik politika gradyanı (DDPG) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu amaçla, öncelikle EHS'nin doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiştir. Sonrasında DDPG yönteminin hiper parametreleri model üzerinde yapılan öncül çalışmalarla belirlenmiştir. Belirlenen hiper parametreler kullanılarak DDPG denetleyicinin eğitimi çoklu konum referans sinyali kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DDPG denetleyicinin ortaya koyduğu performansı kıyaslayabilmek için aynı çalışma PID denetleyiciyle tekrarlanmıştır.

Çalışma giriş kısmıyla beraber beş kısım olarak planlanmıştır. Bu plana bağlı olarak, EHS'nin doğrusal olmayan modelinin eldesine ikinci kısımda değinilmiştir. Üçüncü kısımdaysa DDPG yöntemi anlatılarak çalışma için belirlenen hiper parametreler verilmiştir. DDPG ajanının eğitimi için yapılan çalışmalar ve gerçekleştirilen konum referans takibinin sonuçları ise dördüncü kısımda paylaşılmıştır. Son kısımda ise elde edilen sonuçlar

değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2 Elektrohidrolik sistem modeli

Bu çalışmada matematiksel modeli elde edilen EHS temel olarak sabit hızlı-sabit deplasmanlı dişli pompa, 4/3 oransal valf, diferansiyel hidrolik silindir ve diğer yardımcı elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 1). Pompadan gelen hidrolik akışkanın basıncı basınç emniyet valfi ile ayarlanmaktadır. Sonrasında akışkan oransal valf yardımıyla hidrolik silindirin 1 veya 2 nolu odasına yönlendirilerek pistonun uzama veya çekilme yönünde hareket etmesi sağlanmaktadır. Oransal valfin içerisinde yer alan makaranın (Ing. spool) konumuna bağlı olarak valf içerisindeki açıklıkların alanı değişmektedir. Böylelikle, hidrolik pistonun yönü ve hızı denetlenebilmektedir.



Şekil 1. 4/3 oransal valf ile sürülen geleneksel bir EHS'nin şematik gösterimi (Kırmızı = Yüksek basınç hattı, Mavi = Düşük basınç hattı)

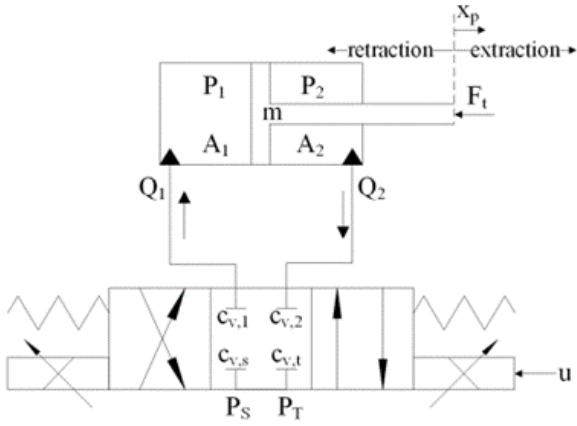
Çok karmaşık bir model ortaya çıkaracağı için EHS'nin eksiksiz bir matematiksel modelini elde etmek tercih edilen bir yaklaşım değildir. Buradaki amaç denetime etki eden baskın dinamiklerin modelde yer almasıdır. Bu nedenle modelleme öncesinde bazı ön kabullerde bulunmak yerinde bir yaklaşım olacaktır [20]. Bu bağlamda aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

-Hidrolik sıvının sıkıştırılabilirliği basınç ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmeksizin sabittir,

-Besleme basıncı bütün çalışmalar süresince sabittir ve herhangi bir dalgalanma göstermemektedir,

-Hidrolik akışkanın sıcaklığı ve viskozitesi çalışma süresince sabittir.

Şekil 1'de belirtilen geleneksel EHS bütün temel ekipmanları (aktarım hatları, filtre, yardımcı valfler) içermektedir. Bu ekipmanların matematiksel modele dahil edilmesi modelin doğruluğunu arttırsa dahi modellenen aynı oranda karmaşıklaştırmaktadır. Bu yüzden literatürde benimsenen yaklaşımdan yararlanarak EHS'nin matematiksel modeli Şekil 2'de verilen şematik temel alınarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Oransal valfle sürülen asimetrik hidrolik silindirin modelleme parametreleri

Newton'un 2.hareket denklemi kullanıldığında hidrolik silindir içerisindeki kuvvet dengesi Denklem (1)'deki gibi bulunur.

$$m\ddot{x}_p = P_1A_1 - P_2A_2 \quad (1)$$

Burada m [kg] piston kütlesi, \ddot{x}_p [m/s²] piston konumunun ikinci türevi, P_x [N/m²] hidrolik silindir x nolu bölgesindeki basınç ve A_x [m²] hidrolik pistonun x nolu bölgedeki efektif çalışma alanı olarak belirtilmiştir. Hidrolik silindire etkileyen basınç alanı herhangi bir iç ve dış kaçak olmadığı durum göz önünde bulundurulduğunda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{V_{01} + x_pA_1}{E} \dot{P}_1 = Q_1 - A_1\dot{x}_p \quad (2)$$

$$\frac{V_{02} - x_pA_2}{E} \dot{P}_2 = -Q_2 + A_2\dot{x}_p \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)'te V_{0x} [m³] hidrolik silindirin x nolu tarafındaki başlangıç hacmini, E [N/m²] hidrolik sıvının sıkıştırılabilirliğini (Bulk modülü) ve Q_x [m³/s] ise hidrolik silindirin x nolu tarafındaki debiyi göstermektedir.

Elektrohidrolik sistemin çalışma şartları göz önünde bulundurulurak $P_S > P_1 > P_T$, $P_S > P_2 > P_T$ ve $P_T = 0$ kabulleri yapılabilir. Buna ek olarak Şekil 2'de belirtilen $c_{v,\{s,t,1,2\}}$ terimlerinin birbiriyle aynı ve c_v 'ye eşit olduğu ifade edildiğinde hidrolik sıvı debisi aşağıdaki bağıntılar kullanılarak gösterilebilir.

$$Q_1 = c_v x_v [s_g(x_v)\sqrt{P_S - P_1} + s_g(-x_v)\sqrt{P_1}] \quad (4)$$

$$Q_2 = c_v x_v [s_g(x_v)\sqrt{P_2} + s_g(-x_v)\sqrt{P_S - P_2}] \quad (5)$$

Burada c_v [m³s⁻¹N^{-0.5}] valf portlarının akış katsayısını, x_v [m] valf sürgüsünün konumunu, P_S ve P_T ise sırasıyla besleme ve tank basınçlarını ifade etmektedir. Son olarak, s_g ise Denklem (4) ve (5)'te verilen debi yönünü düzenlemek

için kullanılan parçalı bir fonksiyon olup aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir.

$$s_g = \begin{cases} 0, & x \geq 0 \\ 1, & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Valf tepki süresinin elektrohidrolik sistemin genelinden çok daha düşük olması sebebiyle sistem modeline dinamik valf modeli dahil edilmemiştir [21]. Bunu yerine bir fonksiyon kullanılarak valf modellenmiştir.

$$x_v = k_v(u) \quad (7)$$

Denklem (7)'de k_v fonksiyonu u [V] denetim girdisini kullanarak valf sürgüsünün konumunu belirlemek için kullanılmaktadır. Çalışmada modellenen oransal valf kapalı merkezli ve üst üste binen (İng. overlap) sürgülüdür. Sürgü türünden dolayı meydana gelen ölü bölge denetim performansı üzerinde kötüleştirici bir etkiye sahiptir [22] ve önerilen denetim yönteminin bu süreksizliğin üstesinden gelmesi gerekmektedir.

Denklem (1), (2), (3), (4) ve (5) bir arada değerlendirildiğinde $x_1 \equiv x_p$, $x_2 \equiv \dot{x}_p$, $x_3 \equiv P_1$ ve $x_4 \equiv P_2$ olmak üzere elektrohidrolik sistemin uzay durum denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(x_3A_1 - x_4A_2) \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{V_{01} + x_1A_1}(Q_1(x_3) - A_1x_2) \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{V_{02} - x_1A_2}(-Q_2(x_4) + A_2x_2) \end{aligned} \quad (8)$$

Benzetim çalışması için elektrohidrolik sistemin durum uzay denklemleriyle beraber Tablo 1'de belirtilen parametreler kullanılmıştır.

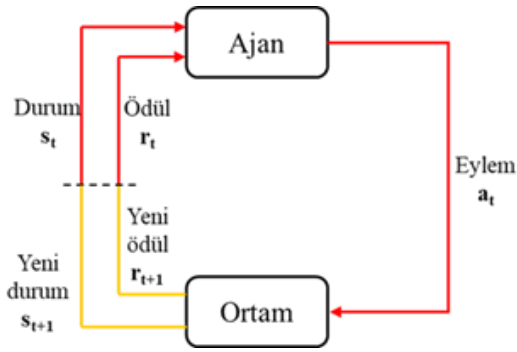
Tablo 1. Elektrohidrolik sistemin model parametreleri

Besleme basıncı, P_S	30 bar
Tank basıncı, P_T	0 bar
Sıkıştırılabilirlik modülü, E	1.5e ⁹ N/m ²
1 nolu bölgenin başlangıç basıncı, P_{01}	13.5 bar
2 nolu bölgenin başlangıç basıncı, P_{02}	18 bar
1 nolu bölgedeki efektif piston alanı, A_1	1256.64e ⁻⁶ m ²
2 nolu bölgedeki efektif piston alanı, A_2	942.48e ⁻⁶ m ²
1 nolu bölgenin başlangıç hacmi, V_{01}	6.594e ⁻⁵ m ³
2 nolu bölgenin başlangıç hacmi, V_{02}	6.594e ⁻⁵ m ³

3 Pekiştirmeli öğrenme

Makine öğrenmesi veya yapay öğrenme veriye dayalı olarak öğrenmeyi mümkün kılan algoritmalara verilen genel bir isimdir. Kendi içerisinde gözetimli (İng. supervised), gözetimsiz (İng. unsupervised) ve pekiştirmeli (İng. reinforcement) öğrenme gibi alt dallara ayrılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan pekiştirmeli öğrenme yöntemi ise ödül tabanlı öğrenme yapısı sayesinde denetim problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pekiştirmeli öğrenme temel olarak ortamdan alınan geri bildirimlere bağlı olarak çıktı oluşturan bir fonksiyonun veri kullanılarak eğitilmesini amaçlar. Yapısal olarak incelendiğinde ise 3 temel bileşenden meydana geldiği görülür: Ajan (*İng.* agent), durum (s_t , *İng.* state) ve ortam (*İng.* environment) [23]. Öğrenilen fonksiyon politika (μ , *İng.* policy) olarak adlandırılır. Politika gözlenen durum (s_t) karşısında uzun vadede en yüksek ödül (r_t , *İng.* reward) getirecek olan aksiyonun (a_t) seçilmesini sağlar [24]. Belirlenen politika tercih edilen pekiştirmeli öğrenme yöntemine göre stokastik veya deterministik olabilir. Pekiştirmeli öğrenmenin eğitilmesi için kullanılan genel yapının gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Pekiştirmeli öğrenme için kullanılan eğitim yapısı [24]

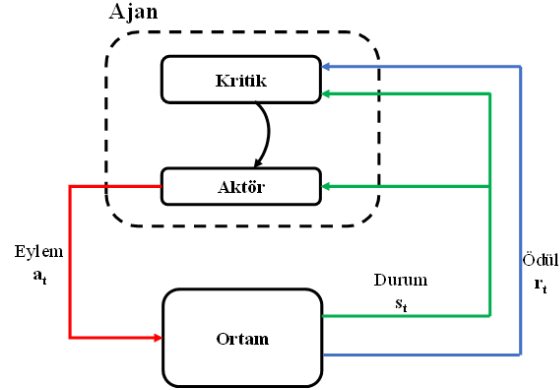
Pekiştirmeli öğrenme kendi içerisinde de sürekli (*İng.* continuous) ve süreksiz (*İng.* discrete) çözüm uzayı içeren sistemler için farklı algoritmalara sahiptir. Bu çalışmada modellenen EHS ± 10 aralığında süreklilik gösteren bir denetim sinyali ile denetlenmektedir. Bu nedenden dolayı sürekli çözüm uzayında etkinliği bilinen derin deterministik politika gradyanı algoritması EHS'nin denetimi için tercih edilmiştir.

3.1 Derin deterministik politika gradyanı

Derin deterministik politika gradyanı (Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG) temel olarak deterministik politika gradyanı (Deterministic Policy Gradient, DPG) ile derin Q-ağı (Deep Q-Network, DQN) yöntemlerinin birleşimidir ve aktör-kritik (*İng.* actor-critic) tabanlı yöntemler içerisinde yer alır [25]. Süreksiz aksiyon uzayında yüksek performans gösteren DQN'in sürekli aksiyon uzayını kapsayacak biçimde genişletilirken DPG kaynaklı kararsızlık sorunları giderilerek bu yöntem ortaya koyulmuştur. Yöntemin kararlı ve gürbüz olması için kendisini oluşturan iki yöntemin özelliklerinden (i) bellekten tekrarlamaya (*İng.* replay buffer) ve (ii) çıktı üreten ağıncı güncellenmesinin ikincil bir Q ağıncının kullanılması yaklaşımları korunmuştur [25]. Bellekten tekrarlamaya ile aktör ağıncının eğitim esnasında birbirini takip eden örneklemeleri kullanarak ezberleyici bir tutum sergilemesinin önüne geçilmiş ve ikincil bir ağıncı yardımıyla eğitimin hedeflenen doğrultuda yüksek değişimlerden etkilenmeden sürmesi sağlanmıştır.

DDPG'nin de içinde yer aldığı aktör – kritik yaklaşımı aktör yapay sinir ağıncının (YSA) durum karşısındaki

eyleminin (a_t) kritik YSA tarafından değerlendirilmesi üzerine kuruludur. Kritik YSA değerlendirme amacıyla ortamdan gelen durum (s_t) bilgisini ve gerçekleştirilen eylem sonucunda elde edilen ödül (r_t) sürekli olarak izler. Elde ettiği bilgileri kullanarak aktör YSA'nın başarımlarını hesaplar. Hesaplanan gradyan ve geri dağılım (*İng.* back-propagation) algoritmasıyla aktör YSA'nın ağırlık ve bias değerlerinin değişimi gerçekleştirilir. Aktör – kritik tabanlı pekiştirme öğrenme yöntemlerinin genel işleyişi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Aktör-kritik tabanlı pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin genel işleyişi [24]

DDPG yönteminde aktör – kritik yaklaşımı 2 yerine 4 farklı YSA ile sağlanmaktadır. Bunun nedeni ise aktör YSA'nın eğitiminde ana girdi olan gradyanın tutarlı bir şekilde hesaplanabilmesinin istenmesidir. Bu amaçla aktör ve kritik YSA'larla aynı ağırlık ve bias değerlerine sahip 2 adet YSA oluşturulur: Aktör hedef (*İng.* actor target) YSA ve kritik hedef (*İng.* critic target) YSA. Böylelikle, optimize edilen aktör ve kritik YSA'lar kendi başarımlarını ölçmek için kullanılmaz ve YSA'ların ani olarak değişmesinin önüne geçilmiş olur [25]. Belirlenen sıklıkla hedef YSA'ların ağırlıkları seçilen öğrenme oranı kullanılarak güncellenir. DDPG algoritmasının işleyişi Şekil 5'te verilmiştir.

DDPG için gerekli parametrelerinin belirlenmesi amacıyla benzer problemler incelenmiş ve elde edilen bilgiler başlangıç noktası olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak elde edilen DDPG hiper parametreleri Tablo 2'de ve görev başarımlarını ölçmek için geliştirilen ödül fonksiyonu Denklem (9)'da verilmiştir.

Tablo 2. DDPG hiper parametreleri.

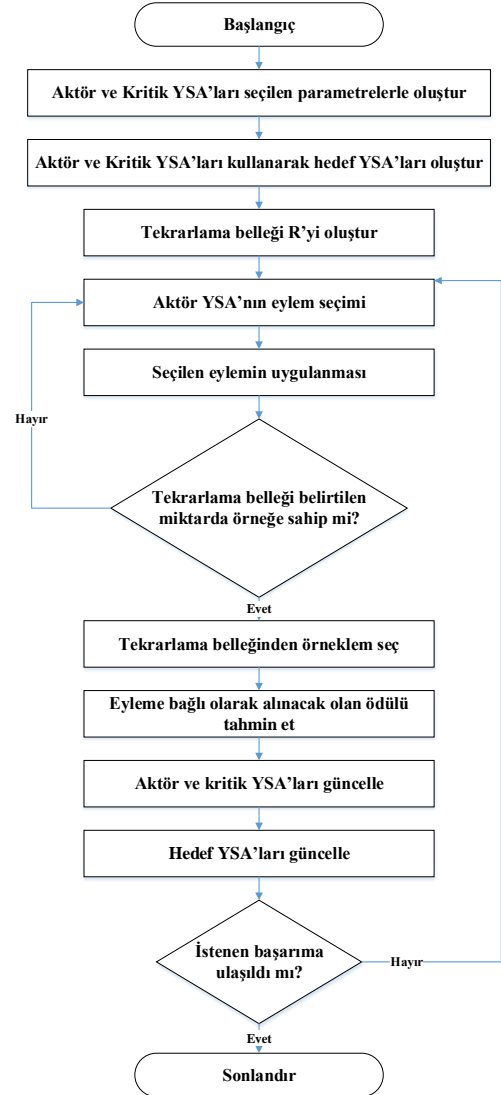
Hiper Parametre	Değer
Aktör YSA öğrenme oranı	1e-4
Kritik YSA öğrenme oranı	1e-3
Aktör YSA'nın örneklem zamanı	1e-2
Tekrarlamaya belleği boyutu	1e6
Mini örneklem yığıncı boyutu	128
İndirim oranı	0,99
Orstein-Uhlenbeck (O-U) gürültü varyansı	1e-2
O-U gürültü varyansı azalma oranı	1e-5

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \min\left(0, -\frac{d}{dt}|e(t)|\right) \\
 P_2 &= -20|e(t)| \\
 P_3 &= -\frac{3}{20}\left|\frac{d}{dt}u(t-1)\right| \\
 R_1 &= \frac{1}{(\max(0.2, |e(t)|))^2} \\
 R &= \sum (P_1 + P_2 + P_3 + R_1)
 \end{aligned} \quad (9)$$

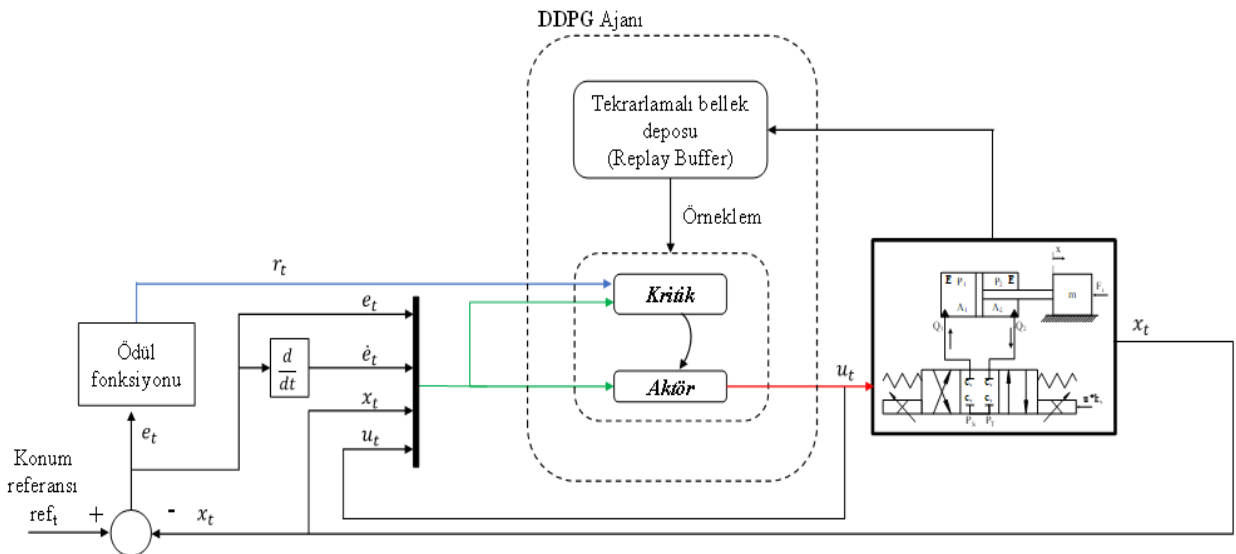
Gözlemlenerek eğitimde kullanmak üzere DDPG'ye beslenecek durum değerleri olarak ise konum takip hatası (e_t), konum takip hatasının türevi (\dot{e}_t), denetim sinyali (u_t) ve piston konumu (x_t) seçilmiştir (Şekil 6). Verilen bilgiler doğrultusunda oluşturulan aktör ve kritik yapay sinir ağları (YSA) Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

4 Benzetim çalışmaları

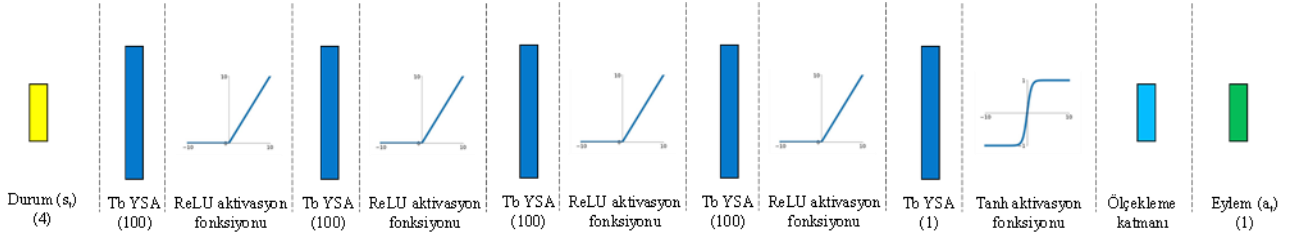
EHS'lere yönelik denetim çalışmaları incelendiğinde temel olarak tek bir referans sinyalinin kullanıldığı görülmektedir. Bunun nedeni ise EHS'lerin doğrusal olmayan yapısı itibarıyla denetleyicilerin her referans için ayrı ayrı tasarlanması gerekliliğidir. Bu çalışmada önerilen yöntem ise aynı anda farklı karakteristiklerdeki konum referans sinyallerini takip edebilecek potansiyele sahiptir. Bu sebeple hiper parametreleri ve YSA yapısı tanımlanan DDPG denetleyici rampa, sinüs ve basamak olmak üzere 3 farklı konum referans sinyalini takip etmesi için eğitilmiştir. Benzetim ortamında gerçekleştirilen eğitim için zaman adımı 0.01 s olarak seçilmiştir (Şekil 9). Şekil 9'da 180. bölüme kadar DDPG denetleyicinin aldığı ödülün aynı seviyede kaldığı görülmektedir. Sonrasında ise ödül istenen düzeye kadar yükselmektedir. 300. bölümden sonra ise DDPG denetleyici genel olarak birbirine yakın ödüller almayı başarmıştır. DDPG denetleyicinin eğitimi 527 bölüm ve 900000 adım sürmüştür.



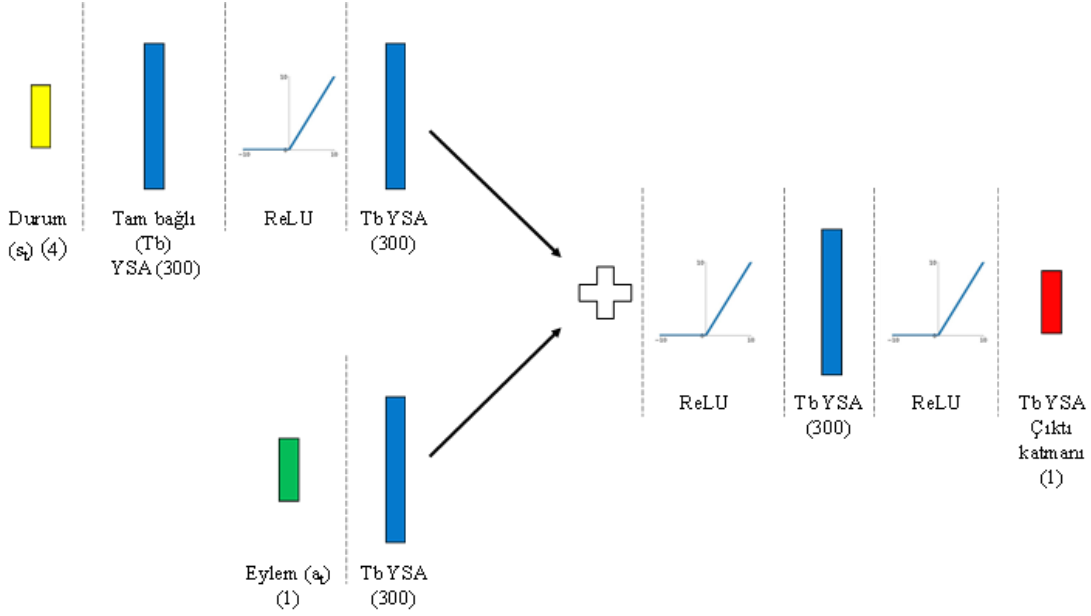
Şekil 5. DDPG yaklaşımının akış diyagramı [26]



Şekil 6. DDPG ile geleneksel hidrolik sistemin eğitiminde kullanılan benzetim ortamı. Kırmızı çizgi ajanın ürettiği eylemi, mavi çizgi eylem sonucunda alınan ödülü ve yeşil çizgi ise DDPG içindeki aktör – kritik YSA'larına iletilen durum verisini göstermektedir



Şekil 7. Aktör YSA olarak kullanılan ağ yapısı

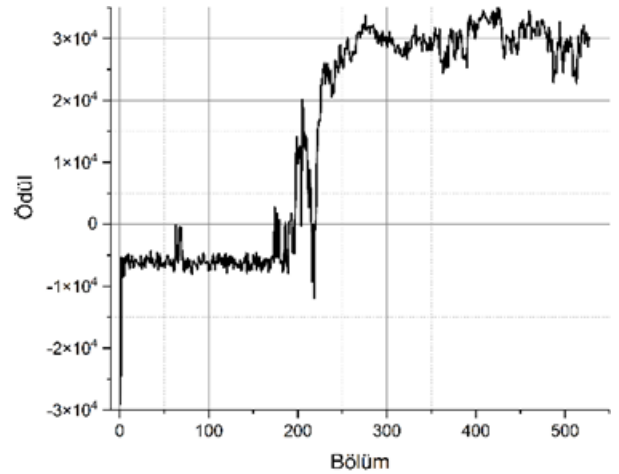


Şekil 8. Kritik YSA olarak kullanılan ağ yapısı

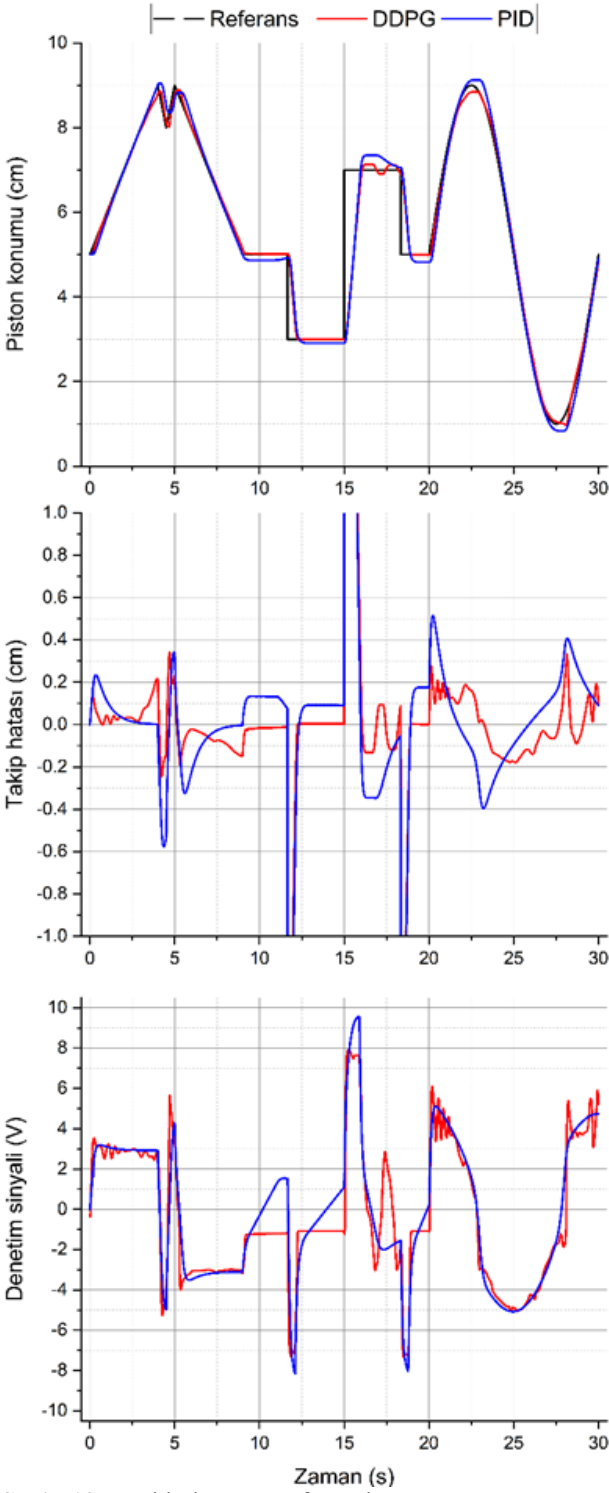
Bu çalışmada denetim performansı sunulan denetleyici eğitim süresince en başarılı takip performansının sergilendiği 400-425 bölümleri arasındaki kısımdan seçilmiştir. Buna ek olarak Ziegler-Nichols yöntemi ile parametreleri belirlenmiş bir PID denetleyici de DDPG denetleyici ile kıyaslamak için kullanılmıştır. Ziegler-Nichols ile belirlenen PID denetleyici parametreleri denetim çıktısının ± 10 V sınırları içerisinde kalmasını sağlayacak biçimde düzenlendiğinde $P = 10.2$, $I = 11.8$ ve $D = 0.8$ denetleyici parametrelerine ulaşılmıştır.

DDPG ve PID denetleyicilerle gerçekleştirilen konum takip çalışmasından elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. DDPG denetleyici rampa konum referansı ($t = 0-9$ s) takibinde PID denetleyiciden daha iyi performans göstermiştir. Her iki denetleyicinin rampa sinyalinin yön değiştirdiği ($t = 4.5 - 5.5$ s) kısımlardaki takip hatası incelendiğinde bu durum daha belirginleşmektedir. PID denetleyicinin takip hatası ± 0.6 cm seviyesindeyken DDPG denetleyici hatayı ± 0.2 cm civarında tutmayı başarmıştır. DDPG denetleyici başarımını basamak konum referansı ($t = 9-20$ s) takibinde de sürdürmektedir. PID denetleyici basamak sinyali takibinde kararlı hal hatası (> 0.1 cm) ve aşma sorunları sergilerken DDPG denetleyici kararlı hal hatasını (< 0.02 cm) ortadan kaldırmaktadır. PID denetleyiciyle %12.5 aşma meydana gelen kısımda ise DDPG denetleyici aşmayı %2.5 seviyesine indirmektedir. Benzer yaklaşımla denetleyicilerin sinüs konum sinyali ($t =$

20-30 s) takip performansı incelendiğinde, önceki sonuçlarla uyumlu olarak, DDPG denetleyici öne çıkmaktadır. Yapısı itibarıyla sinüs sinyalinin eğimi sürekli değişmektedir. DDPG denetleyici bu değişime uyum sağlayarak takip hatasını çoğunlukla ± 0.2 cm aralığında tutmaktadır. PID denetleyicinin takip performansı incelendiğinde ise takip hatası bandının ± 0.4 cm'e genişlediği görülmektedir.



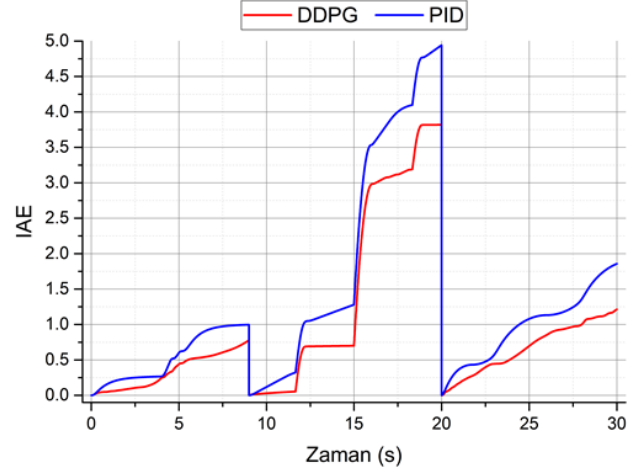
Şekil 9. DDPG denetleyicinin eğitim sürecindeki başarımı aldığı ödülle birlikte artmaktadır



Şekil 10. Farklı konum referanslarının DDPG ve PID denetleyiciler ile takibi

Denetleyicilerin performansının hatanın mutlak değer toplamına (IAE, integral absolute error) göre karşılaştırması Şekil 11’de verilmiştir. IAE değeri her referans sinyali değişiminde sıfırlanmıştır. Bu bağlamda, 0-9 saniye aralığında rampa, 9-20 saniye aralığında basamak ve 20-30 saniye aralığında ise sinüs konum referans sinyallerine ait IAE değerleri zamana bağlı olarak çizilmiştir. İlgili sayısal değerler Tablo 3’te de ifade edilmiştir. Bu bağlamda,

geliştirilen DDPG denetleyicinin IAE performans kriterine göre PID denetleyiciden rampa sinyal takibinde %22.17, basamak sinyal takibinde %22.74 ve son olarak sinüs sinyal takibinde %34.68 daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 11. DDPG ve PID denetleyicilerin konum referans sinyali takibinin IAE performans kriterine göre değerlendirilmesi

Tablo 3. IAE performans kriterine göre DDPG ve PID denetleyicilerin konum takibi performansı

	DDPG	PID	%
Rampa	0.776	0.997	22.17
Basamak	3.818	4.942	22.74
Sinüs	1.213	1.857	34.68
Toplam	5.807	7.796	25.51

5 Sonuçlar

EHS’nin konum denetim için gerçekleştirilen bu çalışmada rampa, basamak ve sinüs olmak üzere 3 farklı konum referans sinyalinin takibi bir pekiştirmeli öğrenme yöntemi olan DDPG ile gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için Ziegler-Nichols yöntemiyle parametreleri belirlenmiş PID denetleyici de çalışmaya dahil edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kısa sayılabilecek bir eğitime rağmen, DDPG denetleyicinin belirlenen bütün konum referanslarının takibinde PID denetleyiciden genel olarak daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. DDPG denetleyici doğrusal olmayan yapısı ve modellenen sistemin dinamiklerini öğrenebilmesi sayesinde bu performansa ulaşabilmiştir.

Bu çalışmada DDPG denetleyicinin sistem parametrelerinin değişimine ve sensor gürültüsüne karşı dayanımı göz ardı edilmiştir. İlerleyen çalışmalarda bu hususlar üzerine yoğunlaşarak kısa sürede sonuç verebilen YSA yapısı ve ödül fonksiyonun geliştirilmesi planlanmaktadır. Diğer bir husus ise DDPG denetleyicinin etkinliğinin deneysel olarak gözlenmesidir. Benzetim çalışması için geliştirilen EHS modeli baskın sistem dinamiklerini yansıtabilmede fakat deneysel sistemde yer alan bütün etkileri aktarmakta eksik kalabilmektedir. Önerilen DDPG denetleyicinin deneysel olarak sınanması yöntemin yetkinliğiyle ilgili daha kapsamlı bilgiler

verecektir. Son olarak pekiştirmeli öğrenme tabanlı denetleyicilerin üstünlüğü sistem modeline ihtiyaç duymadan sadece veri tabanlı olarak çalışabilmesidir. Bu durum ise pekiştirme öğrenme tabanlı denetleyicilerin deneysel olarak eğitimini mümkün kılmaktadır. İlerleyen çalışmalarda DDPG denetleyicinin gerçek zamanlı olarak eğitilmesi bu yöntemin pratik ve hızlı bir biçimde sahadaki uygulamalarda kullanımının önünü açabilecek potansiyele sahiptir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] J. Činkelj, R. Kamnik, P. Čepon, M. Mihelj and M. Munih, Closed-loop control of hydraulic telescopic handler. *Automation in Construction*, 19, 954–963, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.012>
- [2] M. Borghi, B. Zardin, F. Pintore and F. Belluzzi, Energy savings in the hydraulic circuit of agricultural tractors. *Energy Procedia*, Elsevier B.V. 45, 352–361, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.038>
- [3] T. Boaventura, J. Buchli, C. Semini and D.G. Caldwell, Model-Based hydraulic impedance control for dynamic robots. *IEEE Transactions on Robotics*, IEEE. 31, 1324–1336, 2015. <https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2482061>
- [4] A. Bayrak, E. Tatlicioglu and E. Zergeroglu, Backstepping control of electro-hydraulic arm. 2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018, IEEE. pp. 1-4, 2018. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751833>
- [5] D. Janosevic, R. Mitrev, B. Andjelkovic, and P. Petrov, Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 13, 926–942, 2012. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1100318>
- [6] M. Heikkilä and M. Linjama, Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system. *Mechatronics*, 23, 452–461, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.03.009>
- [7] M. Jelali and A. Kroll, *Hydraulic Servo-systems*. Springer London, London. 2003. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0099-7>
- [8] M. Fallahi, M. Zareinejad, K. Baghestan, A. Tivay, S.M. Rezaei and A. Abdullah, Precise position control of an electro-hydraulic servo system via robust linear approximation. *ISA Transactions*, Elsevier Ltd. 80, 503–512, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.06.002>
- [9] C. Onat, M. Daskin and A. Turan, Gain scheduling linear model of an electro-hydraulic actuator. *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 7, 301–306, 2017. <https://doi.org/10.11121/ijocta.01.2017.00487>
- [10] E. Kolsi-Gdoura, M. Feki and N. Derbel, Sliding mode-based robust position control of an electrohydraulic system. 10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13), IEEE. pp. 1–5 2013. <https://doi.org/10.1109/SSD.2013.6564127>
- [11] E. Kolsi Gdoura, M. Feki and N. Derbel, Sliding mode control of a hydraulic servo system position using adaptive sliding surface and adaptive gain. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 23, 248–259, 2015. <https://doi.org/10.1504/IJMIC.2015.069946>
- [12] B. Shaer, J.-P. Kenné, C. Kaddissi and C. Fallaha, A chattering-free fuzzy hybrid sliding mode control of an electrohydraulic active suspension. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40, 222–238, 2018. <https://doi.org/10.1177/0142331216652468>
- [13] M. Kalyoncu and M. Haydim, Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage. *Mechatronics*, Elsevier Ltd. 19, 847–858, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.04.010>
- [14] L. Yu, L. Ding, F. Yu, J. Zheng and Y. Tian, Force tracking control for electrohydraulic servo system based on adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) controller. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 14, 1–16, 2021. <https://doi.org/10.1108/IJICC-09-2020-0132>
- [15] Y.J. Liu, Y.D. Xie and H. Wang, Fuzzy PID control for valve-controlled cylinder hydraulic system. *Applied Mechanics and Materials*, 212–213, 1244–1248, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.212-213.1244>
- [16] B.K. Sarkar, P. Mandal, R. Saha, S. Mookherjee and D. Sanyal, GA-optimized feedforward-PID tracking control for a rugged electrohydraulic system design. *ISA Transactions*, Elsevier. 52, 853–861, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.07.008>
- [17] A. Rodriguez-Ramos, C. Sampedro, H. Bavle, P. de la Puente and P. Campoy, A Deep Reinforcement Learning Strategy for UAV Autonomous Landing on a Moving Platform. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93, 351–366, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0891-8>
- [18] X. Wu, S. Liu, T. Zhang, L. Yang, Y. Li and T. Wang, Motion Control for Biped Robot via DDPG-based Deep Reinforcement Learning. 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation, WRC SARA 2018 - Proceeding, IEEE. 40–45, 2018. <https://doi.org/10.1109/WRC-SARA.2018.8584227>
- [19] Y. Hou, L. Liu, Q. Wei, X. Xu and C. Chen, A novel DDPG method with prioritized experience replay. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017, 2017-Janua, pp. 316–321, 2017. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122622>
- [20] P. Wos and R. Dindorf, Modeling and Analysis of the Hydraulic Servo Drive System. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer International Publishing, 253-262 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26886-6>

- [21] L. Lu and B. Yao, Energy-saving adaptive robust control of a hydraulic manipulator using five cartridge valves with an accumulator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61, 7046–7054, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2314054>
- [22] U. Pinoson, T. Hwang, S. Cetinkunt, R. Ingram, Q. Zhang, M. Cobo, D. Koehler and R. Ottman, Hydraulic actuator control with open-centre electrohydraulic valve using a cerebellar model articulation controller neural network algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 213, 33–48, 1999. <https://doi.org/10.1243/0959651991540368>
- [23] S. Armoogum and X. Li, Big Data Analytics and Deep Learning in Bioinformatics With Hadoop. *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems*, Elsevier. pp. 17–36 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816718-2.00009-9>
- [24] R.S. Sutton and A.G. Barto, *Reinforcement Learning: An Introduction*. The MIT Press, London, 2018.
- [25] T.P. Lillicrap, J.J. Hunt, A. Pritzel, N. Heess, T. Erez, Y. Tassa, D. Silver and D. Wierstra, Continuous control with deep reinforcement learning. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1509.02971>
- [26] S. Guo, X. Zhang, Y. Zheng and Y. Du, An autonomous path planning model for unmanned ships based on deep reinforcement learning. *Sensors (Switzerland)*, 20, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20020426>





Katı oksit yakıt pillerinde elektrolit-elektrot arayüzey iyileştirilmesi

Enhancement of electrolyte-electrode interfaces in solid oxide fuel cells

Çiğdem Timurkutluk^{1,2*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Enerji Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, 51240, Niğde, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Prof. Dr. T. Nejat Veziroğlu Temiz Enerji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 51240, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışmada şerit döküm yöntemi ile imal edilen katı oksit yakıt pili (KOYP) elektrolit tabakaları metal bir elek ile birlikte farklı izostatik pres basınçları (10-60 MPa) altında preslenerek elektrolit üzerinde yüzey desenleri oluşturulmuştur. İzostatik pres basıncının etkileri; profilometre, performans, empedans ve mikroskop analizleri ile incelenmiştir. Elektrokimyasal ölçümler desenli elektrolite sahip bütün hücrelerin referans hücreden daha yüksek bir performans ortaya koyduğunu göstermiştir. Gerçekleştirilen analizler hücre performansındaki iyileşmenin desenleme ile artan elektrolit-elektrot arayüzey alanlarının yanı sıra lokal olarak azalan elektrolit kalınlığının da bir sonucu olduğunu ortaya çıkarmıştır. 0.373 W/cm² ile en yüksek performansı ise 30 MPa basınçta preslenen desenli elektrolite sahip hücre sergilemiştir. Referans hücre için bu değer 0.320 W/cm² olarak ölçülmüştür. Daha yüksek pres basınçlarında ise artan desen derinliğine bağlı olarak özellikle katot bölgesinde elektrolite kadar uzanan çatlaklar tespit edilmiştir. Bu çatlaklar, arayüzey alanındaki artışla artması beklenen elektrokimyasal reaksiyon bölgelerindeki iyileşmeyi sınırlayarak performans kayıplarına neden olmuştur.

Anahtar kelimeler: Katı oksit yakıt pili, Elektrolit-elektrot arayüzey, Yüzey desenleme

1 Giriş

Membran elektrot grubu (MEG) olarak adlandırılan ve yoğun bir katı elektrolitin farklı iki yüzeyine kaplanmış gözenekli anot ve katot elektrotlarından oluşan bu yapı KOYP sisteminin elektrik üreten birimidir. Elektrokimyasal reaksiyonlar ise katalizör, elektrolit ve gaz fazlarının bir arada bulunduğu sınırlarda gerçekleşmektedir. Üçlü faz sınırları (ÜFS) olarak bilinen bu bölgelerin sayısı ve uzunluğu hücre performansı ile doğrudan ilişkili olduğundan ÜFS yoğunluğunun artırılması adına anot ve katot elektrotları; bir miktar elektrolit malzemesinin ilgili katalizörle karıştırılması yolu ile üretilmektedir. Bu yaklaşım elektrokimyasal reaksiyonların bütün anot ve katot hacminde gerçekleşebilmesinin önünü açsa da literatürde yer alan bilimsel çalışmalar söz konusu reaksiyonların esasında elektrolit-elektrot arayüzeyleri yakınlarında meydana geldiğini ortaya koymuştur [1-5]. Bu nedenle KOYP performansı açısından bu arayüzeyler kritik bir öneme sahip

Abstract

In this study, solid oxide fuel cell (SOFC) electrolyte layers produced by tape casting method are pressed together with a metal mesh under different isostatic press pressures (10-60 MPa) to form surface patterns on the electrolyte. Effects of isostatic press pressure are investigated via profilometer, performance, impedance and microscopic analyses. Electrochemical measurements show that all cells with patterned electrolyte outperform the reference cell. The analyzes performed reveal that the improvement in cell performance is a result of the locally reduced electrolyte thickness as well as the increased electrolyte-electrode interface areas with surface patterning. The cell with patterned electrolyte pressed at 30 MPa pressure shows the highest peak performance of 0.373 W/cm². For the reference cell, this value is measured as 0.320 W/cm². At higher pressing pressures, cracks extending to the electrolyte are detected, especially in the cathode region, depending on the increased pattern depth. These cracks cause performance losses by limiting the improvement in the electrochemical reaction zones, which are expected to increase with the increase in the interfacial areas.

Keywords: Solid oxide fuel cells, Electrolyte-electrode interface, Surface patterning

olmaktadır. Bu kapsamda KOYP elektrolit-elektrot arayüzeylerinin yüzey alanlarının artırılması ve bu sayede ÜFS yoğunluğunun ve dolayısı ile KOYP performansının iyileştirilmesi literatürde birçok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmalarda elektrolit veya anot yüzeylerinin farklı tekniklerle modifiye edildiği dikkat çekmektedir.

Elektrolit yüzey desenlenmesinin ele alındığı çalışmalar arasında Dai vd. [6] sentezledikleri itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) tozlarını kullanarak toz presleme yöntemi ile YSZ elektrolit destekler üretmiştir. 1450 °C sıcaklıkta 2 saatlik bir sinterlemenin ardından 20 mm çapa ve 1 mm kalınlığa sahip bu desteklerin yüzeylerine hazırlanan bir YSZ çözümü kullanılarak sprey yöntemi ile çukurlu bir YSZ tabakası biriktirilmiştir. Elektrokimyasal performans ölçümleri, modifiye edilmiş YSZ elektrolit desteğe sahip hücrelerin geleneksel olanlara kıyasla üç katından daha büyük bir maksimum güç yoğunlukları sergileyebileceğini ortaya koymuştur. Elde edilen yüksek

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cigdemtimurkutluk@ohu.edu.tr (Ç. Timurkutluk)
Geliş / Recieved: 13.09.2022 Kabul / Accepted: 19.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1174595

hücre performansı elektrot ve elektrolit arasındaki arayüzey alanlarındaki genişlemeyle artan ÜFS ile açıklanmıştır. Benzer bir çalışmada Wang vd. [7] üretimi tamamlanmış düz YSZ elektrolitin bir yüzeyine alev püskürtme tekniği ile YSZ parçacıkları biriktirmiştir. Bu yüzeyin katot ile kaplandığı hücrenin performansı düz elektrolitli olan referans hücre ile karşılaştırılmış ve katot polarizasyon direncinde %43'e varan iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yine elektrolitin etkin yüzey alanının iyileştirilmesine bağlı olarak artan ÜFS'ye dayandırılmıştır. Bir başka elektrolit-katod arayüzey modifikasyonu çalışmasında Lee vd. [8] litografi yöntemi yardımı ile YSZ elektrolitin bir yüzeyinde piramit, çizgi ve prizma desenleri oluşturmuştur. Gerçekleştirilen testler, çizgi desenli elektrolit içeren hücrenin en yüksek performansı sergilediğini gösterirken bu performansın referans hücrenin iki katından daha büyük olduğu dikkat çekmektedir. Xu vd. [9] ve Tsumori vd. [10] ise KOYP elektrolit üzerinde benzer mikro ölçekli desenlerin mikro toz baskı yöntemi ile de üretilebileceğini rapor etmiştir. Kum püskürtme [11, 12], mürekkep püskürtmeli baskı [13, 14], lazer işleme [15] ve spin kaplama [16] artırılmış yüzey alanına sahip KOYP elektrolit üretimi için literatürde kullanılan diğer yöntemler olarak dikkat çekmektedir.

KOYP anot yüzey modifikasyonuna odaklanan çalışmalar arasında Seo vd. [17] toz presleme yöntemi ile imal ettikleri NiO-YSZ anot destek üzerine eklemeli imalat yolu ile oluklu bir NiO-YSZ tabakası oluşturmuştur. Daha sonra bu tabakanın elektrolit ve katotla kaplanması sonucunda üretilen hücre test edilmiş ve düz anot destek içeren hücreye göre yaklaşık %40 daha yüksek bir performans sergilediği bulunmuştur. Empedans ölçümleri artan hücre performansının %13,5 civarında genişletilen elektrolit-elektrot arayüzey alanının bir sonucu olarak azalan ohmik ve aktivasyon dirençlerinden kaynaklandığını göstermiştir. Zhang vd. [18] şerit döküm ile imal edilen NiO-YSZ anot destek yüzeyini lazer işleme ile pürüzlendirmiştir. Lazer gücü ile farklı derecelerde yüzey pürüzlülüğü kazandırılmış anot destek içeren hücrelerin performansının pürüzlülükle arttığı belirlenmiş ve elde edilen en yüksek pürüzlülükteki performans iyileşmesinin 800 °C çalışma sıcaklığında %47 olduğu görülmüştür. Aynı metotla anot destek üzerinde çukurlar da oluşturulmuş olup bu destek kullanılarak üretilen hücre performansındaki artışın ise yine 800 °C çalışma sıcaklığında %55 olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer bir çalışmada Jang vd. [19] NiO-GDC (gadolinium katkılanmış seryum oksit) anot işlevsel tabaka yüzey pürüzlendirilmesine odaklanmıştır. CeO₂-GDC anot destek üzerine daldırma kaplama yöntemi ile kaplanan işlevsel tabakadaki pürüzlülük, 10 µm'den daha büyük karbon partiküllerin ilgili solüsyona eklenmesi ile elde edilmiştir. Performans ölçümleri, pürüzlü anot işlevsel tabaka içeren hücrenin referans hücrenin yaklaşık iki katı kadar bir güç yoğunluğu üretebildiğine işaret etmiştir. Elde edilen yüksek performans elektrolit ve anot işlevsel tabaka kontak alanındaki artışla açıklanmıştır.

Yukarıda özetlendiği gibi literatürde yer alan KOYP elektrolit-elektrot arayüzey iyileştirilmesi konulu çalışmalarda gerçekleştirilen yüzey modifikasyonları, anot veya elektrolit üretiminin ardından ek bir ekipman / cihaz /

proses ile sağlanmaktadır. Bu durum ekstra zaman ve maliyeti de beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada ise şerit döküm ile imal edilmiş elektrolit yüzeyi piyasadan kolayca temin edilebilecek metal bir elek ile zaten üretim için gerekli aşamalardan biri olan laminasyon esnasında desenlendirilmiştir. Bu kapsamda izostatik pres için basınç değerlerinin desen oluşumu ve hücre performansına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Elektrolit destek üretimi ve desenlendirilmesi

Bu çalışmada elektrolit malzemesi olarak literatürde de sıklıkla kullanılan YSZ ((Y₂O₃)_{0,08}(ZrO₂)_{0,92}) seçilmiştir. Elektrolit destekler, şerit döküm yöntemi ile üretilmiş olup bu amaçla öncelikle uygun bir döküm solüsyonu hazırlanmıştır. Satın alınan YSZ tozlarına (Tosoh, Tokyo, Japonya) uygun miktarda ayırıcı (balık yağı, Sigma-Aldrich, Münih, Almanya) ve çözücü (etanol ve metil etil keton karışımı, Sigma-Aldrich) eklenmiştir. Yüksek yoğunluklu polietilen şişeler içerisinde zirkonyum bilyeler eşliğinde 24 saatlik bir bilyeli değirmen uygulamasının ardından karışıma belli miktarlarda bağlayıcı (Butvar, Sigma-Aldrich) ve plastikleştirici (PEG, Sigma-Aldrich) ilave edilmiştir. İkinci kez 24 saat boyunca bilyeli değirmene maruz bırakılan karışım daha sonra manyetik karıştırıcıya aktarılarak döküm için istenilen viskoziteye getirilmiştir. Hazırlanan elektrolit bulamacı bir şerit döküm cihazı yardımı ile 190 µm bıçak aralığında Mylar tabaka üzerine dökülmüş ve oda koşullarında 30 dakika boyunca kurutulmuştur. Yaklaşık 40 µm kalınlığındaki kurutulmuş YSZ şeritleri bir maket bıçağı yardımı ile istenilen boyutlarda kesilerek spatül kullanılarak Mylar film üzerinden alınmıştır. Referans hücrede elektrolit destek olarak kullanılmak üzere; elde edilen 8 adet elektrolit film üst üste konulmuş ve tek eksenli bir pres cihazında 20 MPa basınç altında 4 dakika boyunca preslenmiştir. Laminasyon işlemi, 50 MPa basınç ve 50 °C sıcaklıkta 4 dakika boyunca gerçekleştirilen izostatik presleme ile tamamlanmıştır. Laminasyon sonrasında elektrolit destekler bir lazer kesme cihazı yardımı ile 30 mm çapında diskler halinde kesilmiştir.

Desenli elektrolitlerin üretiminde ise 8 adet YSZ elektrolit şeritlerinin üzerine izostatik presleme adımıyla metal bir örgü elek (tel çapı: 0,575 mm, elek aralığı: 2 mm x 2 mm, Magnex, Japonya) yerleştirilmiştir. İzostatik pres basıncının desenleme ve hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi adına farklı basınçlarda (10-60 MPa) preslenmiş desenli elektrolit destekler imal edilmiştir. Pres sıcaklık ve süresi ise düz elektrolite benzer şekilde sırası ile 50 °C ve 4 dakika olarak sabit tutulmuştur. Gerek düz gerekse de desenli elektrolit desteklerin sinterlenmesi 1400 °C sıcaklıkta 5 saat bekletme ile sağlanmıştır. Farklı basınçlar altında desenlenen elektrolit destekler, bu basınçlara uygun olarak E10-E60 olarak adlandırılmıştır.

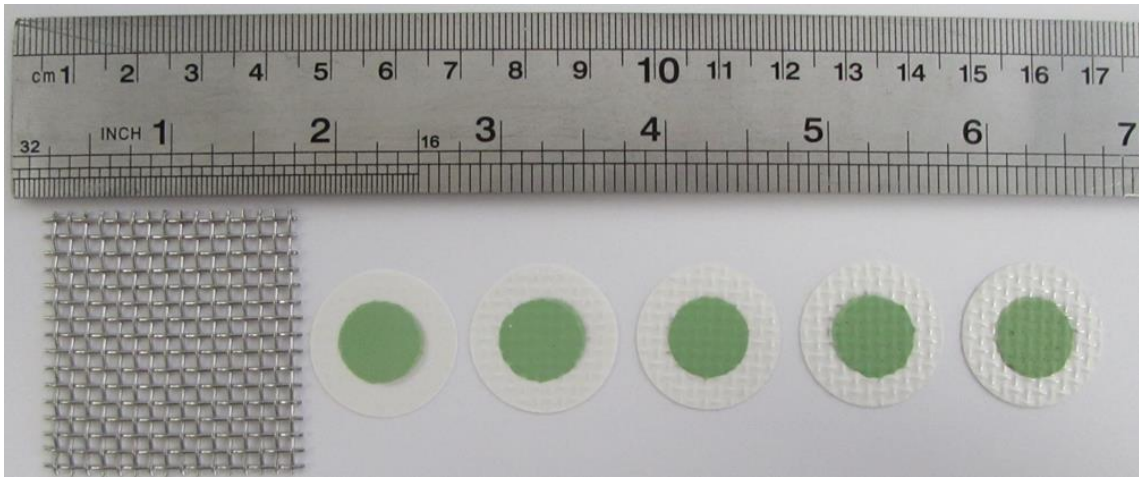
2.2 MEG ve hücre imalatı

Hazırlanan desenli ve referans elektrolit destekler üzerine her ikisi de işlevsel ve akım toplayıcı olmak üzere iki tabakadan oluşan anot ve katot elektrotları ipek baskı tekniği ile kaplanarak KOYP MEG'ler üretilmiştir. Anot işlevsel

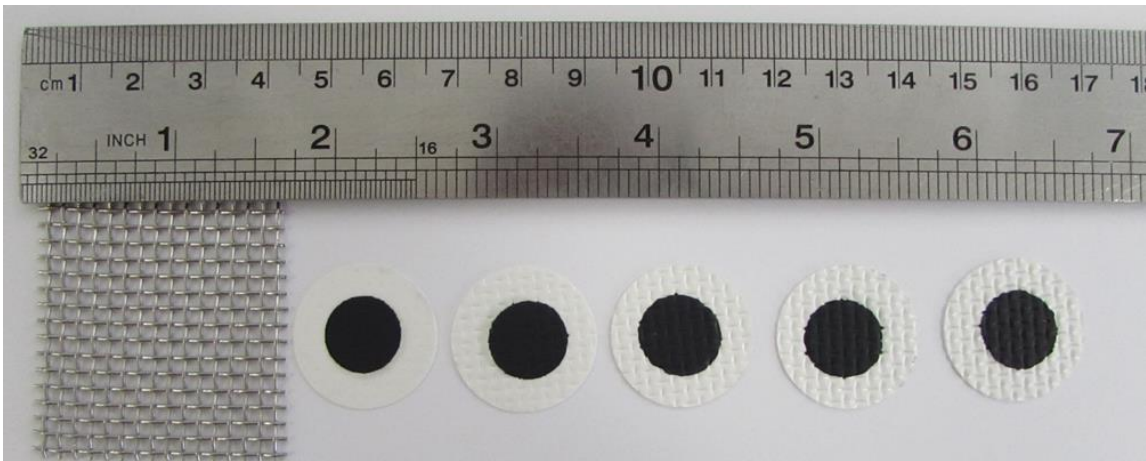
tabaka olarak ağırlıkça eşit oranda NiO (NiO-F, Novamet, New Jersey, ABD) ve YSZ tozları tartılarak etil selüloz bağlayıcı ve terpineol (her ikisi de Sigma-Aldrich) çözücü ile karıştırılmıştır. 18 saat bilyeli değirmende karıştırılan solüsyon daha sonra üç milli değirmenden geçirilerek homojenize edilmiştir. Elde edilen anot işlevsel tabaka ipek baskı pastası elektrolit desteklerin elek konulmamış yüzeylerine bir ipek baskı cihazı yardımı ile kaplanmıştır. 100 °C sıcaklıkta kurutulan anot işlevsel tabaka üzerine benzer şekilde hazırlanan NiO-YSZ (kütlece %80-%20) anot akım toplayıcı tabaka ipek baskı yöntemi ile uygulanmıştır. Her iki anot tabakası daha sonra 1250 °C sıcaklıkta 3 saat boyunca sinterlenmiştir. Anot tabakalarına benzer şekilde LSM($[La_{0.80}Sr_{0.20}]_{0.95}MnO_{3-x}$, Nexceris, Ohio, ABD)-YSZ (kütlece %50-%50) katot işlevsel ve LSM-YSZ (kütlece %90-%10) katot akım toplayıcı tabakalar sırası ile elektrolitin elek preslenmiş yüzeyine ipek baskı tekniği ile kaplanmıştır. Katot tabakalarının sinterlenmesi 1050 °C sıcaklıkta 2.5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Deneysel hataları en aza indirmek adına bütün elektrolitler aynı anot ve katot pasta ile kaplanmış olup kaplamalarda aynı miktarda pasta kullanılmıştır. MEG'lerin aktif alanı 1 cm² olarak ayarlanmıştır. Elektrolit desteklere uygun şekilde desenli elektrolite sahip MEG'ler, M10-M60 olarak adlandırılmıştır.

2.3 Test ve karakterizasyon

E10-E60 elektrolit desteklerin 10 mm x 10 mm alanındaki yüzeyleri bir profilometre (Bruker Nano Surfaces Dektak XT, Santa Barbara, ABD) yardımı ile taranmış ve yüzey özellikleri belirlenmiştir. MEG'lerin genel yapıları bir stereoskopik mikroskop (Leica EZ4 W, Leica Microsystems, Almanya) ile detaylı bir şekilde belirlenirken MEG performansları 0.3 NL/dak hidrojen ve 0.6 NL/dak hava altında 800 °C sıcaklığındaki bir test fırınında ölçülmüştür. Performans ölçümlerinde referans MEG ve M10-M60, üzerlerinde akış kanalları bulunan Crofer 22 APU'dan (ThyssenKrupp, Germany) imal edilmiş iki son plaka arasına yerleştirilmiştir. Crofer elek (tel çapı: 0.2 mm, kalınlık: 50 (tabaka/inç), Magnex, Japonya) ve gözenekli nikel (%50 gözeneklilik, Magnex, Japonya) sırası ile katot ve anot akım toplayıcı elek olarak kullanılmış olup sızdırmazlık Thermiculite (Flexitallic, Cleckheaton, Birleşik Krallık) ile sağlanmıştır. Elektrolit desteklere uygun şekilde desenli elektrolite sahip hücreler H10-H60, desensiz elektrolit içeren hücre ise referans hücre olarak adlandırılmıştır. Performans ölçümlerini takiben hücrelerin empedans dataları da açık devre altında 0.1 Hz ile 250 kHz arasındaki frekanslarda elde edilmiştir.



(a)

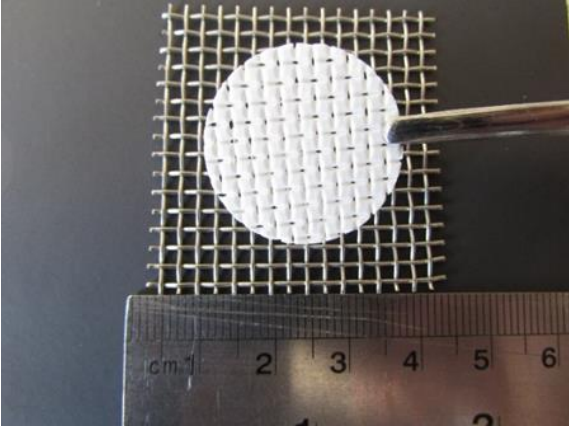


(b)

Şekil 1. Desenli elektrolit içeren MEG'lerin anot (üst) ve katot (alt) yüzey fotoğrafları (soldan sağa M10-50)

3 Bulgular ve tartışma

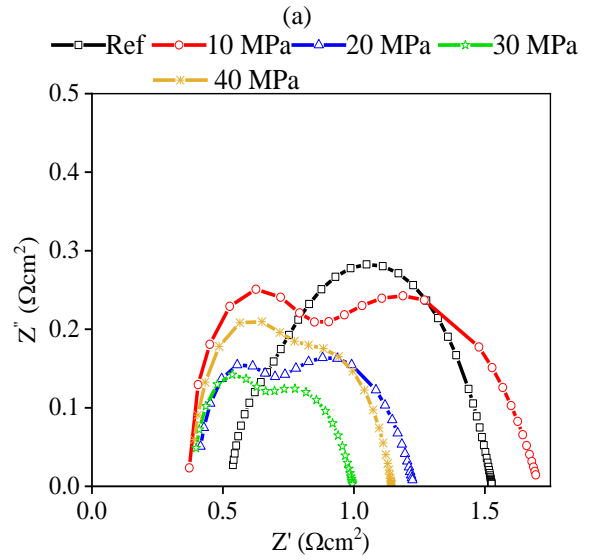
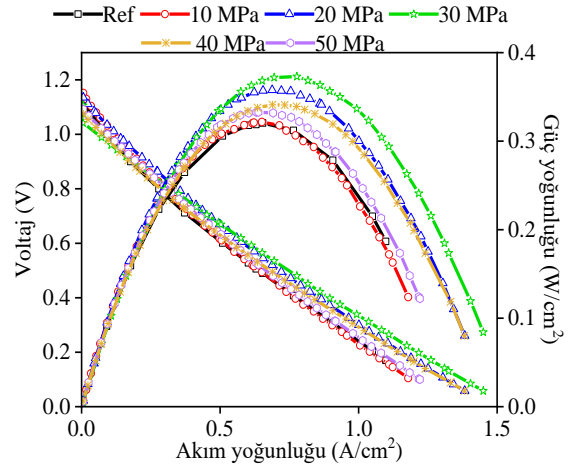
Üretimi tamamlanan M10-M50 fotoğrafları ise kullanılan metal örgü eleklerle birlikte Şekil 1’de verilmiştir. E10-E50’nin elek uygulanmış (ön yüz) ve uygulanmamış (arka yüz) yüzeylerine ait haritalar ise Şekil 4’te verilmiştir. 60 MPa basınç altında şekillendirilen E60’da ise yırtılmalar meydana geldiği için (Şekil 2) bu desteği içeren MEG ve hücre üretimi yapılmamıştır. Bu durum 60 MPa ve üzeri izostatik presleme basınçlarında bu çalışmada incelenen şerit döküm kalınlığı ve şerit sayısı gibi parametreler altında hasarsız bir elektrolit destek üretilmeyeceğini ortaya koymaktadır. Söz konusu yırtılmalar yüksek presleme basıncına bağlı olarak örgü elekteki çıkıntılarının elektrolit şeritlerini delmesiyle açıklanmıştır. Diğer örneklerde ise gerek izostatik pres gerekse de sinterleme sonrasında gözle görünür bir sorun olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 2. İzostatik pres sonrasında E60 fotoğrafı

Her ne kadar izostatik pres sırasında elektrolitin tek bir yüzüne elek yerleştirilmiş olsa da elektrolitin her iki yüzünde de düzgün desenlerin oluştuğu görülmektedir. Bu durum presleme sırasında elek yapısından kaynaklanan moment etkisiyle açıklanabilir. Fakat eleklerle temas eden yüzeyde çalışılan bütün pres basınçları altında beklenildiği gibi daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Öte yandan artan pres basıncı ile her iki elektrolit yüzünün pürüzlülük değerleri artmaktadır. Bu durum elektrolit yüzey alanının da pres basıncı ile arttığına işaret etmektedir. Bu nedenle yüksek pürüzlülüğe sahip elektrolit destekler üzerine inşa edilen hücrelerin daha yüksek bir performans ortaya koyması beklenmektedir. Fakat Şekil 3’te verilen performans sonuçlarında daha farklı bir davranış gözlemlenmektedir.

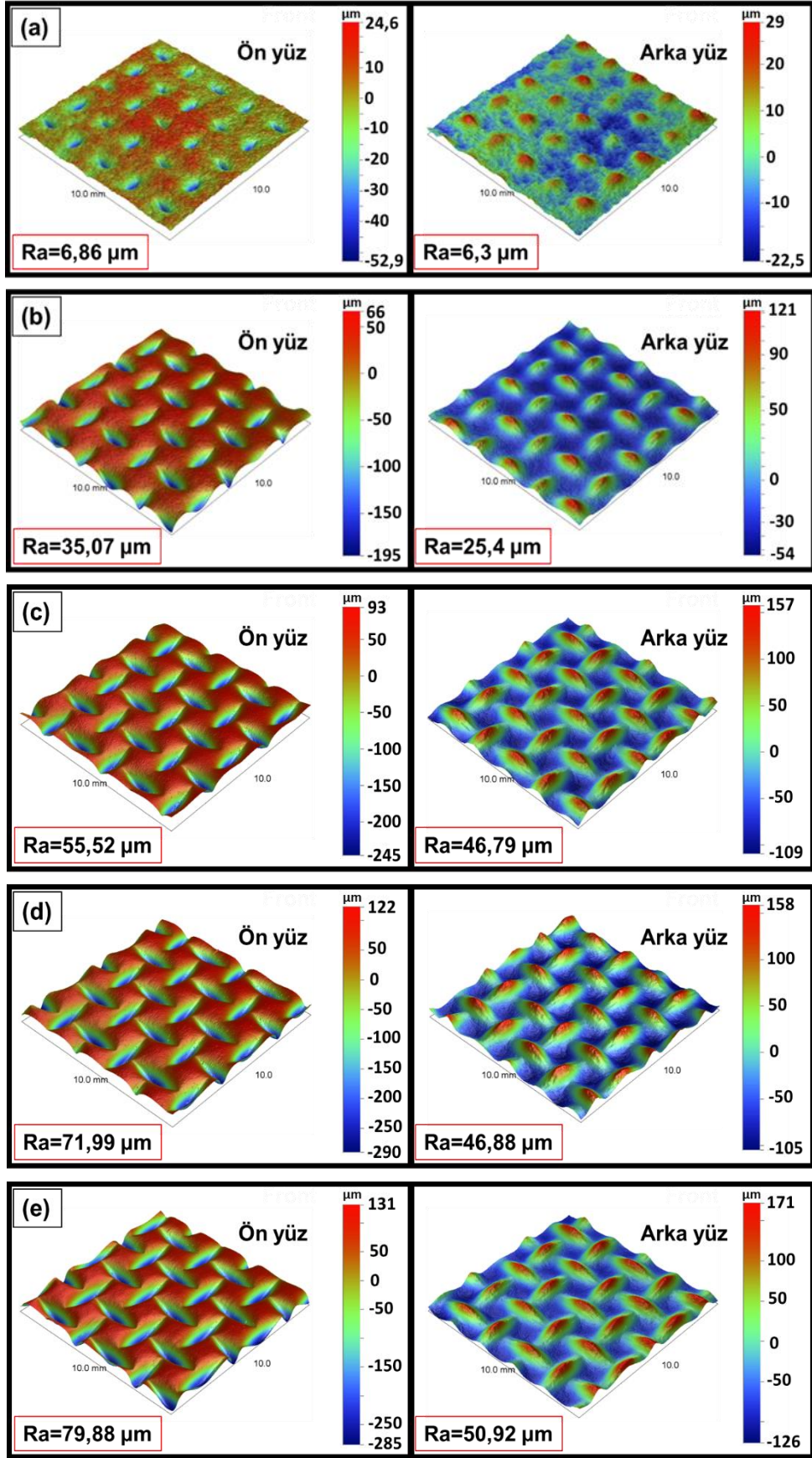
Bütün hücrelerin açık devre potansiyellerinin teorik değere yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle eleklerle desenlendirmenin 60 MPa altındaki preslemelerde istenilen yoğun bir elektrolit üretimine engel olmadığı ve hücrelerin sızdırmazlığının iyi bir şekilde sağlandığı belirlenmiştir. Desenlendirilmiş elektrolit içeren bütün hücrelerin referans hücreden daha yüksek performanslar sergilediği de net bir biçimde görülmektedir. Bu durum artan elektrolit yüzey alanına bağlı olarak iyileşen anot ve katot elektrokimyasal



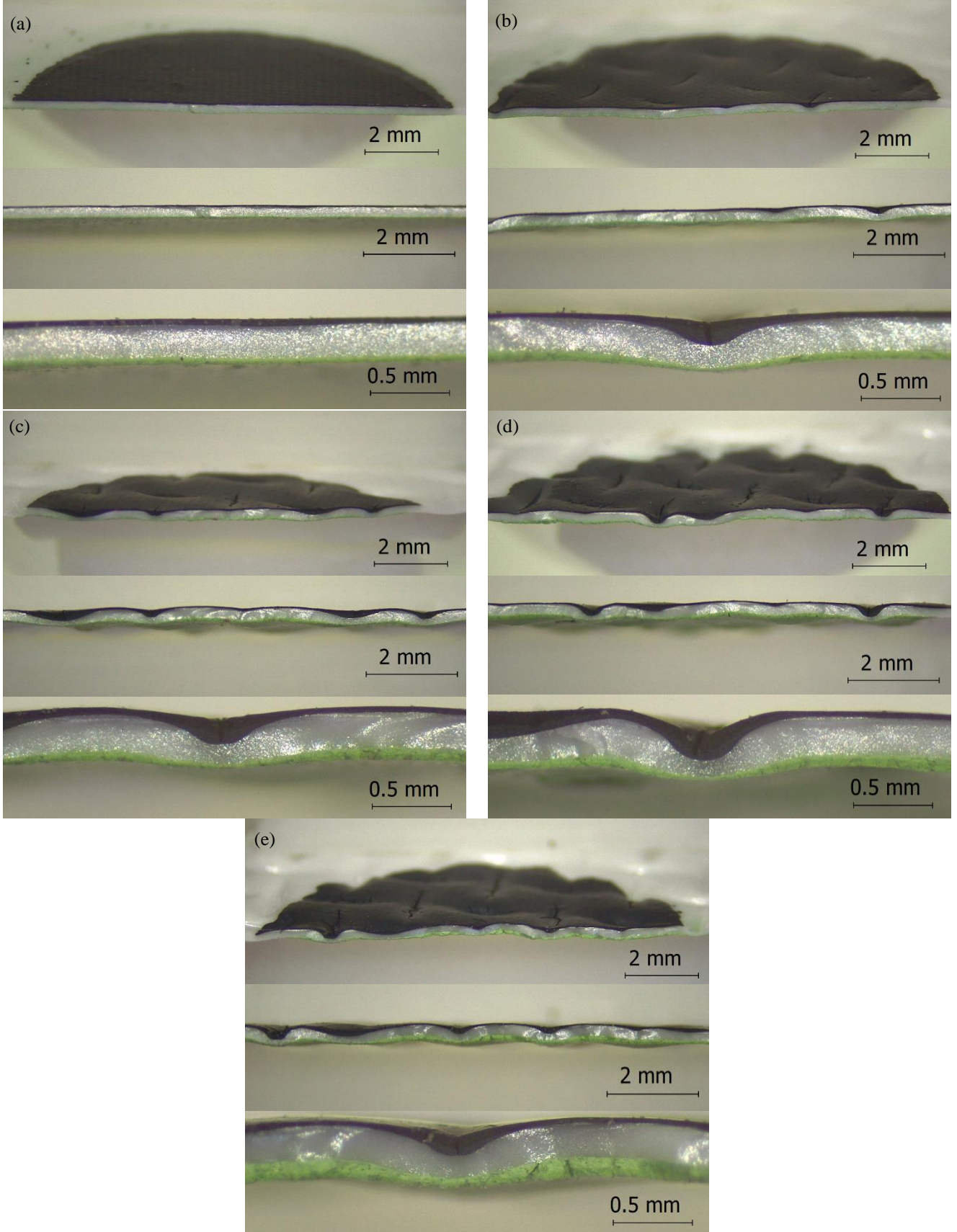
Şekil 3. H10-H50 performans (a) ve empedans (b) sonuçları

reaksiyon bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Artan pres basıncı ile her ne kadar daha yüksek elektrolit yüzey alanı oluşturulsa da Şekil 4’de verilen yüzey pürüzlülük verilerinden de anlaşılacağı üzere bu durum aynı zamanda oluşturulan desenlerin derinliklerinin de pres basıncı ile artması anlamına gelmektedir. Şekil 5’te verilen mikroskop görüntülerinde söz konusu derinlik artışı net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, bu bölgeler anot ve katot ile kaplandıkları için artan pres basıncı ile daha kalın anot ve katot tabakaları ortaya çıkmıştır.

20 MPa ve üzeri pres basınçlarında özellikle katot yüzeylerinde çatlaklar oluştuğu, 30 MPa üzeri pres basınçlarında ise bu çatlakların elektrolit yüzeyine kadar ilerlediği tespit edilmiştir. Elektrolitlerin nispeten daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeylerine kaplanan anot bölgesinde ise daha düşük desen derinlikleri söz konusu olduğu için sadece 50 MPa pres basıncında benzer çatlakların oluştuğu belirlenmiştir



Şekil 4. E10-E50 (a-e) yüzey profilleri



Şekil 5. M10-M50 (a-e) kesit detayları

Ortaya çıkan bu çatlaklar ÜFS azalması ve dolayısı ile elektrolit-elektrot arayüzey alanlarındaki iyileşmenin doğrudan performansa yansıtılmaması ile sonuçlanmıştır. Şekil 3(a)'da verilen performans sonuçlarından da 30 MPa üzeri pres basınçlarında bu hasarların artan elektrolit-elektrot yüzey alanını baskıladığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu nedenle desenli hücrelerin performansı 30 MPa pres basıncına kadar iyileşen arayüzey alanına bağlı olarak düzenli bir şekilde artarken, daha yüksek pres basınçlarında artan çatlaklar nedeni ile hücre performanslarında düzenli bir azalma meydana gelmiştir. Anot ve katot tabakalarında meydana gelen çatlamlar ise artan tabaka kalınlıklarına bağlanmıştır. Elektrotların kaplanmasında kullanılan ipek baskı yönteminin özellikle derinliğin yüksek olduğu bölgelerde tam bir dolgu sağlamadığı düşünülmektedir. Başka bir ifade ile elektrot kaplama sırasında ragle, ipek baskı eleğinden geçen elektrot solüsyonlarına derin kısımlarda elek esnekliğine bağlı olarak yeterli baskıyı uygulayamamakta ve bunun sonucunda sinterleme sırasında çatlamlar meydana gelmektedir. Referans hücre ve H10-H50'nin 800 °C çalışma sıcaklığındaki maksimum güç yoğunlukları sırası ile 0,320 W/cm², 0,322 W/cm², 0,358 W/cm², 0,373 W/cm², 0,341 W/cm² ve 0,332 W/cm² olarak ölçülmüştür. En yüksek performansı ortaya koyan H30'daki performans iyileşmesi ise referans hücreye göre ~ %16 olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda bu çalışmada önerilen basit, maliyet etkin ve uygulanabilir bir yöntemle önemli bir performans iyileşmesi elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

H10-H50'ye ait empedans dataları ise Şekil 3(b)'de sunulmuştur. Karşılaştırma amaçlı olarak referans hücreden elde edilen sonuçlar da şekilde verilmiştir. Toplam dirençlerin hücre performansları ile uyumlu olarak değiştiği görülmektedir. Eğrilerin x-eksenini yüksek frekansta ilk kestiği kısım olan ohmik dirençler göz önüne alındığında ise elek ile preslenmiş elektrolitlere sahip hücrelerin referans hücreye göre daha düşük ohmik direnç değerleri sergilediği belirlenmiştir. Bu durum Şekil 5'te net bir şekilde görülen ve lokal olarak azalan elektrolit kalınlığından kaynaklanmaktadır. Bu kapsamda desenli elektrolite sahip hücrelerin performanslarını, iyileşen arayüzey alanının yanı sıra incelen elektrolit kalınlığının da etkin olduğu düşünülmektedir. 30 MPa pres basıncına kadar artan elektrolit-elektrot yüzey alanına bağlı olarak eğrilerin x-eksenini kestiği iki nokta arasındaki mesafe ile ifade edilen elektrot dirençlerinde düzenli bir azalma oluşurken, pres basıncının daha yükseklere çıkması ile artan çatlakların daha etkin olmasının bir sonucu olarak elektrot dirençleri de artmaktadır. Öte yandan bütün MEG'lerin düşük frekansta en sağdaki eğri olarak ortaya çıkan gaz difüzyon direncinin nispeten yüksek olduğu da dikkat çekmektedir. Bu durum gerek anot gerekse de katot gözenek yapısının iyileştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada ek bir cihaz, proses veya yüksek maliyetli bir kalıp gerektirmeyen basit bir yöntemle KOYP elektrolit desteklerin desenleme yolu ile yüzey alanlarının artırılması konu edilmiştir. Şerit döküm yolu ile imal edilen

elektrolitlerin bir yüzeyine örgü elek yerleştirilerek izostatik preslenmesine dayanan bu teknikle artan elektrolit-elektrot arayüzey alanları sayesinde hücre performanslarının da iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda izostatik pres basıncının desenleme, hücre yapısı ve elektrokimyasal performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Profilometre sonuçları artan pres basıncı ile yüzey pürüzlülüğünün ve dolayısı ile yüzey alanındaki iyileşmenin arttığını ortaya koymuştur. Bu nedenle performans ölçümlerinde desenli elektrolite sahip olan bütün hücreler, referans hücreden daha yüksek bir performans ortaya koymuştur. Empedans sonuçları ise artan arayüzey alanına bağlı olarak şarj transfer direncinin yanı sıra mikroskop incelemeleri ile de doğrulanan lokal olarak azalan elektrolit kalınlığının bir sonucu olarak ohmik dirençteki azalmayı da işaret etmektedir. Fakat 30 MPa üzerindeki pres basınçlarında hücre performansları azalan bir eğilim sergilemiştir. Gerçekleştirilen stereoskopik mikroskop analizleri bu basınç üzerindeki preslemelerde özellikle katot yapısında elektrolite kadar uzanan çatlamlar olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu çatlaklar iyileşen arayüzey özelliklerini baskılayarak yüksek pres basınçlarında imal edilen hücrelerde performans kayıplarına neden olmuştur. Bu kapsamda 0.373 W/cm²'lik en yüksek performansı elektrolit tabakası 30 MPa basınçta elek ile birlikte preslenen desenli elektrolite sahip hücre sergilerken bu değer referans hücreden ~ %16 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle katot ipek baskı çamurunun ve/veya ipek baskı proses parametrelerinin optimize edilmesi ile katotta oluşan çatlakların ortadan kaldırılarak daha yüksek performans değerlerine ulaşılması mümkün görülmektedir. İzostatik pres sıcaklığı ve süresi de optimize edilmesi gerek diğer parametreler olarak ön plana çıkmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] M. Brown, S. Primdahl and M. Mogensen, Structure/performance relations for Ni/yttria-stabilized zirconia anodes for solid oxide fuel cells. Journal of The Electrochemical Society, 147, 475-485, 2000. <https://doi.org/10.1149/1.1393220>.
- [2] M. Kishimoto, H. Iwai, M. Saito and H. Yoshida, Characteristic length of oxide-ion conduction for prediction of active thickness in SOFC anode. ECS Transactions, 57, 2515-2525, 2013. <https://doi.org/10.1149/05701.2515ecst>.
- [3] K. Yuan, Y. Ji and J.N. Chung, Physics-based modeling of a low-temperature solid oxide fuel cell with consideration of microstructure and interfacial effects. Journal of Power Sources, 194, 908-919, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.05.045>.
- [4] T. Kenjo, S. Osawa and K. Fujikawa, High temperature air cathodes containing ion conductive oxides. Journal of The Electrochemical Society, 138, 349-355, 1991. <https://doi.org/10.1149/1.2085587>.

- [5] A. Konno, H. Iwai, M. Saito and H. Yoshida, Effect of characteristic lengths of electron, ion, and gas diffusion on electrode performance and electrochemical reaction area in a solid oxide fuel cell. *Heat Transfer*, 41, 700-718, 2012. <https://doi.org/10.1002/htj.20373>.
- [6] H. Dai, S. He, H. Chen and L. Guo, A novel method of modifying electrolyte surface at mesoscale for intermediate-temperature solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, 42, 2045-2050, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.057>.
- [7] X. M. Wang, C. J. Li, C. X. Li and G. J. Yang, Microstructure and electrochemical behavior of a structured electrolyte/LSM-cathode interface modified by flame spraying for solid oxide fuel cell application. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19, 311-316, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9373-7>.
- [8] C. Lee, S. S. Shin, J. Choi, J. Kim, J. W. Son, M. Choi and H. H. Shin, A micro-patterned electrode/electrolyte interface fabricated by soft-lithography for facile oxygen reduction in solid oxide fuel cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 8, 16534-16541, 2020. <https://doi.org/10.1039/D0TA03997G>.
- [9] Y. Xu, F. Tsumori, T. Osada and H. Miura, Improvement of solid oxide fuel cell by imprinted micropatterns on electrolyte. *Micro & Nano Letters*, 8, 571-574, 2013. <https://doi.org/10.1049/mnl.2013.0310>.
- [10] F. Tsumori, Y. Xu, Y. Tanaka, T. Osada and H. Miura, Micrometer-scale imprinting process for ceramic sheet from powder compound material. *Procedia Engineering*, 81, 1433-1438, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.169>.
- [11] A. Konno, H. Iwai, K. Inuyama, A. Kuroyanagi, M. Saito, H. Yoshida, K. Kodani and K. Yoshikata, Mesoscale-structure control at anode/electrolyte interface in solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*, 196, 98-109, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.025>.
- [12] H. Iwai, A. Kuroyanagi, M. Saito, A. Konno, H. Yoshida, T. Yamada and S. Nishiwaki, Power generation enhancement of solid oxide fuel cell by cathode-electrolyte interface modification in mesoscale assisted by level set-based optimization calculation. *Journal of Power Sources*, 196, 3485-3495, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.024>.
- [13] N. M. Farandos, L. Kleiminger, T. Li, A. Hankin and G. H. Kelsall, Three-dimensional Inkjet Printed Solid Oxide Electrochemical Reactors. I. Yttria-stabilized Zirconia Electrolyte. *Electrochimica Acta*, 213, 324-331, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.103>.
- [14] F. Salari, A. B. Najafabadi, M. Ghatee and M. Golmohammad, Hybrid additive manufacturing of the modified electrolyte-electrode surface of planar solid oxide fuel cells. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17, 1554-1561, 2020. <https://doi.org/10.1111/ijac.13527>.
- [15] J. A. Cebollero, R. Lahoz, M. A. Laguna-Bercero, J. I. Peña, A. Larrea and V. M. Orera, Characterization of laser-processed thin ceramic membranes for electrolyte-supported solid oxide fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 13939-13948, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.112>.
- [16] W. P. Pan, Z. Lü, Y. H. Zhang, X. Q. Huang, B. Wei, Z. H. Wang and W. H. Su, Improved electrodes/electrolyte interfaces for solid oxide fuel cell by using dual-sized powders in electrolyte slurry. *Fuel Cells*, 12, 732-738, 2012. <https://doi.org/10.1002/fuce.201100205>.
- [17] H. Seo, H. Iwai, M. Kishimoto, C. Ding, M. Saito and H. Yoshida, Microextrusion printing for increasing electrode-electrolyte interface in anode-supported solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources*, 450, 2020, 227682. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227682>.
- [18] Y. Zhang, G. Cai, Y. Gu, L. Ge, Y. Zheng, H. Chen and L. Guo, Modifying the electrode-electrolyte interface of anode supported solid oxide fuel cells (SOFCs) by laser-machining. *Energy Conversion and Management*, 171, 1030-1038, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.044>.
- [19] I. Jang, C. Kim, S. Kim and H. Yoon, Fabrication of thin films on an anode support with surface modification for high-efficiency intermediate-temperature solid oxide fuel cells via a dip-coating method. *Electrochimica Acta*, 217, 150-155, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.065>.





Synthesis of MoS₂ thin films using the two-step approach

İki adımlı yaklaşım kullanılarak MoS₂ ince filmlerin sentezlenmesi

Serkan Erkan¹ , Ali Altuntepe² , Recep Zan^{3,*} 

^{1,2,3} Niğde Ömer Halisdemir University, Nanotechnology Application and Research Center, 51200, Niğde, Türkiye

^{1,3} Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Physics, 51200, Niğde, Türkiye

Abstract

In this study, MoS₂ thin films were grown using two-step approach, which is based on employing both PVD and CVD techniques. The films were obtained initially by sputtering 1nm Mo film in the PVD system and followed by sulphurization of the film in CVD at 700°C. The grown films were optimized employing different sulphurization times. The main difference in our study from the current literature is using preheated CVD furnace (700°C) ahead of sulphurization. The films quality are then investigated using Raman and Photoluminance spectrometer as well as AFM measurements. The Raman spectrums indicate that two characteristic vibration modes of 2H-MoS₂ phase were observed in all samples, however, vibration modes of 1T-MoS₂ phase were also observed in some films at low sulphurization time. These results were also in line with PL measurements that confirm the direct band transition of the MoS₂ films. The surface topography of the films were investigated by AFM for MoS₂ films obtained by the sulfurization of 1 nm-thick Mo film in 15 minutes at 700°C which shows MoS₂ crystals in triangle shape.

Keywords: MoS₂, Two-dimensional materials, PVD, CVD, Raman spectroscopy

1 Introduction

Two-dimensional (2D) materials usually called one atomic thick materials such as graphene, carbon nanotube, molybdenum disulfide (MoS₂) have attracted the attention of many researchers due to their superior structural and physical properties [1]. Transition metal dichalcogenides (TMDs) are the most popular materials in the family of 2D materials in that they have high transmittance, high durability and direct energy band gap. The generalized formula for TMDs is MX₂, where M is the transition metals (molybdenum, tungsten, vanadium) and X represents chalcogens (sulfur, tellurium and selenium) [2]. MoS₂ stands out among the TMDs due to its remarkable properties. MoS₂ has a hexagonal structure connected to each other (S-Mo-S) with covalent bonds. In addition, MoS₂ has 1.3 eV indirect band transition in its bulk form and 1.85 eV direct band gap transition in the single and multi-layer form [3, 4]. The band gap called "direct" is the top of the valence band and the bottom of the conduction band occur at the same value of the K-point of Brillouin Zone. Therefore, when an electron rises

Öz

Bu çalışmada, hem PVD hem de CVD tekniklerinin kullanılmasına dayanan iki aşamalı yaklaşım kullanılarak MoS₂ ince filmler büyütülmüştür. Filmler ilk olarak 1 nm Mo filmin PVD sisteminde saçırma yöntemiyle ve ardından filmin CVD' de 700°C' de sülfürlenerek elde edilmiştir. Büyütülmüş filmler, farklı sülfürizasyon süreleri kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışmamızın güncel literatürden temel farkı, kükürtleme öncesinde önceden ısıtılmış CVD fırını (700°C) kullanılmasıdır. Filmlerin kalitesi daha sonra AFM ölçümlerinin yanı sıra Raman ve Fotoluminesans spektrometresi kullanılarak araştırılmıştır. Raman spektrumları, tüm örneklerde 2H-MoS₂ fazının iki karakteristik titreşim modunun gözlemlendiğini, ancak bazı filmlerde düşük sülfürizasyon süresinde 1T-MoS₂ fazının titreşim modlarının da gözlemlendiğini göstermektedir. Bu sonuçlar ayrıca MoS₂ filmlerinin doğrudan bant geçişini doğrulayan PL ölçümleriyle de uyumludur. Filmlerin yüzey topografyası, 1 nm kalınlığında Mo filminin 700°C'de 15 dakikada sülfürlenerek elde edilen ve MoS₂ kristallerini üçgen şeklinde gösteren MoS₂ filmleri için AFM ile incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: MoS₂, İki-boyutlu malzemeler, PVD, CVD, Raman spektroskopisi

from valance band to the conducting band, it does not need addition of phonon energy. When the conducting and valance bands do not have the same value with the K-point of Brillouin Zone, this is called "indirect" band gap. Thus, in order for an electron to move from valance band to the conducting band, it needs extra energy known as phonon energy to push the electron to the conducting band [5]. This restricts especially opto-electronic applications. In this respect, the transition from indirect to direct band structure when MoS₂ is thinned down creates an important advantage for the opto-electronic applications [6].

MoS₂ has commonly two typical phases called 2H and 1T. The 2H phase represents semiconductor while the 1T addresses metallic behavior. The structural difference between the 2H and 1T phases is due to the geometric arrangement of the S-atoms. Phase change/transformation can be made/done in the MoS₂ structure by applying annealing processes without the need for high pressure or doping [7-9].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: recep.zan@ohu.edu.tr (R. Zan)

Geliş / Recieved: 05.10.2022 Kabul / Accepted: 16.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1184705

There are a few different approaches regarding MoS₂ synthesis such as magnetron sputtering [10], chemical vapor deposition (CVD) [11, 12], hydrothermal synthesis [13] and electrochemical processes [14], which are considered to be more suitable and applicable techniques. The magnetron sputtering technique provides large-scale synthesis and is compatible with the existing industrial processes with low cost and easy control. However, the magnetron sputtering technique creates an obstacle in synthesizing TMDs, especially for MoS₂ and MoSe₂, due to the difficulty of controlling stoichiometric ratio of S or Se [15].

In this study, large scale and homogeneous MoS₂ films were synthesized using both magnetron sputtering and CVD methods. Although, CVD provides many advantages in MoS₂ synthesis, this method includes many parameter optimizations such as; sulphurization time, gas flow ratio, pressure and etc. Mo films were first coated on the glass and Si/SiO₂ substrates by magnetron sputtering and then sulphurization was carried out in the preheated CVD at high temperature to obtain MoS₂ thin films with high homogeneity. We call this approach as a two-step approach, which is based on sputtering Mo films and the annealing them in sulfur atmosphere in the preheated CVD at high temperature to obtain MoS₂ thin films.

2 Method

In this study, the glass and Si/SiO₂ substrates were cleaned using the standard cleaning procedures (5 minutes acetone, 5 minutes isopropanol alcohol and 10 minutes deionize water in ultrasonic bath) ahead of synthesis process. Mo was sputtered on these substrates to achieve 1 nm film thickness using 50 W RF power under 1.6×10^{-6} Torr base pressure in a pure Ar gas atmosphere. Then, 1 nm thick Mo films were sulfurized in the CVD system applying different sulphurization times for the MoS₂ film synthesis. Sulphur powder (50 mg) and 50 sccm Ar gas flow ratio were used in the sulphurization process.

In the MoS₂ synthesis procedure, the Mo coated substrate was placed in the quartz tube and exposed to 700 °C directly in the preheated CVD furnace. In other words, samples were not placed in quartz tube during the heating process of the furnace. The temperature of the samples in the furnace was increased rapidly with a ramping rate of 1.67 °C/s, which was measured using thermocouple. As for the sulphurization temperature, it was kept constant at 700 °C for all the investigated samples according our many runs and literature [16, 17].

Sulphurization time is an important parameter to enhance MoS₂ film quality. So different dwell times were applied to determine the optimum sulphurization time, which were 5-, 10-, 15- and 20-minutes. This process was carried out in the CVD furnace at 700 °C. The structural properties of the synthesized MoS₂ films were characterized by Raman and Photoluminescence (PL) Spectrometer and Atomic Force Microscope (AFM) measurements.

The reason why Raman spectroscopy was employed for characterization is because it is one of the essential and straightforward characterization tools to determine MoS₂ film quality. MoS₂ shows two characteristic modes (two

peaks) in Raman spectrum, which are A_{1g} and E_{2g}¹; A_{1g} mode is related to out-of-plane vibration of S atoms and E_{2g}¹ mode is associated with in-plane vibration of Mo and S atoms [18]. The frequency difference (peak positions) between these two modes in Raman spectrum is increasing with the increase of the film thickness along with shifting PL emission to longer wavelengths [19, 20]. Additionally, if the frequency difference between the two modes in Raman spectrums is around or below 20 cm⁻¹, the films tend to become thinner towards a single layer [21-24].

3 Result and discussions

Raman spectrum of MoS₂ films obtained with different sulphurization times of 1 nm thick Mo films is presented in Figure 1. MoS₂ structure was not obtained when 5 minutes dwell time was applied. This can be attributed to the S atoms, which do not have enough time to penetrate into Mo film at 700 °C. MoS₂ structure was first obtained for 10 minutes dwell time. Characteristic modes of MoS₂ in the Raman spectrum, which are A_{1g} and E_{2g}¹, were determined around 386 cm⁻¹ and 410 cm⁻¹, respectively for the film obtained in 10 minutes dwell time. These peaks also underline the presence of 2H-MoS₂ phase, which is the so-called semiconductor phase exhibiting semiconductor properties. Additionally, this film has another three characteristics Raman modes named J₁ (156 cm⁻¹), J₂ (220 cm⁻¹), J₃ (290-304 cm⁻¹). These modes are related to the 1T-MoS₂ phase, which is metallic. Therefore, the MoS₂ film can also exhibit metallic properties as well as semiconducting properties (2H-MoS₂ phase) at the same time [25, 26]. The 1T-MoS₂ phase occurs due to the failure of S atoms to settle in the structure within a sufficient time phase. This was also applied in our case for the sample obtained in 10 minutes dwell times, which is not sufficient for S atoms to penetrate into Mo structure [7, 27, 28]. When the dwell time increased from 10 to 15 minutes, the 1T-MoS₂ phase evolved to 2H-MoS₂ phase [29-32]. Upon increasing the dwell time to 15 minutes, previously seen J₁, J₂ and J₃ modes disappeared, and the characteristic modes of 2H phases were observed at around 384 cm⁻¹ and 409 cm⁻¹, respectively. In brief, S atoms could penetrate to the Mo structure and 1T phase evolved to 2H phase in 15 minutes dwell time. However, higher dwell time (20 minutes) affected the MoS₂ film quality seriously and no MoS₂ film was obtained at all. These results can be ascribed to the defect formation in the MoS₂ film structure by the increase in the dwell time due to the rise in the amount of S atoms in the vicinity [33].

PL characterization is essential to determine band transition in MoS₂ structure. PL spectra of MoS₂ films obtained with different dwell times are given in Figure 2, which also verifies the Raman measurements regarding the formation of metallic and semiconductor phase of MoS₂ structure. PL spectra of the MoS₂ film obtained in 10 minutes dwell time show a peak at 972 nm, which corresponds to a band gap of 1.27 eV. This gap indicates an indirect band gap transition in addition to metallic phase, which is confirmed by Raman measurements. On the other hand, when the dwell time was changed from 10 to 15 minutes, two PL emission peaks were determined at 972 nm and 687 nm and these

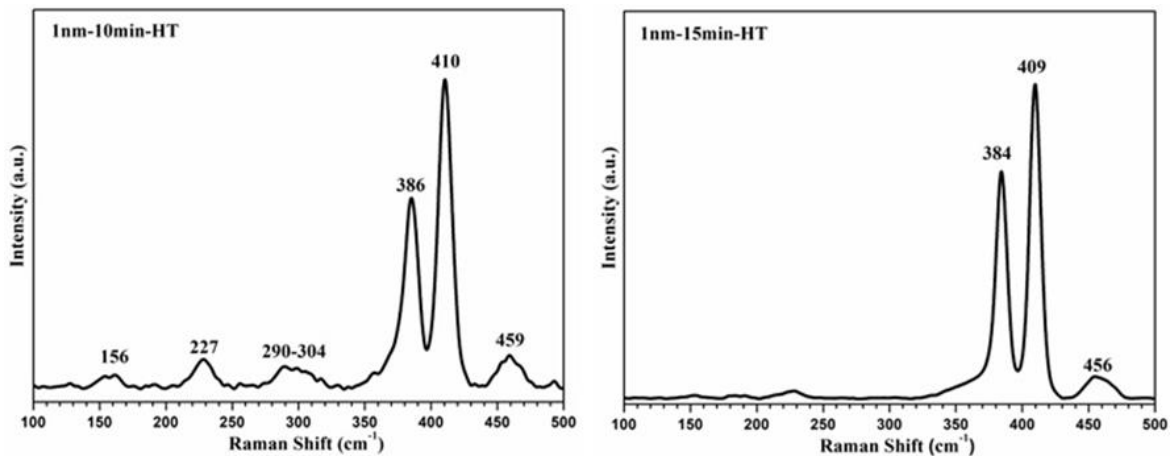


Figure 1. Raman spectrum of MoS₂ film obtained with different sulphurization times (5-, 10-, 15- and 20-minutes) of 1 nm thick Mo layers

correspond to a band gap of 1.27 and 1.80 eV, respectively. This is highly related to the metallic phase that converted into semiconductor phase with increasing dwell time. However, rising the dwell time from 15 minutes to 20 minutes destroyed the MoS₂ structure due to higher interaction of Mo film with more S atoms in high temperature [8, 34].

Figure 3 shows the AFM image (1 μm x 1 μm) of MoS₂ film obtained on the Si/SiO₂ substrate by sulfurization 1nm-thick Mo film in 15 minutes at 700 °C. The film exhibits similar surface morphology across the film, which is the confirmation of high coverage and homogeneity of the film.

We observed that the AFM images of the synthesized film is a few-layer, homogenous with < 0.5 nm surface (RMS) roughness and these results are in line with those obtained through the Raman measurements.

4 Conclusions

In the present study, 2D-MoS₂ films were synthesized using a two-step method. The first step included the synthesis of 1nm-thick Mo film using magnetron-sputtering system while the second step concerned the sulphurization

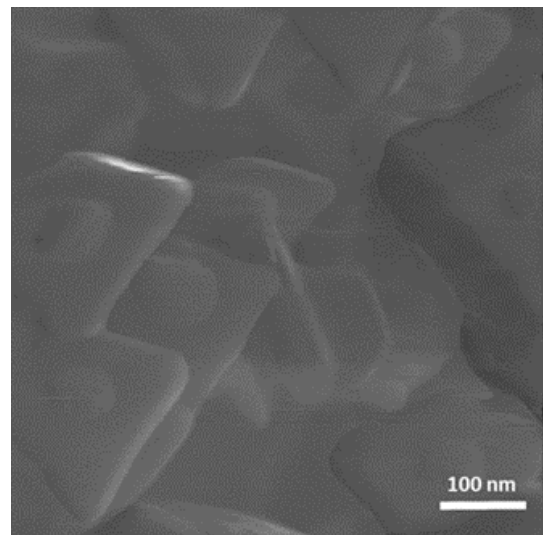


Figure 3. The AFM image (1 μm x 1 μm) of MoS₂ film obtained on the Si/SiO₂ substrate by sulfurization 1nm-thick Mo film in 15 minutes at 700 °C

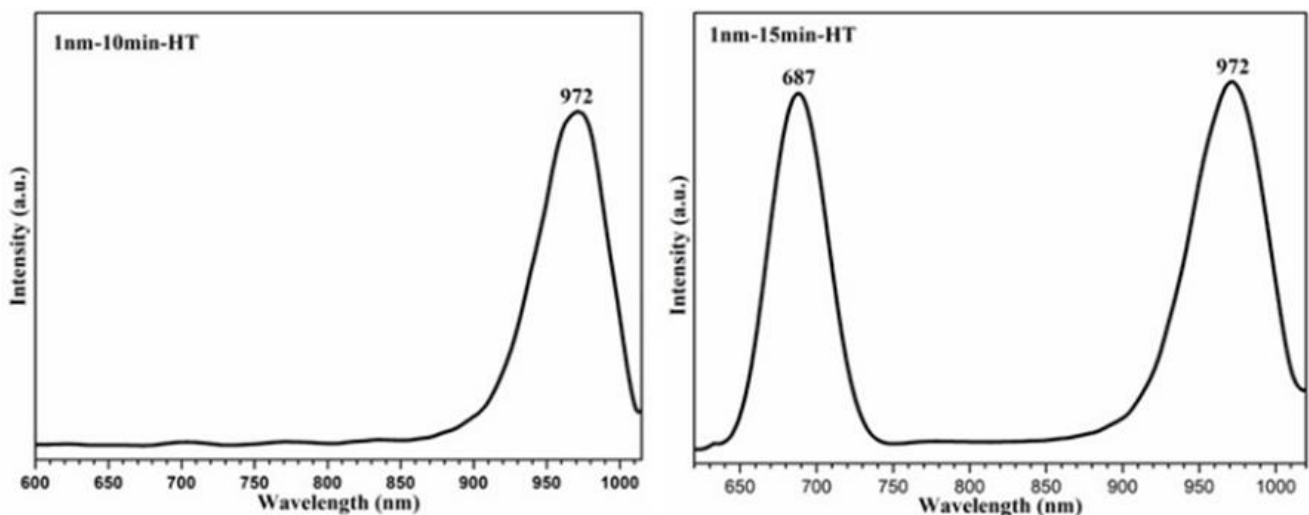


Figure 2. PL spectrum Raman spectrum of MoS₂ film obtained with different sulphurization times (5-, 10-, 15- and 20-minutes) of 1 nm thick Mo layers

of the Mo films with different dwell times in the CVD system. According to the Raman and PL spectroscopy measurements of MoS₂ films, 10 minutes of dwell time was found to be insufficient for the formation of single phase MoS₂ as the obtained film showed metallic phase. With the increase of dwell time from 15 to 20 minutes, the metallic phase changed to the semiconductor phase and the indirect band transition evolved to a direct band transition. However, we observed that the MoS₂ structure could not be obtained when the dwell time was increased to 20 minutes and the optimum dwell time for the HT method was set to 15 minutes. Hence, we conclude that the two-step approach is highly effective to synthesize high quality MoS₂ films by the sulfurization of 1 nm-thick Mo film in 15 minutes at 700°C. These results enable the use of MoS₂ films in optoelectronic applications.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge funding from Niğde Ömer Halisdemir University Scientific Projects Unit under a project number of FMT 2021/4-ÖNAP.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 7%

References

- [1] A.K. Geim, K.S. Novoselov, The rise of graphene, in: *Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals*, World Scientific, pp. 11-19, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.5091753>.
- [2] H.-P. Komsa, S. Kurasch, O. Lehtinen, U. Kaiser, A.V. Krasheninnikov, From point to extended defects in two-dimensional MoS₂: Evolution of atomic structure under electron irradiation, *Physical Review B*, 88 035301(2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.035301>.
- [3] J.W. Park, H.S. So, S. Kim, S.-H. Choi, H. Lee, J. Lee, C. Lee, Y. Kim, Optical properties of large-area ultrathin MoS₂ films: Evolution from a single layer to multilayers, *Journal of Applied Physics*, 116 183509(2014). <https://doi.org/10.1063/1.4901464>.
- [4] H. Nan, Z. Wang, W. Wang, Z. Liang, Y. Lu, Q. Chen, D. He, P. Tan, F. Miao, X. Wang, Strong photoluminescence enhancement of MoS₂ through defect engineering and oxygen bonding, *ACS nano*, 8 5738-5745(2014). <https://doi.org/10.1021/nn500532f>.
- [5] S. Zhang, Z. Yan, Y. Li, Z. Chen, H. Zeng, Atomically thin arsenene and antimonene: semimetal–semiconductor and indirect–direct band-gap transitions, *Angewandte Chemie*, 127 3155-3158(2015). <https://doi.org/10.1002/ange.201411246>.
- [6] S. Tongay, J. Zhou, C. Ataca, K. Lo, T.S. Matthews, J. Li, J.C. Grossman, J. Wu, Thermally driven crossover from indirect toward direct bandgap in 2D semiconductors: MoSe₂ versus MoS₂, *Nano letters*, 12 5576-5580(2012). <https://doi.org/10.1002/ange.201411246>.
- [7] A. Ambrosi, Z. Sofer, M. Pumera, 2H→ 1T phase transition and hydrogen evolution activity of MoS₂, MoSe₂, WS₂ and WSe₂ strongly depends on the MX₂ composition, *Chemical Communications*, 51, 8450-8453(2015). <https://doi.org/10.1039/C5CC00803>.
- [8] A.N. Enyashin, L. Yadgarov, L. Houben, I. Popov, M. Weidenbach, R. Tenne, M. Bar-Sadan, G. Seifert, New route for stabilization of 1T-WS₂ and MoS₂ phases, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 24586-24591(2011). <https://doi.org/10.1021/jp2076325>.
- [9] S. Presolski, M. Pumera, Covalent functionalization of MoS₂, *Materials Today*, 19 140-145(2016). <https://doi.org/10.1021/jp2076325>.
- [10] C. Muratore, J. Hu, B. Wang, M.A. Haque, J.E. Bultman, M.L. Jespersen, P. Shamberger, M. McConney, R. Naguy, A. Voevodin, Continuous ultrathin MoS₂ films grown by low-temperature physical vapor deposition, *Applied Physics Letters*, 104 261604(2014). <https://doi.org/10.1063/1.4885391>.
- [11] Y. Zhan, Z. Liu, S. Najmaei, P.M. Ajayan, J. Lou, Large-area vapor-phase growth and characterization of MoS₂ atomic layers on a SiO₂ substrate, *Small*, 8 966-971(2012). <https://doi.org/10.1002/sml.201102654>.
- [12] B. Zheng, Y. Chen, Controllable growth of monolayer MoS₂ and MoSe₂ crystals using three-temperature-zone furnace, in: *Materials Science and Engineering Conference Series*, pp. 012085, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/274/1/012085>.
- [13] Y. Liu, L. Ren, X. Qi, L. Yang, G. Hao, J. Li, X. Wei, J. Zhong, Preparation, characterization and photoelectrochemical property of ultrathin MoS₂ nanosheets via hydrothermal intercalation and exfoliation route, *Journal of alloys and compounds*, 571 37-42(2013). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.031>.
- [14] D. Song, Y. Wang, X. Lu, Y. Gao, Y. Li, F. Gao, Ag nanoparticles-decorated nitrogen-fluorine co-doped monolayer MoS₂ nanosheet for highly sensitive electrochemical sensing of organophosphorus pesticides, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 267 5-13(2018). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.016>.
- [15] L. Li, R. Long, O.V. Prezhdo, Why chemical vapor deposition grown MoS₂ samples outperform physical vapor deposition samples: time-domain ab initio analysis, *Nano letters*, 18 4008-4014(2018). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b01501>.
- [16] S. Ghosh, S.S. Withanage, B. Chamlagain, S.I. Khondaker, S. Harish, B.B.J.E. Saha, Low pressure sulfurization and characterization of multilayer MoS₂ for potential applications in supercapacitors, 203 117918(2020). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117918>.
- [17] R. Shahzad, T. Kim, S.-W.J.T.S.F. Kang, Effects of temperature and pressure on sulfurization of molybdenum nano-sheets for MoS₂ synthesis, 641 79-86(2017). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117918>.

- [18] B.R. Carvalho, L.M. Malard, J.M. Alves, C. Fantini, M.A. Pimenta, Symmetry-dependent exciton-phonon coupling in 2D and bulk MoS₂ observed by resonance Raman scattering, *Physical review letters*, 114 136403(2015), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.136403>.
- [19] H. Li, Q. Zhang, C.C.R. Yap, B.K. Tay, T.H.T. Edwin, A. Olivier, D. Baillargeat, From bulk to monolayer MoS₂: evolution of Raman scattering, *Advanced Functional Materials*, 22 1385-1390(2012), <https://doi.org/10.1002/adfm.201102111>.
- [20] K.-K. Liu, W. Zhang, Y.-H. Lee, Y.-C. Lin, M.-T. Chang, C.-Y. Su, C.-S. Chang, H. Li, Y. Shi, H. Zhang, Growth of large-area and highly crystalline MoS₂ thin layers on insulating substrates, *Nano letters*, 12 1538-1544(2012), <https://doi.org/10.1021/nl2043612>.
- [21] I. Bilgin, F. Liu, A. Vargas, A. Winchester, M.K. Man, M. Upmanyu, K.M. Dani, G. Gupta, S. Talapatra, A.D. Mohite, Chemical vapor deposition synthesized atomically thin molybdenum disulfide with optoelectronic-grade crystalline quality, *ACS nano*, 9 8822-8832(2015), <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b02019>.
- [22] M.S. Kim, G. Nam, S. Park, H. Kim, G.H. Han, J. Lee, K.P. Dhakal, J.-Y. Leem, Y.H. Lee, J. Kim, Photoluminescence wavelength variation of monolayer MoS₂ by oxygen plasma treatment, *Thin Solid Films*, 590 318-323(2015), <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.06.024>.
- [23] C.-H. Lee, G.-H. Lee, A.M. Van Der Zande, W. Chen, Y. Li, M. Han, X. Cui, G. Arefe, C. Nuckolls, T.F. Heinz, Atomically thin p-n junctions with van der Waals heterointerfaces, *Nature nanotechnology*, 9 676(2014), <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.150>.
- [24] N. Choudhary, J. Park, J.Y. Hwang, W. Choi, Growth of large-scale and thickness-modulated MoS₂ nanosheets, *ACS applied materials & interfaces*, 6 21215-21222(2014), <https://doi.org/10.1021/am506198b>.
- [25] M. Kan, J. Wang, X. Li, S. Zhang, Y. Li, Y. Kawazoe, Q. Sun, P. Jena, Structures and phase transition of a MoS₂ monolayer, *The Journal of Physical Chemistry C*, 118 1515-1522(2014), <https://doi.org/10.1021/jp4076355>.
- [26] Y. Tian, X. Song, J. Liu, L. Zhao, P. Zhang, L. Gao, Generation of Monolayer MoS₂ with 1T Phase by Spatial-Confinement-Induced Ultrathin PPy Anchoring for High-Performance Supercapacitor, *Advanced Materials Interfaces*, 6 1900162(2019), <https://doi.org/10.1002/admi.201900162>.
- [27] C. Guo, J. Pan, H. Li, T. Lin, P. Liu, C. Song, D. Wang, G. Mu, X. Lai, H. Zhang, Observation of superconductivity in 1T'-MoS₂ nanosheets, *Journal of Materials Chemistry C*, 5 10855-10860(2017), <https://doi.org/10.1039/C7TC03749J>.
- [28] U. Gupta, B. Naidu, U. Maitra, A. Singh, S.N. Shirodkar, U.V. Waghmare, C. Rao, Characterization of few-layer 1T-MoSe₂ and its superior performance in the visible-light induced hydrogen evolution reaction, *APL Materials*, 2 092802(2014), <https://doi.org/10.1063/1.4892976>.
- [29] L. Jiang, S. Zhang, S.A. Kulinich, X. Song, J. Zhu, X. Wang, H. Zeng, Optimizing hybridization of 1T and 2H phases in MoS₂ monolayers to improve capacitances of supercapacitors, *Materials Research Letters*, 3 177-183(2015), <https://doi.org/10.1080/21663831.2015.1057654>.
- [30] L. Liu, J. Wu, L. Wu, M. Ye, X. Liu, Q. Wang, S. Hou, P. Lu, L. Sun, J. Zheng, Phase-selective synthesis of 1T' MoS₂ monolayers and heterophase bilayers, *Nature materials*, 17 1108-1114(2018), <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0187-1>.
- [31] Y. Yu, G.-H. Nam, Q. He, X.-J. Wu, K. Zhang, Z. Yang, J. Chen, Q. Ma, M. Zhao, Z. Liu, High phase-purity 1T'-MoS₂ and 1T'-MoSe₂ layered crystals, *Nature chemistry*, 10 638-643(2018), <https://doi.org/10.1038/s41557-018-0035-6>.
- [32] J. Zhu, Z. Wang, H. Yu, N. Li, J. Zhang, J. Meng, M. Liao, J. Zhao, X. Lu, L. Du, Argon plasma induced phase transition in monolayer MoS₂, *Journal of the American Chemical Society*, 139 10216-10219(2017), <https://doi.org/10.1021/jacs.7b05765>.
- [33] F. Chen, W. Su, S. Ding, L. Fu, Growth and optical properties of large-scale MoS₂ films with different thickness, *Ceramics International*, 45 15091-15096(2019), <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.248>.
- [34] S.-H. Su, W.-T. Hsu, C.-L. Hsu, C.-H. Chen, M.-H. Chiu, Y.-C. Lin, W.-H. Chang, K. Suenaga, -H. He Jr, L.-J. Li, Controllable synthesis of band-gap-tunable and monolayer transition-metal dichalcogenide alloys, *Frontiers in Energy Research*, 2 27(2014), <https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00027>.





Investigation of effects of sand particles on aerodynamic performance of NACA 0012 airfoil

NACA 0012 kanat profilinin aerodinamik performansı üzerinde toz partiküllerinin etkilerinin incelenmesi

Fuat Kaya^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Mechanical Engineering, 51240, Niğde, Türkiye

Abstract

The purpose of this paper is to study the effects of turbulence kinetic energy structures formed during flow and particles of different diameters and different flow velocities in the air in different regional areas on aerodynamic performance characteristics in NACA 0012. Single and two phase fluid flows were worked out by using Ansys Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) code. Computational results obtained from Ansys Fluent CFD code for pure air and the air containing sand particles were compared with numerical values gained in the literature for validation. Results obtained from the numerical tests demonstrate good agreement with the value in the literature. These results indicate the turbulence kinetic energy value occurred in the tail region of the airfoil increases with the increase in the angle of attack and shifts towards the upper region of the airfoil at high attack angle. Moreover, the upper region of the airfoil at high attack angle becomes larger at low Reynolds numbers due to viscous effects. The drag and lift coefficients obtained in the numerical tests of the airfoils and in the experimental tests in the wind tunnel will differ from the values in the application area. Because, in the operation of airfoils in different regional environments, there are always particles of various concentrations and diameters in the air. In this case, the drag coefficient increases and the lift coefficient decreases.

Keywords: Airfoil, Turbulence kinetic energy, CFD, Drag coefficient, Lift coefficient

1 Introduction

Aerodynamics is a branch of science that has emerged to examine the movements of objects exposed to air flow and to determine their optimum characteristics. In other words, Aerodynamics is defined as the study of the resulting effects of relative motion between air molecules and surfaces [1]. In particular, the design and optimization of aircraft is very important in order to meet the needs of developing technology and increasing population. In this context, the carrying capacity of aircraft used for various purposes emerges depending on the determination of the lift and drag coefficients of the airfoils.

Öz

Bu çalışmanın amacı, NACA 0012'de akış sırasında oluşan türbülans kinetik enerji yapılarının ve havadaki farklı çaplardaki ve farklı akış hızlarındaki parçacıkların farklı bölgesel alanlarda aerodinamik performans özelliklerine etkilerini incelemektir. Tek ve iki fazlı akışkan akışları çalışılmıştır. Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kodunu kullanarak. Saf hava ve kum parçacıkları içeren hava için elde edilen hesaplama sonuçları, doğrulama için literatürde elde edilen sayısal değerlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal testlerden elde edilen sonuçlar, literatürdeki değer ile iyi bir uyum göstermektedir. Bu sonuçlar kanat profilinin kuyruk bölgesinde meydana gelen türbülans kinetik enerji değerinin hücum açısının artmasıyla arttığını ve yüksek hücum açısında kanat profilinin üst bölgesine doğru kaydığını göstermektedir. Ayrıca, yüksek hücum açısında kanat profilinin üst bölgesi, düşük Reynolds sayılarında viskoz etkilerden dolayı genişlemektedir. Kanat profillerinin sayısal testlerinde ve rüzgar tüneline deneysel testlerde elde edilen sürüklenme ve kaldırma katsayıları, uygulama alanındaki değerlerden farklılık gösterecektir. Çünkü kanat profillerinin farklı bölgesel ortamlarda çalışmasında, havada her zaman çeşitli konsantrasyonlarda ve çaplarda parçacıklar bulunmaktadır. Bu durumda sürüklenme katsayısı artmakta ve kaldırma katsayısı azalmaktadır.

Anahtar kelimeler: Kanat profili, Türbülans kinetik enerjisi, HAD, Direnç katsayısı, Kaldırma katsayısı

Optimum characteristics of airfoils in aircraft are obtained by having a high lift coefficient and a low drag coefficient. Many studies have been done on this subject. These studies were carried out numerically mainly due to the rapid development in computational fluid dynamics.

Douvi et al. [2] examined the NACA 0012 airfoil for different angles of attack and turbulence models when the Reynolds number is 3×10^6 . They stated that computational fluid dynamics turbulence models are not sufficient to obtain results at high angles of attack.

Adel [3] numerically investigated pressure distributions, lift and drag forces at different angles of attack using three different geometries, NACA 0012, NACA 2412 and SG

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fkaya@ohu.edu.tr (F. Kaya)

Geliş / Recieved: 08.12.2022 Kabul / Accepted: 28.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1216401

6043. He used the $k-\omega$ SST turbulence model in his numerical solutions. He stated that the SG 6043 airfoil is more suitable for wind turbine applications.

Bodavula et al. [4] worked at low Reynolds numbers using the NACA 0012 airfoil profile to evaluate micro-scale aircraft for military and civil unmanned aerial vehicles. In their study, they analyzed the different triangular protrusion values of the NACA 0012 airfoil. They showed that for low triangular protrusion values, the lift characteristics were significantly improved, especially at high angles of attack.

Iliev et al. [5] studied the difference experimentally and numerically on NACA 0015 in terms of speed and angle of attack. They showed that optimum performance was achieved at 8° angle of attack at different entry speeds.

The performance characteristics of micro scale and high altitude unmanned aerial vehicles and wind turbines are highly affected by laminar separation at low Reynolds numbers [6-8].

Rogowski et al. [9] tested how close the numerical tests performed with different turbulence models on the NACA 0018 airfoil were to the experimental results. They stated that the results obtained with the Transition SST turbulence model are much more agreement with the experimental results.

Umapathi and Soni [10] numerically studied NACA 2313 and NACA 7322 airfoils. They made their study by comparing the lift, drag and pressure coefficients for 6° and 10° angles of attack. In the results obtained, they evaluated the NACA 2313 airfoil as superior to the NACA 7322 airfoil.

Singh [11] worked on NACA 6, TsAGI 'B' series and Hortex brother's airfoils. Performance analyzes were made by considering the lift and drag coefficients of the airfoil. He noted that Hortex brother's airfoils provide more lift and less drag compared to other airfoils.

Rubel et al. [12] compared NACA 0015 and NACA 4415 airfoil profiles numerically and experimentally at $0^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ angles of attack. They stated that the non-symmetrical NACA 4415 airfoil is aerodynamically more favorable than NACA 0015 airfoil.

Pranto and Inam [13] considered the NACA 4312 airfoil at different angles of attack and turbulence models, with a constant Reynolds number. It was observed that the $k-\epsilon$ and $k-\omega$ turbulence models gave almost similar results, both lift and drag coefficients increased at higher angles of attack, but the lift coefficient began to decrease at $\alpha = 13^\circ$, known as the stopping condition.

Dhivyadharshini et al. [14] investigated the aerodynamic efficiency situation by considering the effects of roughness on the NACA 2412 airfoil. They considered the triangular surface roughness at the trailing edge to be the most suitable surface modification.

Shabur et al. [15] performed aerodynamic analysis of symmetrical type NACA 0018 and NACA 0012 airfoils at different Reynolds numbers and angles of attack. They stated that the optimum angle of attack was 10° and the C_L/C_D ratio increased by the Reynolds number. They also showed that at the same Reynolds numbers, the NACA 0012 airfoil provided more lift than the NACA 0018 airfoil. Thus, they stated that NACA 0012 airfoil would be more suitable for air

vehicles and NACA 0018 airfoil would be more suitable for wind energy applications.

As can be seen from the above studies in the literature, there are many studies on airfoils under various geometric and operating parameters, and it is desired to determine the optimum aerodynamic parameters. These studies are for single phase air environment. However, when the working environments of the airfoils are taken into account, not only single phase air, but also different environments such as air-particle, air-rain, air-snow are encountered. This situation is effective on the aerodynamic performance characteristics of the airfoil and there are very few studies on this subject in the literature. Some of these studies are given below.

Fatahian et al. [16] performed aerodynamic performance analysis on the NACA 0012 airfoil under dry and rainy weather conditions. In their study, they stated that there are significant decreases in the aerodynamic performance of the airfoil, especially at low angles of attack in rainy weather. In addition, they stated that the sound pressure level increased with the increase of the angle of attack, especially in the frequency regions higher than 2500 Hz under rainy conditions.

Heavy rains have negative effects on vehicle aerodynamics and maneuverability [17-19].

When the small number of literature on the operation of airfoils in different environments is examined, we come across environments with a different air-sand concentration.

Douvi et al. [20] performed numerical tests for 1.76×10^6 Reynolds number, different angles of attack and single-phase airflow and dual-phase air-sand flow on the NACA 0012 airfoil. They used Realizable $k-\epsilon$ as turbulence model and Discrete Phase Model (DPM) for particle injection. They showed that the sand concentration in the air affects the wing aerodynamics, in such cases the lift force decreases and the drag force increases.

In this study, it is aimed to determine the optimum aerodynamic performance characteristics of the NACA 0012 airfoil in different operating environments (air, air+particle). In order to determine these characteristics, numerical tests were carried out at different particle diameters, attack angles and Reynolds numbers.

2 Material and method

2.1 Numerical approach

In accordance with the studies of Douvi et al. [20], studies were carried out for a symmetrical NACA 0012 airfoil as thick as 12% of the cord length.

In the calculation area, a geometric structure has been applied so that the height is equal to 25 beam lengths. In order to better determine the aerodynamic effects on the airfoil, solutions have been obtained by adding 1000 times denser mesh to the areas close to the airfoil than the other areas. In addition, the independence tests from the mesh number were performed and the final solutions were obtained at 175000 nodes.

The mesh independence tests were performed at 5° angles of attack and $Re = 1.76 \times 10^6$ (Table 1).

Mesh structures used in numerical tests are given in Figures 1 and 2. Numerical tests were performed using

Ansyes Fluent commercial software to solve the conservation equations under continuous, incompressible and turbulent flow conditions. Realizable k-ε turbulence model was used as turbulence model.

Table 1. Mesh independence tests

Node Numbers	C _D
68700	0.02098
114780	0.01345
175000	0.01336
228790	0.01340

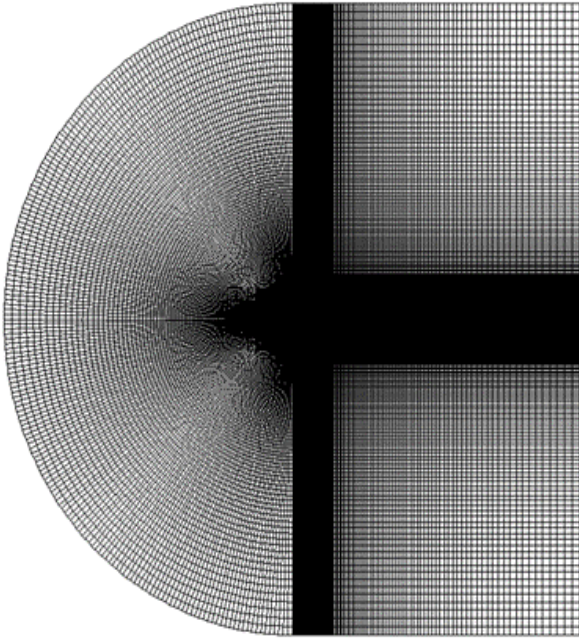


Figure 1. Structured C-Type mesh structure

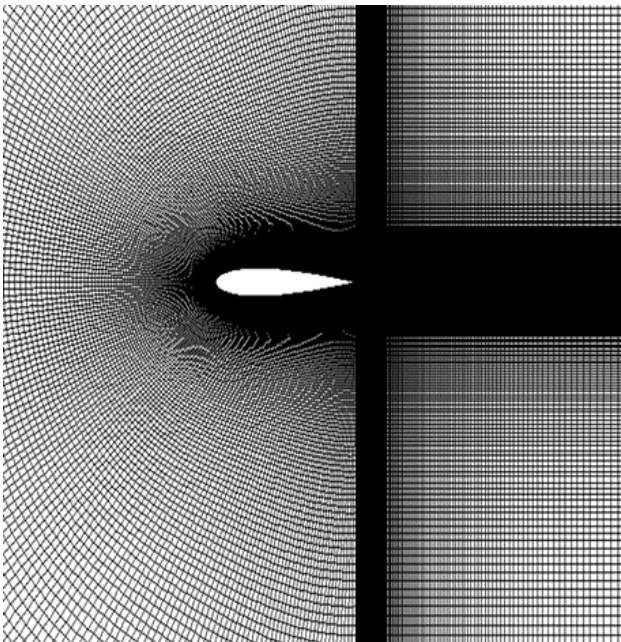


Figure 2. Close-up view of the dense mesh structure around the airfoil

2.2 Particle approach

Air-sand phase flow on the NACA 0012 airfoil is modeled using the Lagrangian Discrete Phase Model (DPM). As a solution approach, the change in momentum of a sand particle across each control volume is calculated by the following equation [20]:

$$F = \sum \left(\frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} (u_p - u) + F_{other} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad (1)$$

In accordance with the studies of Douvi et al. [20], where μ is the viscosity of the fluid, C_D the drag coefficient, Re the relative Reynolds number, ρ_p the density of the particle, d_p the diameter of the particle, u_p the velocity of the particle, u the velocity of the fluid, F_{other} other interaction forces, \dot{m}_p the particles mass flow rate and Δt the size of the time step.

The estimation of the pathline of each discrete-phase sand particle is performed by integrating the force balance on the particle. The particle inertia is equal to the forces acting on the particle. And in this case the drag force (F_D) is taken into account depending on the Reynolds number. F_D and Re can be written as:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (3)$$

The particle used for air+particle numerical tests has a diameter of 50 μm and a density of 2196 kg/m^3 .

Particle diameters, densities and volume fraction ratios used for the numerical tests dealt with regional environment system are also given in Table 2.

Table 2. Particle properties used in numerical tests

Material	Density (kg/m^3)	Diameter (mm)
Particle (Sand)	2196.06	0.5/0.1/0.3

The reason for particle properties in Table 2 is that there is more than one particle between 1-500 μm in diameter in the air and it is more realistic to evaluate the environment with the particles of various concentrations, diameters and flow velocities in the air.

3 Results and discussion

In this study, it is aimed to determine the optimum aerodynamic performance characteristics of the NACA 0012 airfoil in different operating environments (air, air+particle). In order to determine these characteristics, numerical tests were carried out at different particle diameters, attack angles and Reynolds numbers.

In numerical tests, factors such as mesh structure and number, numerical algorithms, turbulence models used for turbulent flows, wall functions are effective on the results. Therefore, the numerical technique needs to be verified first.

In numerical tests, the results obtained with $Re= 1.76 \times 10^6$, different angles of attack and different environments were compared with the results in the literature. The static pressure contours obtained from numerical tests at the boundary conditions specified in Figure 3 are given.

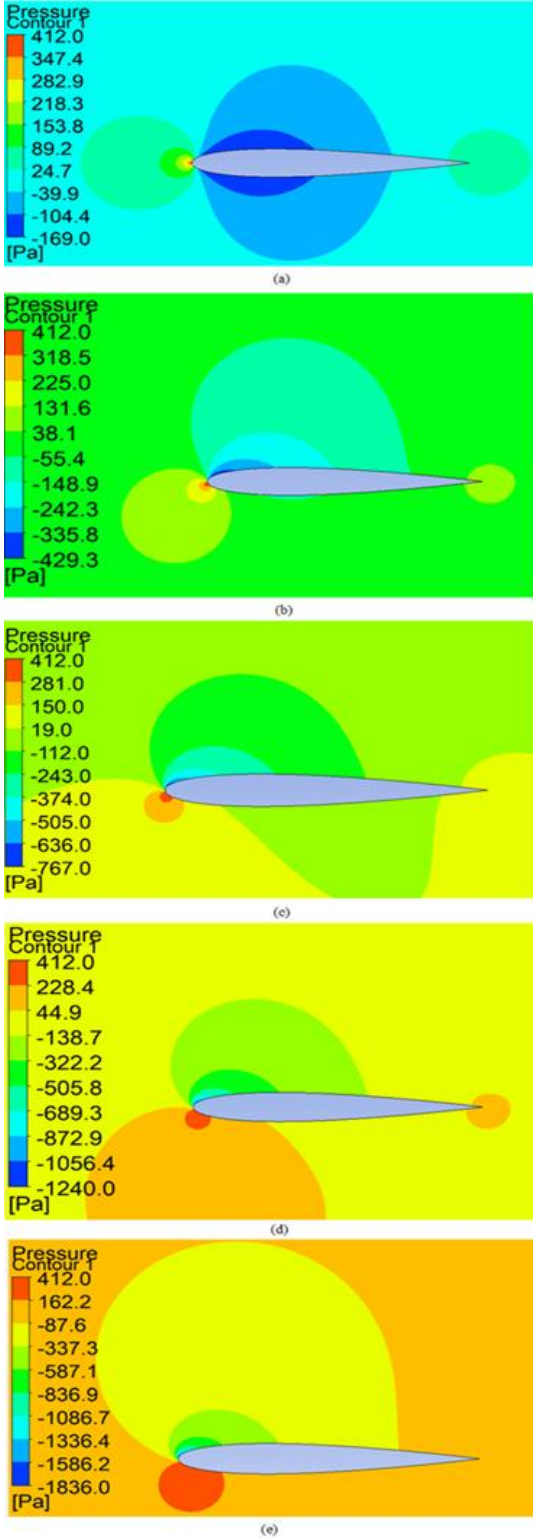


Figure 3. Contours of static pressure at (a) 0°, (b) 3°, (c) 5°, (d) 7° and (e) 9° angles of attack for air flow at $Re=1.76 \times 10^6$

This value is in the range of 401-404 Pa in the Ref. Douvi et al. [20]. The maximum difference was obtained around 2.7%. In Figure 4, a comparison of the results obtained from the numerical tests for different angles of attack, $Re= 1.76 \times 10^6$ and air-air+particle phases flow with the results in the literature [20-21] is given in order to evaluate the lift effects on the airfoil.

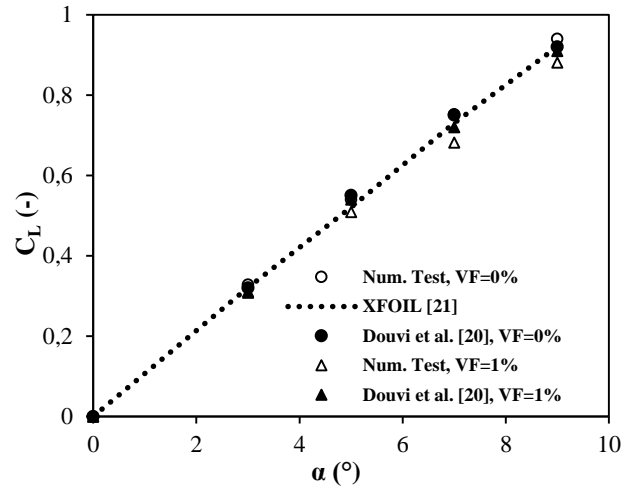


Figure 4. Comparison between literature [20-21] and numerical tests of the lift coefficient

As seen in Figure 4, the lift coefficient increases linearly with increasing angle of attack. This linear change continues until stall situations. This corresponds to angles of attack greater than 14° [20-21]. With the addition of 1% particles to air, there is a degradation in the lift coefficient.

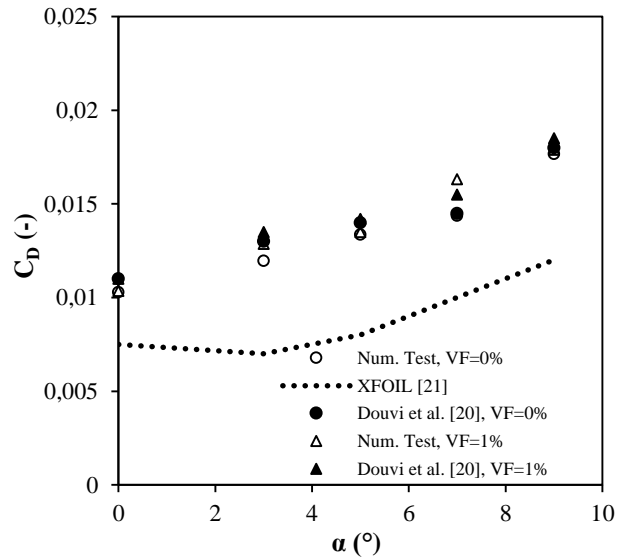


Figure 5. Comparison between literature [20-21] and Numerical tests of the drag coefficient

In Figure 5, a comparison of the results obtained from numerical tests for different angles of attack, $Re= 1.76 \times 10^6$ and air-air+particle phases flow with the results in the literature [20-21] is given in order to evaluate the effects of

drag on the airfoil. As can be seen from this comparison, it is seen that the results obtained from the numerical tests are in harmony with the values in the literature [20-21]. The reason why the estimates obtained from numerical tests are higher than the theoretical results is due to the assumption that the flow is completely turbulent by using a turbulence model. With the addition of 1% particles to air, there is a slight increase in the drag coefficient due to the increase in surface friction forces.

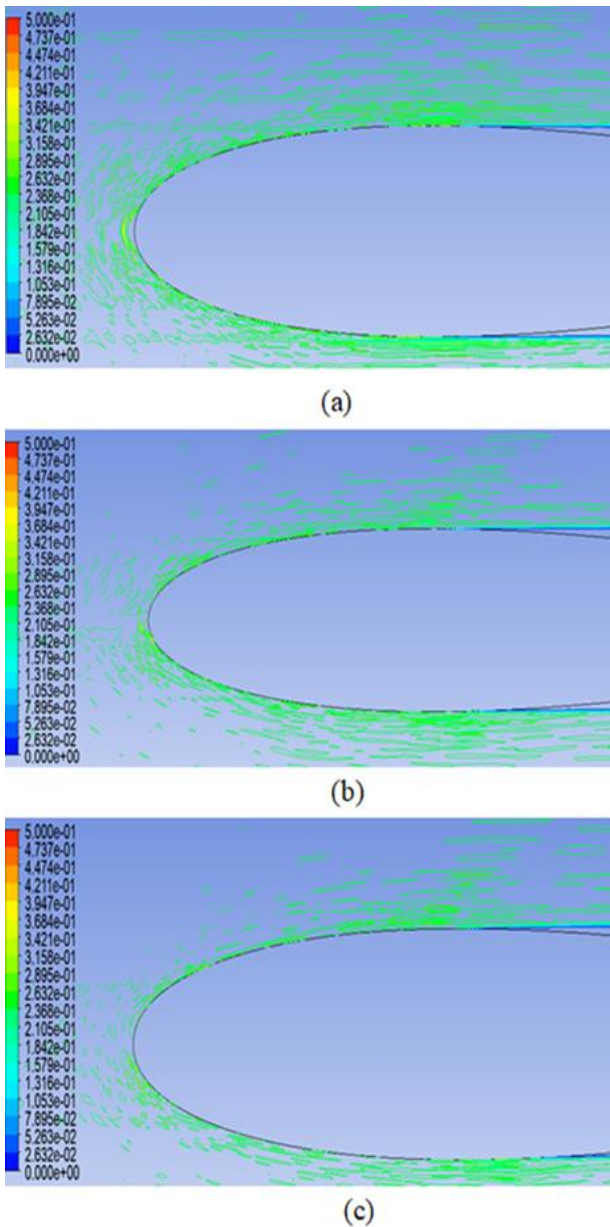


Figure 6. Comparison of contours of DPM concentration at (a) 0°, (b) 5° and (c) 9° angles of attack at $Re=1.76 \times 10^6$ for 1% concentration of particle in the air

When the DPM contours are investigated, it is seen that the particle concentration is intensified on the front surface of the airfoil at 0° angle of attack, and this concentration shifts to the middle sections as the angle of attack increases (Figure 6).

The results obtained from the numerical tests for DPM concentration are in good agreement with the values in the literature [20].

After the numerical technique was verified with the results given in the literature, numerical tests were carried out in flow structures and environments with the particles of various concentrations, diameters and flow velocities in the air.

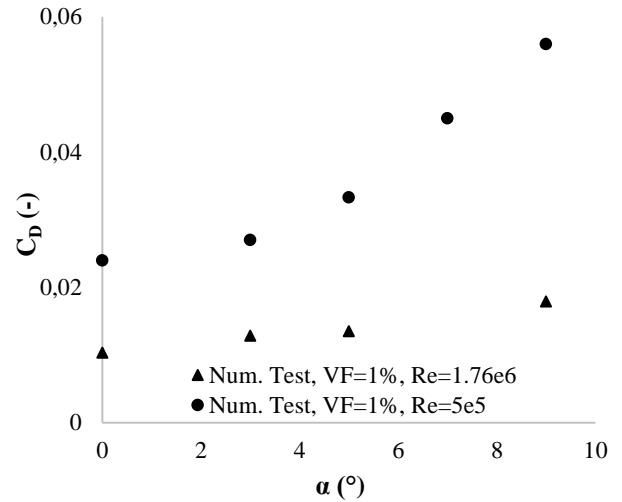


Figure 7. Comparison of drag coefficients for the air+particle (VF=1%) and the different attack angle around the airfoil for $Re=1.76 \times 10^6$ and $Re=5 \times 10^5$

In Figure 7, the comparison of drag coefficients for the air+particle (VF=1%) and the different attack angle around the airfoil for $Re=1.76 \times 10^6$ and $Re=5 \times 10^5$ is given. As can be clearly seen from this figure, the drag coefficient increases with decreasing Reynolds number. This is because viscous forces dominate over a large area of the airfoil.

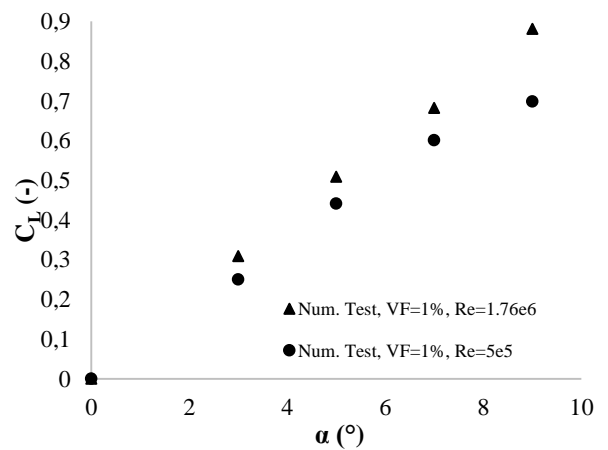


Figure 8. Comparison of lift coefficients for the air+particle (VF=1%) and the different attack angle around the airfoil for $Re=1.76 \times 10^6$ and $Re=5 \times 10^5$

Figure 8 gives the comparison of lift coefficients for the air+particle (VF=1%) and the different attack angle around the airfoil for $Re=1.76 \times 10^6$ and $Re=5 \times 10^5$. As can be clearly seen from this figure, the lift coefficient decreases with

decreasing Reynolds number. This is because viscous forces dominate over a large area of the airfoil.

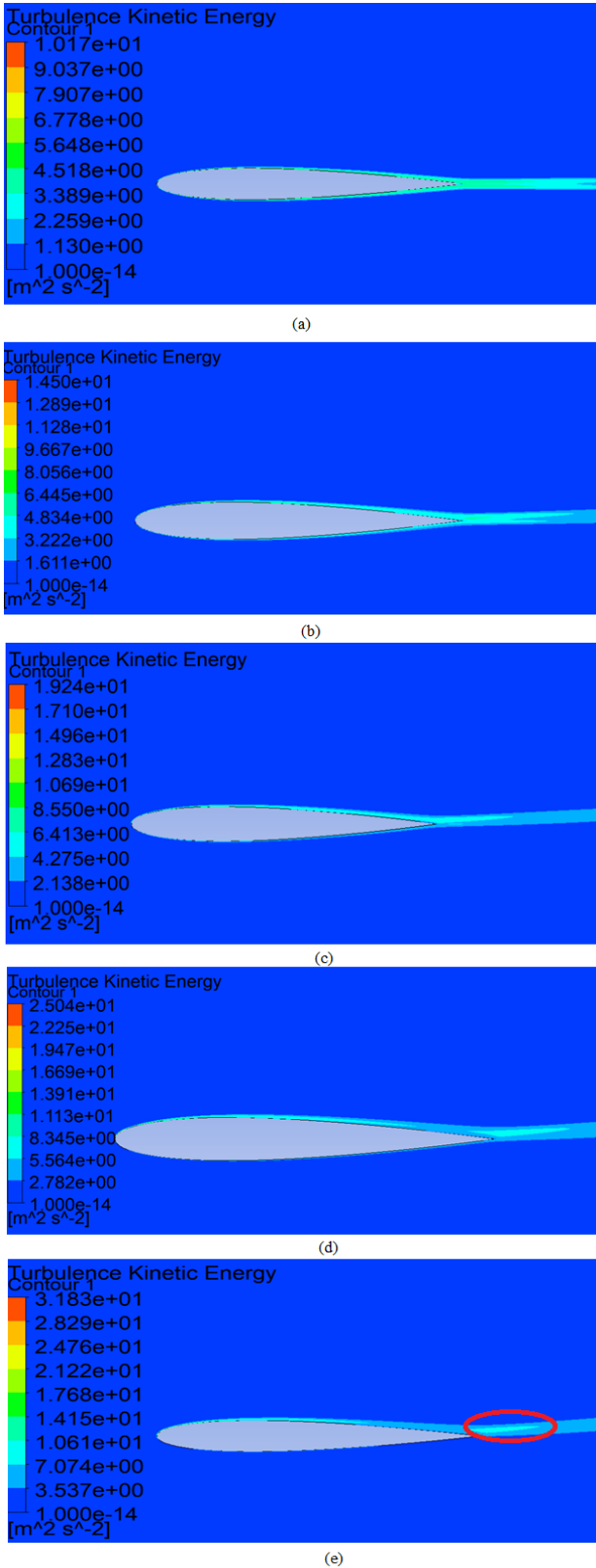


Figure 9. Contours of turbulence kinetic energy at (a) 0°, (b) 3°, (c) 5°, (d) 7° and (e) 9° angles of attack for air flow at $Re=1.76 \times 10^6$

Turbulence kinetic energy is one of the most important parameters to determine the aerodynamic properties of the airfoil. Figure 9 gives the turbulent kinetic energies around the airfoil at different angles of attack for $Re=1.76 \times 10^6$.

As can be seen in Figure 9 a, b and c, the turbulence kinetic energy value occurred in the tail region of the airfoil increases with the increase in the angle of attack and shifts towards the upper region of the airfoil at high attack angle. The region circled in red in Figure 9c shows that flow separation becomes evident at the 9° angle of attack. Because it is clearly seen that a weaker turbulent kinetic energy region occurs below this region.

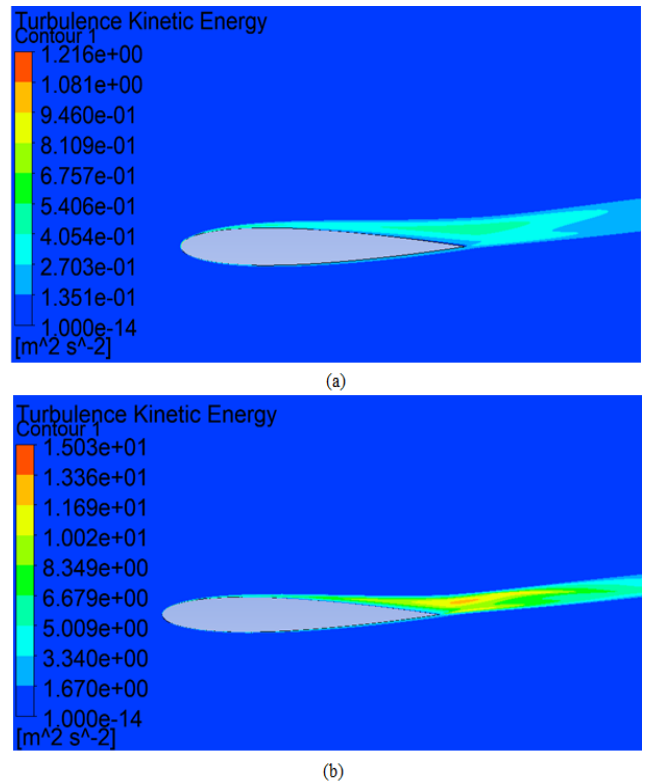


Figure 10. Contours of turbulence kinetic energy at (a) $Re=5 \times 10^5$ and (b) $Re=1.76 \times 10^6$ for 1% volume fraction ratio and 9° of attack angle

In Figure 10a in case of $Re=5 \times 10^5$ and 9° angle of attack and in Figure 10b for the same conditions and $Re=1.76 \times 10^6$, the turbulent kinetic energy contours for air+particle flow (VF=1%) around the airfoil are given. It is seen that the area and value of the separated region increase with the increase of the Reynolds number.

This is because the lift decreases and the drag increases with the increase of the viscous effects. Moreover, the area of the turbulent kinetic energy region, which is shifted from the tail region to the front of the airfoil at high angles of attack, becomes larger at low Reynolds numbers.

In Figure 11b, unlike Figure 11a, it is seen that the area and value of the separated region increase with the increase of the volume fraction ratio. This is because the lift decreases and the drag increases with the increase of the volume fraction ratio.

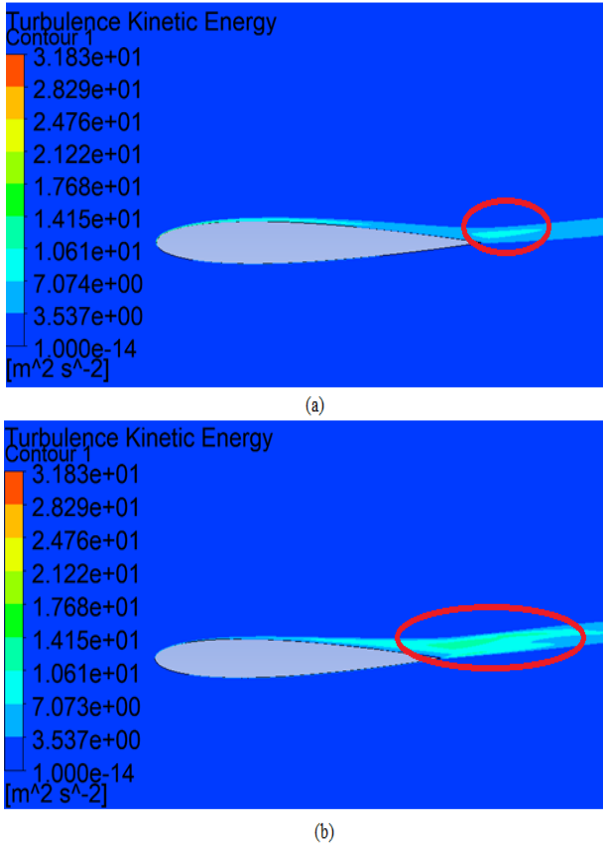


Figure 11. Contours of turbulence kinetic energy at (a) 0% and (b) 1% volume fraction ratios for flow at $Re=1.76 \times 10^6$ and 9° of attack angle

In order to examine the effects of sand particle diameters specified in the literature on aerodynamic performance as well as the effects of particle concentration on aerodynamic performance, numerical tests were carried out at 1% volume fraction in 3 different particle diameters (Figure 12-13).

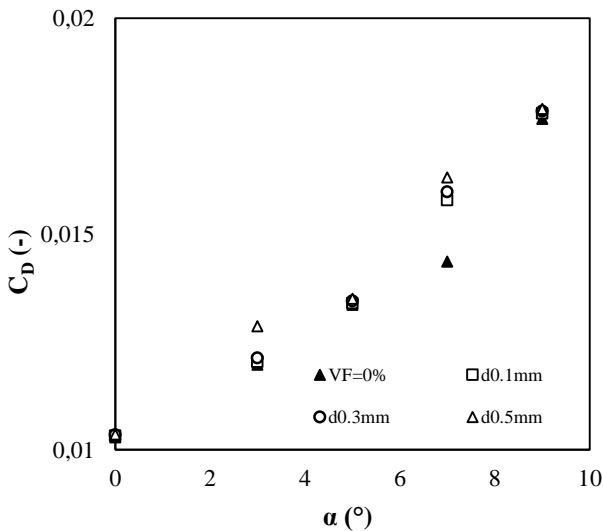


Figure 12. Comparison of Numerical tests of the drag coefficient obtained in different particle diameters at VF=1% and pure air (VF=0%)

Figure 12 is investigated, it is clearly seen that the presence of particle concentration in the pure air fluid has a direct and significant effect on the drag coefficient. In addition, the drag coefficient increases with the increase of particle diameter and angle of attack due to high skin friction.

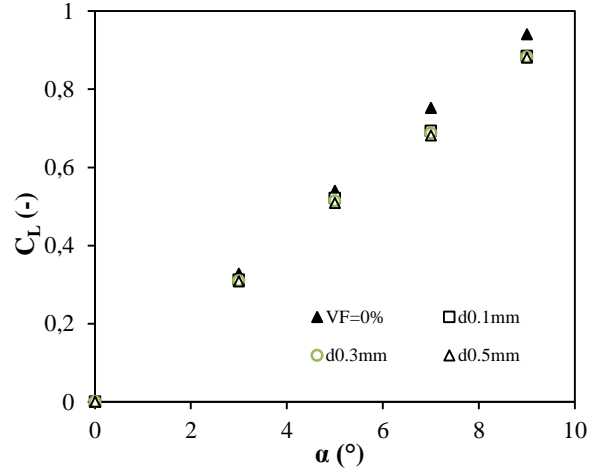


Figure 13. Comparison of Numerical tests of the lift coefficient obtained in different particle diameters at VF=1% and pure air (VF=0%)

The lift coefficient also decreases significantly with the presence of particles in pure air and with increasing particle diameter and angle of attack (Figure 13). This is reason due to the effect of gravitational forces.

When the numerical results obtained are evaluated, it can be stated that the drag and lift coefficients obtained in the numerical tests of the airfoils and in the experimental tests in the wind tunnel will differ from the values in the application area. Because, in the operation of airfoils in different regional environments, there are always particles of various concentrations and diameters in the air. In this case, the drag coefficient increases and the lift coefficient decreases.

4 Conclusion

This paper includes the investigation of turbulent kinetic energy structures formed during flow and the effects of the air containing the different diameters of particles and flow velocities in different regional areas on aerodynamic performance properties of NACA 0012.

The results obtained can be summarized as follows:

- Results obtained from the numerical tests for single and two phase fluid flow demonstrate good agreement with the value in the literature.
- Numerical test results indicate the turbulence kinetic energy value occurred in the tail region of the airfoil increases with the increase in the angle of attack and shifts towards the upper region of the airfoil at high attack angle. It is also seen that the area and value of the separated region increase with the increase of the Reynolds number. Moreover, the upper region of the airfoil at high attack angle becomes larger at low Reynolds numbers due to viscous effects.

- This paper recommended that the drag and lift coefficients obtained in the numerical tests of the airfoils and in the experimental tests in the wind tunnel will differ from the values in the application area. The reason for this is that there are always particles of varying concentrations and diameters in the air in different regional environments.
- It can be stated that the presence of particles in the air, even at very low particle concentrations, has a negative effect on aerodynamic performance.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 17

References

- [1] R.L. Fearn, Airfoil aerodynamics using panel methods, *The Mathematica Journal*, 10(4), 1-17, 2008. <https://dx.doi.org/10.3888/tmj.10.4-6>.
- [2] C. E. Douvi, I. A. Tsavalos and P. D. Margaritis, Evaluation of the turbulence models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0012 airfoil, *Journal of Mechanical Engineering Research*, 4(3), 100-111, 2012. <https://doi.org/10.5897/JMER11.074>
- [3] M. Adel, A comparative study for different shapes of airfoils, *International Journal of Mechanical Engineering*, 4, 27-39, 2019.
- [4] A. Bodavula, U. Guven and R. Yadav, Numerical analysis of protrusion effect over an airfoil at Reynolds Number 10^{-5} , *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2), 2583-2588, 2019.
- [5] V. Iliiev, M. Lazareviki and V. Aleksoski, Numerical and experimental investigation of airfoil performance in a wind tunnel, *American Journal of Engineering Research*, 9(4), 119-124, 2020.
- [6] J. C. M. Lin and L. L. Pauley, Low-Reynolds-number separation on an airfoil, *AIAA Journal*, 34(8), 1570-1577, 1996. <https://doi.org/10.2514/3.13273>
- [7] A. Choudhry, M. Arjomandi and R. Kelso, A study of long separation bubble on thick airfoils and its consequent effects, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 52, 84-96, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.12.001>
- [8] P. Jimenez, P. Lichota, D. Agudelo and K. Rogowski, Experimental validation of total energy control system for UAVs, *Energies*, 13(14), 1-18, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13010014>
- [9] K. Rogowski, G. Królak and G. Bangsa, Numerical study on the aerodynamic characteristics of the NACA 0018 airfoil at low Reynolds Number for Darrieus wind turbines using the transition SST model, *Processes*, 9(3), 477, 2021. <https://doi.org/10.3390/pr9030477>
- [10] M. Umaphathi and N. Soni, Comparative analysis of airfoil NACA 2313 and NACA 7322 using computational fluid dynamics method, *International Journal of Scientific Progress and Research*, 12(04), 193-198, 2015.
- [11] N. Singh, Analysis of aerodynamic characteristics of various airfoils at sonic speed, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5(9), 405-411, 2016.
- [12] R. I. Rubel, M. K. Uddin, M. Z. Islam and M. Rokunuzzaman, Comparison of aerodynamics characteristics of NACA 0015 & NACA 4415 aerofoil blade, *International Journal of Research-Granthaalayah*, 5(11), 187-197, 2017. <https://doi.org/10.20944/preprints201610.0095.v1>
- [13] R. I. Pranto and M. I. Inam, Numerical analysis of the aerodynamic characteristics of NACA-4312 airfoil, *Journal of Engineering Advancements*, 01(02), 29-36, 2020.
- [14] V. Dhiyyadharshini, R. Krishna and V. Kamaleshwari, Investigation of aerodynamic efficiency on NACA 2412 airfoil, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10(9), 725-728, 2021.
- [15] A. Shabur, A. Hasan and M. Ali, Comparison of aerodynamic behaviour between NACA 0018 and NACA 0012 airfoils at low Reynolds Number through CFD analysis, *Advancement in Mechanical Engineering and Technology*, 3(2), 1-8, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4003677>
- [16] H. Fatahian, H. Salarian, M. E. Nimvari and J. Khaleghinia, Numerical simulation of the effect of rain on aerodynamic performance and aeroacoustic mechanism of an airfoil via a two-phase flow approach, *Applied Sciences*, 2(5), 867, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2685-4>
- [17] P. Haines and J. Luers, Aerodynamic penalties of heavy rain on landing airplanes, *Journal of Aircraft*, 20(2), 111-119, 1983. <https://doi.org/10.2514/3.44839>
- [18] Y. Cao, Z. Wu and Z. Xu, Effects of rainfall on aircraft aerodynamics, *Progress in Aerospace Sciences*, 71, 85-217, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.07.003>
- [19] Z. Wu and Y. Cao, Numerical simulation of flow over an airfoil in heavy rain via a two-way coupled Eulerian-Lagrangian approach, *International Journal of Multiphase Flow*, 69, 81-92, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.11.006>
- [20] D. C. Douvi, E. C. Douvi and D. P. Margaritis, Computational study of NACA 0012 airfoil in air-sand particle two-phase flow at Reynolds Number of $Re=1.76 \times 10^6$, *International Journal of New Technology and Research*, 5(4), 101-108, 2019. <https://doi.org/10.31871/IJNTR.5.4.18>
- [21] M. Drela, XFOIL: An analysis and design system for low Reynolds Number airfoils, *Springer-Verlag*, 54, 1-12, 1989. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84010-4_1.





Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikroyapısal, termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Investigation of microstructural, thermal and mechanical properties of Al₅₀Si₂₅B₂₅ alloy

Hakan Yaykaşlı^{1,*} , Musa Gögebakan² 

¹ Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, Elektronik Bölümü, 46300, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 46000, Kahramanmaraş, Türkiye

Öz

Bu çalışmada Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımı ark ergitme yöntemi ile külçe olarak üretilmiştir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının faz analizi X-ışını difraksiyonu (XRD), morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile termal özellikleri ise diferansiyel termal analiz (DTA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile araştırılmıştır. Alaşımın mekanik özelliği Vickers mikrosertlik (HV) testi ile incelenmiştir. XRD analizinden, Bor (B) ve Silisyum (Si) atomlarının Al kafesi içerisinde çözünerek α-Al(B,Si) katı çözeltilisini oluşturduğu tespit edilmiştir. XRD ve SEM sonuçları, alaşımın mikro yapısının, α-Al(B,Si) katı çözeltisi, AlB₂ intermetalik fazı ve Si fazlarından oluştuğunu göstermiştir. SEM sonuçları alaşımların morfolojik yapısının dendritik ve ötektik yapılar şeklinde oluştuğunu göstermiştir. DSC ve DTA sonuçları, α-Al(B,Si) fazının ergimesini ifade eden bir endotermik pik göstermiştir. Alaşımın mikro sertlik değeri oda sıcaklığında 108±15 HV olarak ölçülmüştür. Bu değer termal işlem sonucu artmış ve 300 °C'de 232±9 HV değerine çıkmıştır. 300 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda alaşımın mikrosertlik değerinin azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: AlSiB alaşımı, Mikrosertlik, Mikroyapı, Ark ergitme

1 Giriş

Son yıllarda teknolojik gelişmelerin hız kazanması, daha üstün özellikler gösteren malzemelere olan ihtiyacı artmasına neden olmuştur. Bu malzemelerden biri olan alaşımlar bazı üstün özelliklerinden dolayı sanayinin birçok alanında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Sanayinin artan malzeme ihtiyacını karşılamak amacıyla birçok yeni alaşım üretilmiş ve saf malzemelerden daha üstün özellikler gösteren bazı alaşımlar sanayinin birçok alanında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Alüminyum esaslı alaşımlar, düşük yoğunluklu ve dolayısıyla düşük özgül ağırlık, yüksek spesifik mukavemet, kolay şekil verilebilirlik, mükemmel korozyon direnci, iyi termal ve elektriksel özellikleri nedeniyle birçok uygulama için en yaygın kullanılan malzemelerden biridir [1–5]. Bu özelliklerinden dolayı, özellikle Al-Si alaşımları başta otomotiv sektörü olmak üzere ev eşyalarından uçak sektörüne kadar geniş bir alanda

Abstract

In this study, Al₅₀Si₂₅B₂₅ alloy was produced as ingot by arc melting method. The microstructure of the Al₅₀Si₂₅B₂₅ alloy was investigated by X-ray diffraction (XRD), the morphological properties were investigated by scanning electron microscopy (SEM), and its thermal properties were investigated by differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC). The mechanical properties of the alloy were investigated by Vickers microhardness (HV) test. The XRD result showed that B and Si atoms dissolved in the Al lattice to form the intermetallic phase of the α-Al (B, Si) solid solution. XRD and SEM results showed that the microstructure of the alloys consisted of α-Al(B,Si) solid solution, Si and AlB₂ intermetallic phases. SEM results showed that the morphological structure of the alloys formed as dendritic and eutectic structures. DSC and DTA results showed an endothermic peak indicating the melting of the α-Al(B,Si) phase. The microhardness value of the alloy was measured as 108±15 HV at room temperature. This value increased as a result of the heat treatment and increased to 232±9 HV at 300 °C. It was observed that the microhardness value of the alloy decreased at temperatures higher than 300 °C.

Keywords: AlSiB alloy, Micro-Hardness, Microstructure, Arc melting

tercih edilmektedir. Bu alaşımların özelliklerini daha da geliştirerek kullanımının artması amacı ile mikroyapının özelliklere etkisi üzerine daha derin çalışmalar yapılmasına ihtiyaç vardır. Al-esaslı alaşımların özelliklerini iyileştirmek amacıyla alüminyuma farklı elementler eklenerek ve farklı metotlar kullanılarak yeni alaşımlar elde edilmesi üzerine yoğun bir araştırma yapılmaktadır. Bu amaç için Ni, Fe, Mg, Si ve Zn gibi elementler çok tercih edilmektedir [6–11]. Al-esaslı ikili, üçlü ve çoklu alaşımların üretilmesi, özelliklerinin araştırılması ve geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalarda, alaşımı oluşturan element sayısı ve bu elementlerin alaşım içerisindeki oranları, alaşımın özelliklerini etkileyen en önemli faktörler olduğu rapor edilmiştir. Bunun yanında alüminyuma eklenen alaşımlama elementleri, alüminyumun mukavemet ve sertlik özelliklerini daha da geliştirerek onu diğer metallerden üstün kılmaktadır. Dolayısıyla alüminyum alaşımları artan kullanım alanı ile vazgeçilmez malzemeler haline gelmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakan.yaykasli@istiklal.edu.tr (H. Yaykaşlı)
Geliş / Received: 18.03.2022 Kabul / Accepted: 03.12.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023
doi: 10.28948/ngumuh.1089483

Bir alaşımanın özellikleri mikro yapısına da bağlıdır. Mikro yapı ise alaşımı üretme metoduna bağlı olduğu gibi, alaşımı oluşturan elementlere, bu elementlerin alaşım içerisindeki oranlarına, mikro yapıyı oluşturan fazlara, bu fazların boyutlarına ve alaşım içerisindeki dağılımlarına bağlıdır. Çok bileşenli alaşımların mikroyapıları genellikle birden çok intermetalik faz içerir ve bu nedenle bu alaşımların mekanik özellikleri zayıftır. 2004 yılında tanımlanan yüksek entropili alaşımlar tek fazlı olduğu için mekanik özellikleri çok fazlı alaşımlardan daha iyidir [12]. Yüksek entropili alaşımların bu özellikleri, alaşımların faz yapılarının, alaşımın özelliklerini etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermiş ve bu konuda yoğun çalışmalar yapılmıştır. Diğer taraftan, alaşımların farklı metotlar kullanılarak üretilmesi, incelenmesi ve mevcut özelliklerinin daha da geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar, yarı-kararlı alaşımlar olarak tanımlanan ve mikroyapısı tamamen farklı olan yeni alaşımların keşfedilmesine yol açmıştır. Amorf alaşımlar, nanokristaller ve kuazikristal alaşımlar bu tür alaşımlardan bazılarıdır. Bu tür kristal yapıya sahip alaşımların mekanik özelliklere etki pozitif katkı sunmaktadır. Örneğin, nanokristal alaşımlar, kristal boyutu 100 nm'nin altında olan alaşımlardır. Nanoboyutlu kristallerin alaşım içerisinde homojen bir şekilde dağılması alaşıma daha üstün özellikler kazandırmaktadır. Dolayısıyla, nanokristallerden oluşan malzemelerin mekanik özellikleri başta olmak üzere birçok özellikleri aynı kompozisyondaki kristal karışımlarından daha üstün özellikler sergilemektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda nanokristal yapıda üretilen bazı Al-esaslı alaşımların mekanik özellikleri, kristal yapıdaki Al-esaslı alaşımların mekanik özelliklerinden daha iyi olduğu rapor edilmiştir [13, 14].

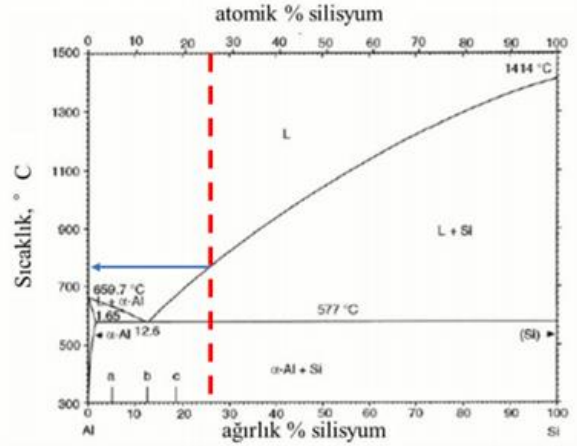
Alaşımların üretilmesi için, birçok teknik geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları ark-ergitme, gaz atomizasyon, hızlı katılaştırma ve mekanik alaşımlama gibi alaşım üretme teknikleridir. Üretilen alaşımın mikro yapısı, miktarı, geometrik şekli, alaşımı oluşturan elementlerin ergime sıcaklıkları arasındaki fark, maliyet ve zaman gibi faktörler dikkate alınarak bu tekniklerden biri tercih edilmektedir. Örneğin hızlı katılaştırma ile alaşım, ince şeritler halinde üretilirken, normal katılaştırma ile külçeler halinde ve mekaniksel alaşımlama tekniği ile tozlar halinde üretilmektedir.

Mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan alüminyumun en belirgin özelliği hafifliğidir. B (2.47 g/cm³) ve Si (2.33 g/cm³)'un yoğunlukları, Al'un (2.70 g/cm³) yoğunluğundan daha düşük olduğu için, Si ve B, Al-esaslı alaşımların yoğunluğunu düşürecek az sayıdaki elementlerdendir. Dolayısıyla hafifliği ile birlikte mekaniksel özelliklerinin geliştirilmesi endüstri sanayisi için önemlidir. Diğer taraftan AlSiB alaşımı yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu ve kullanışlı fiziksel özelliklere sahip malzemeler olarak pratik uygulama için iyi bir seçimdir. Bu durumlar dikkate alınarak bu çalışmada Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımı ark ergitme yöntemi ile külçe halinde üretilmiştir. Şekil 1 ve Şekil 2'deki Al-Si ve Al-B denge faz diyagramında [15] alaşımların kompozisyonu ve yaklaşık ergime sıcaklıkları gösterilmiştir.

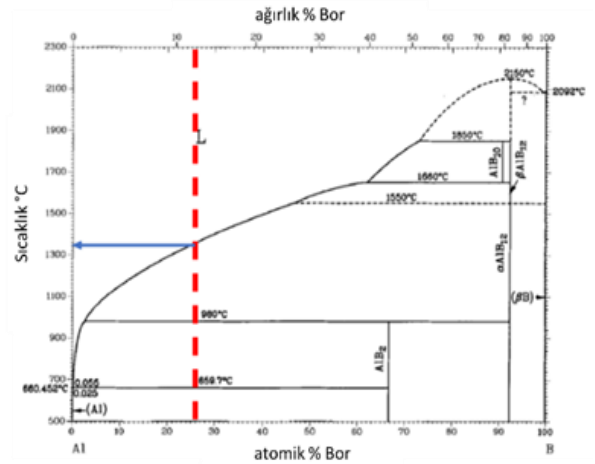
Al-esaslı alaşımlar konusunda birçok çalışma olmasına rağmen, AlSiB ve özelliklede yüksek miktarda Si ve B içeren Al₅₀Si₂₅B₂₅ gibi alaşımlar konusunda bilgilerimiz dâhilinde çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımı ark ergitme tekniği ile külçe halinde üretilmiştir. Üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının, faz analizi XRD ile morfolojik özellikleri SEM, termal özellikleri DSC ve DTA ve mekanik özellikleri Vickers mikrosertlik testi ile incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada kullanılan saf Al, Si ve B elementlerinin bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu çalışmada Al₅₀Si₂₅B₂₅ (% atomik) alaşımı ark ergitme metodu ile külçe halinde üretilmiştir. Bunun için Edmund Bühler MAM-1 marka ark ergitme cihazı kullanılmıştır. Alaşımı oluşturan başlangıç elementleri Al (99.9%), Si (99.7%), ve B (99.5%) yüksek saflıkta Merck ve Alfa Aesar firmalarından temin edilmiştir. Bu alaşımı oluşturan elementlerin oranları belirlenirken, elementlerin ergime sıcaklıkları arasındaki fark oldukça yüksek olduğu için Şekil 1 ve Şekil 2'de görülen Al-Si ve Al-B ikili faz diyagramları [15-17] dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Al-Si ikili faz diyagramı [16]



Şekil 2. Al-B ikili faz diyagramı [17]

Tablo 1. Alaşımda kullanılan elementlerin bazı özellikleri

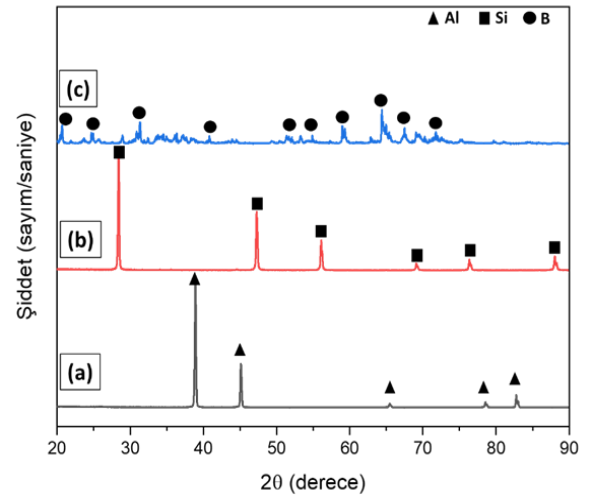
Element	Ergime Sıcaklığı(°C)	Özgül Ağırlık(g/cm ³)	Atom Kütle(g/mol)	Kristal Yapı	Atomik yarıçap (Å)
Al	660.4	2.70	26.98	YMK	1.43
Si	1414	2.33	28.09	Elmas	1.17
B	2092	2.47	10.81	Rombohedral	0.46

Elementler 10 gram olacak şekilde ve belirlenen bileşim oranına göre tartıldıktan sonra ultrasonik banyoda 15 dakika etanol içerisinde temizlenmiştir. Temizlenen saf elementler vakum eritme cihazının su soğutmalı bakır potasına yerleştirilmiştir. Alaşımı oluşturan saf elementlerin ergime işlemi sırasında oksitlenmeyi engellemek amacı ile potanın farklı bir noktasına zirkonyum külçesi bırakılmıştır. Eritme işlemini vakumlu bir ortamda gerçekleştirmek için, 30 dakika vakumlama yapıldıktan sonra yüksek saflıkta argon gazı ile doldurularak ortam inert hale getirilmiştir. Böylece elementler ergitilerek alaşım külçe olarak üretilmiştir. Alaşımın homojenliğini sağlamak için ergitme işlemi beş kez tekrar edilmiştir. Homojen bir şekilde katılaştıran alaşım ergitme cihazından çıkarılmıştır. Külçe halinde üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikroyapısı, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu analizler için, alaşımlar uygun boyutlarda ve şekillerde kesilmiş, bakalite alma, zımpara ve parlatma işlemleri yapılarak uygun hale getirilmiştir. Alaşımın faz analizi X-ışını kırınımı (XRD) Panalytical Philips X'Pert PRO marka cihaz ile, 40 kV ve 30 mA, monokromatik CuK_α radyasyonu ($\lambda = 0.154056$ nm), 20° den 90° ye kadar 0.02° adım aralığında ve her adımda 1 s bekletilerek yapılmıştır. Alaşımların morfolojik özellikleri ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile BSD detektörü kullanılarak incelenmiştir. Alaşımların termal özellikleri, Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile yapılmıştır. Termal analiz için Perkin Elmer Sapphire DSC ve Perkin-Elmer's Diamond DTA cihazları kullanılmıştır. Bunun için numuneler yaklaşık 25-45mg miktarında alınarak seramik kap içerisine konulmuştur. Numuneler DSC ile 200°C' den 700 °C'ye kadar 10 °C/dak ısıtma hızı ve DTA ile 250°C' den 650 °C'ye kadar 10 °C/dak ısıtma hızı ve N₂ gazı atmosferi altında yapılmıştır. Alaşımların mikrosertliklerini ölçmek için Vickers uçlu Shimadzu HMV-2 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, 100gr yükte 10 s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Her numune için 10 farklı yüzeyden ölçüm yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Alaşım, atmosferik ortamda 2 saat süre ile 200°C, 300°C, 400°C ve 500°C sıcaklıklarında tavlama ve Vickers mikrosertlik değerleri ölçülmüştür.

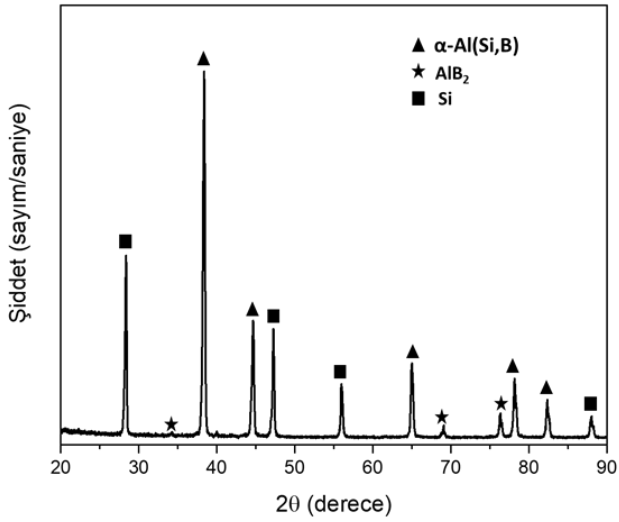
3 Bulgular ve tartışma

Ark ergitme tekniği ile üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının faz ve mikro yapısı XRD ile araştırılmıştır. Alaşımı oluşturan Al, Si ve B elementleri XRD ile analiz edilerek bu saf elementlerden yansıyan pikler tayin edilmiştir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımını oluşturan Al, Si ve B elementlerinin XRD grafiği Şekil 3'de verilmiştir. Alaşımların faz tanımlamaları X'Pert High Score yazılımı, ICDD-PDF 2 kütüphanesi ile belirlenmiştir. Şekil 3'de, Al, Si ve B elementlerinden yansıyan pikler açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 3 (a)'da saf alüminyumun XRD deseninde ICSD referans kodu: 98-

006-2955, kristal yapısı kübik olan ve $2\theta=38.53^\circ$, 44.79° , 65.20° , 78.36° ve 82.58° açılarından yansıyan kristal pikler görülmektedir. Bu piklerin miller indislerinin sırasıyla; (111), (200), (220), (311) ve (222) olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3 (b) saf silisyumun XRD deseninde ICSD referans kodu: 98-001-3010, kristal yapısı elmas olan ve $2\theta=28.44^\circ$, 47.30° , 56.12° , 69.13° , 76.38° ve 88.03° açılarından yansıyan pikler görülmektedir. Silisyumdan yansıyan piklerin miller indislerinin sırasıyla; (111), (220), (311), (012), (331) ve (422) olduğu tespit edilmiştir. Şekil 1 (c)'de görüldüğü gibi, Bor elementinden yansıyan piklerin şiddetleri Al ve Si elementlerinden yansıyan piklerin şiddetinden oldukça düşüktür. Bunun nedeni, B elementinin camsı, yani amorf bir yapıya sahip olmasıdır. Şekil 4'de Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının XRD grafiği verilmiştir. Şekil 4'deki XRD grafiğinde görüldüğü gibi Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikro yapısında α -Al (Si,B) katı çözeltilisi, Si ve AlB₂ intermetalik fazları gözlenmiştir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının XRD grafiğinde gözlenen α -Al (Si,B) fazı, saf alüminyum fazından farklı olarak Si ve B elementlerinden oluşmaktadır. Şekil 4'de gözlenen fazlar arasında α -Al (Si, B) ve Si fazlarından yansıyan pikler belirgin bir şekilde gözlenirken, AlB₂ fazından yansıyan piklerin şiddeti oldukça düşüktür. Bu durum, yukarıda da belirtildiği gibi B'nin amorf bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, ark ergitme yöntemi ile üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikro yapısı, α -Al (Si,B), Si ve AlB₂ fazlarından oluşmaktadır. Bu sonuçlar daha önce yapılan ve Al, Si ve B elementlerini içeren alaşımın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir [6, 7, 18]. Bunun yanında, ark ergitme yöntemi ile üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımının mikro yapısında gözlenen fazlar, Al-Si (Şekil 1) ve Al-B (Şekil 2) faz diyagramları ile uyum içindedir.



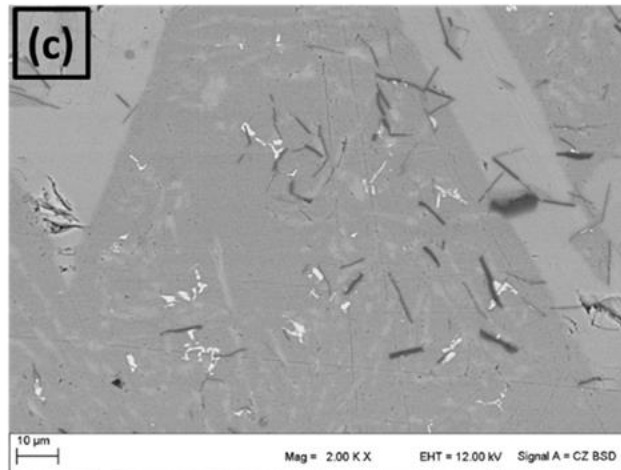
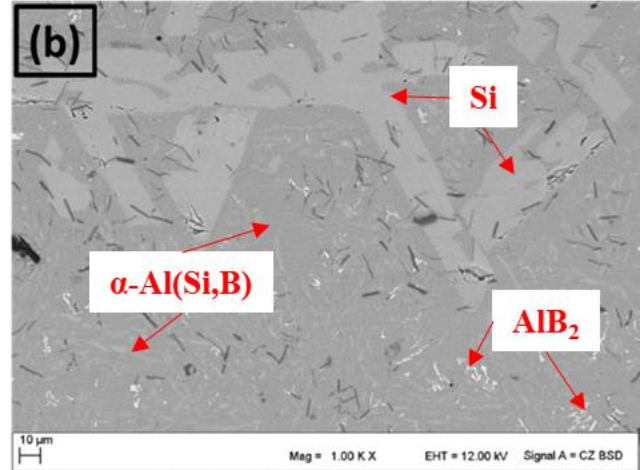
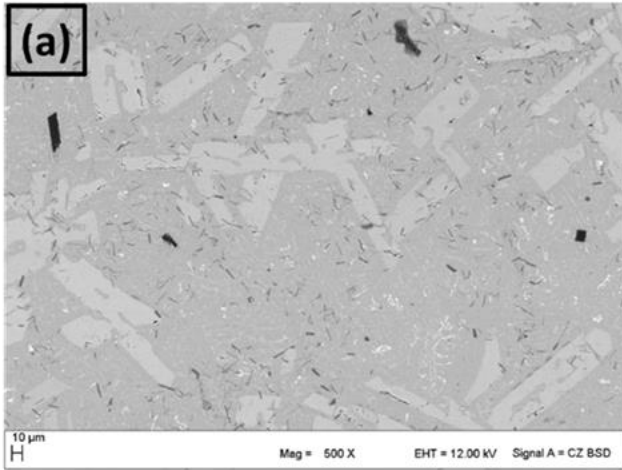
Şekil 3. (a) saf alüminyum, (b) saf silisyum, (c) saf bor XRD desenleri



Şekil 4. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının XRD desenleri

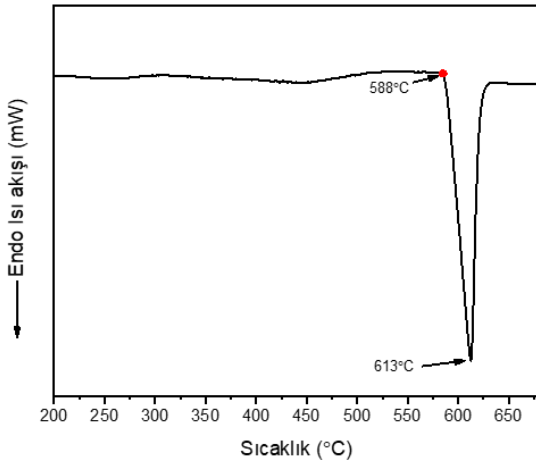
Ark ergitme tekniği ile üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının mikro yapısını ve morfolojik özelliklerini daha detaylı incelemek amacıyla, alaşım SEM ile incelenmiştir. Alaşımın SEM görüntüsü Şekil 5’de verilmiştir. SEM fotoğrafları; 500x, 1000x ve 2000x kat büyütme ile elde edilmiştir.

Alaşımın SEM fotoğrafında farklı morfolojik yapılar görülmektedir. Bu yapılardan en belirgin olarak gözlenen, beyaz veya açık-gri renkte olan kalın çubuksu yapılardır. Diğer bir yapı, koyu-gri renkli olan ve mikro yapının tamamını kaplayan temel alandır. Ayrıca beyaz renkli noktamsı yapılar görülmektedir. SEM görüntüsünde belirlenen üç ayrı morfolojik yapı, üç ayrı faz olarak tanımlanmaktadır. Bu yapılardan koyu-gri renkli olan ve alaşımın tamamını kaplayan temel alanın α-Al (Si,B) katı çözeltisini, açık-gri renkte olan kalın çubuksu yapılar Si fazını ve beyaz renkli olup az miktarda bulunan noktamsı ve kırık yapılar ise AlB₂ fazını temsil etmektedir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının SEM sonucu XRD sonucu ile uyum içindedir. Ayrıca, Şekil 5’de SEM fotoğrafında Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının mikro yapısının dendritik ve ötektik yapılardan oluştuğu ve bu ötektik fazda oluşan silisyumun morfolojisine dikkat edilecek olursa kalın ve uzun çubuksu yapıda şekillendiği görülecektir. Dolayısıyla Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının mikro yapısında, dendritik ve ötektik yapıdaki Si ve AlB₂ fazlarının, alüminyumun matrisinden ayrı olarak süresiz yapıda meydana geldiğini göstermektedir. Daha önce yapılan bazı çalışmada benzer yöntemle üretilen Al-esaslı alaşımlarında benzer morfolojik yapı ve fazlar tespit edilmiştir [19–22].



Şekil 5. Ark ergitme tekniği ile üretilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımlarının SEM fotoğrafı

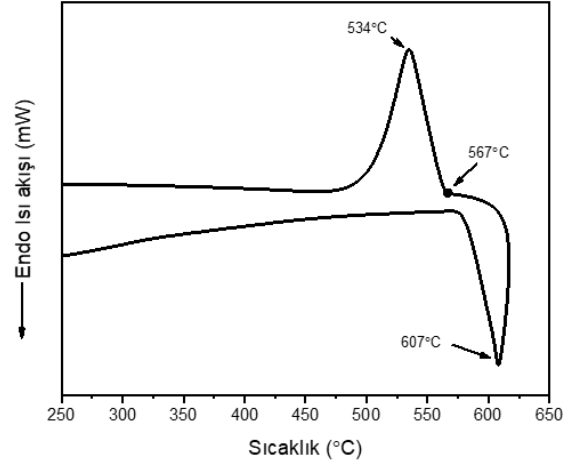
Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının termal özellikler DSC ve DTA ile incelenmiştir. DSC ve DTA eğrilerinde endotermik ve ekzotermik pikler ile alaşımda oluşan faz dönüşümleri belirlenmektedir. Endotermik reaksiyon ısıtma sırasında ergimeyi ifade eden ve ısı alan bir reaksiyondur. Numuneler DSC ile 200°C' den 700 °C'ye kadar 10 °C/dak ısıtma hızı ve DTA ile 250°C' den 650 °C'ye kadar 10 °C/dak ısıtma ve soğutma hızında ve N₂ gazı atmosferi altında yapılmıştır. Şekil 6 ve Şekil 7' de Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının sırasıyla DSC ve DTA sonuçları görülmektedir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının Şekil 6' da DSC analizi sonucunda 613°C de bir endotermik pik görülmektedir. Bu endotermik pik, Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının XRD grafiğinde gözlenen, α-Al (Si,B) fazının ergime sıcaklığını ifade etmektedir. Bu fazın ergime başlangıç sıcaklığının 588°C olduğu görülmektedir. Alaşımanın XRD grafiğinde gözlenen Si ve AlB₂ fazlarına ait endotermik pik gözlenmemesi Si ve AlB₂ fazlarının ergime sıcaklıklarının 700°C den çok daha yüksek olmasındadır. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının termal özellikleri aynı zamanda DTA ile incelenmiştir. DTA'nın DSC'den farkı, DSC ile sadece ısıtma işlemi yapılırken, DTA ile ısıtmanın yanında soğutma da yapabilmektedir. Şekil 7' de görüldüğü Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının DTA sonucu, DSC sonucu ile benzerdir. Numunenin ısıtma işlemi sırasında 607 °C bir endotermik pik gözlenmiştir. Diğer taraftan numunenin soğutulması sırasında 534 °C de bir ekzotermik pik gözlenmiştir. Bu ekzotermik pik, α-Al (Si,B) fazının katılaşmasını ifade etmektedir ve bu fazın katılaşmaya 567 °C de başladığı görülmektedir.



Şekil 6. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının DSC grafiği

Bu çalışmanın bir amacı da yoğunluğu düşük alaşım üretmektir. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımı gibi Al- esaslı hafif alaşımlar

için yapılan araştırmaların öncelikli nedenleri yoğunluk/mukavemet özelliğinin iyileştirilerek kullanım alanlarının genişletilmesidir. Bundan dolayı alaşımların mekanik özelliklerinin belirlenmesi literatür ve sanayi için önem arz etmektedir. Mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde sertlik testi ilk sırada yer almaktadır. Ark ergitme ile elde edilen Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Vickers mikrosertlik testi seçilmiştir.



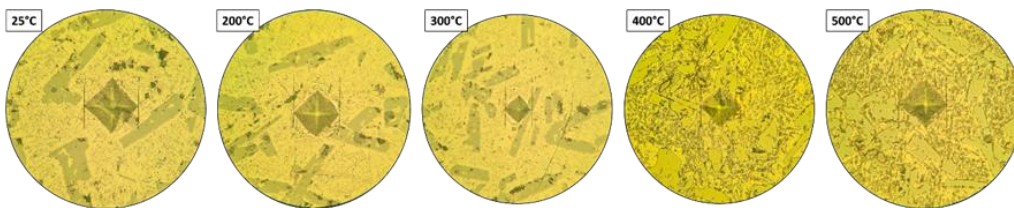
Şekil 7. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının DTA grafiği

Vickers mikrosertlik (HV) testinde, malzemeye belirli süre boyunca statik bir yük uygulanarak bu yükün malzeme üzerinde oluşturduğu plastik deformasyon izi ölçülerek malzemenin mikrosertlik değeri hesaplanır. Vickers mikrosertlik değeri aşağıdaki eşitlikle (Denklem 1) hesaplanmaktadır.

$$HV = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854(P)}{d^2} \quad (1)$$

Burada; P yük, d yükün oluşturduğu izin köşegen uzunluklarının ortalaması, θ elmas ucun yüzeyleri arasındaki 136° açıdır. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımı için 10 farklı bölgeden ölçümler yapılarak değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

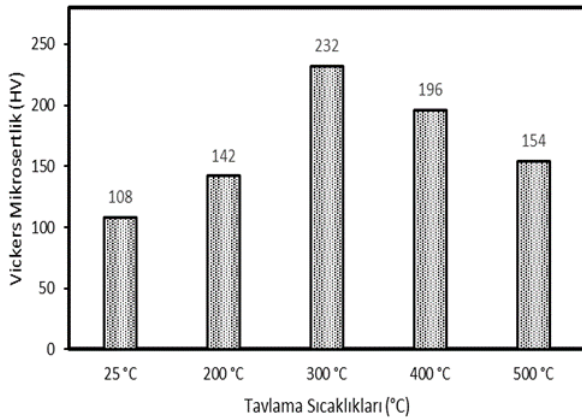
Alaşımanın sertlik değerinin sıcaklıkla değişimini anlamak için numuneler farklı sıcaklıklarda tavlandıktan sonra sertlik değerleri ölçülmüştür. Malzemenin Vickers mikrosertliği, bu izin büyüklüğü ile ters orantılıdır. Şekil 8' de Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının mikrosertlik test sonucu yüzeyde oluşan izlerin görünümü verilmiştir.



Şekil 8. Al₅₀Si₂₅B₂₅ alaşımasının vickers mikrosertlik test izlerinin görünümü

Şekil 8’de görüldüğü gibi 300 °C’de ısıtılan numune üzerindeki iz, diğer numunelerin üzerinde oluşan izden daha küçüktür.

Şekil 9’de $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının farklı sıcaklıklarda tavlama prosesi sonrası Vickers mikrosertlik değerlerinin grafiği görülmektedir. Şekil 9’da görüldüğü gibi $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının oda sıcaklığındaki mikrosertlik değeri, 108 ± 15 HV olarak hesaplanmıştır. Saf Al elementinin oda sıcaklığındaki mikrosertlik değerinin 40.2 HV [23] olduğu dikkate alındığında, $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının oda sıcaklığındaki mikrosertlik değeri saf Al’nin değerinden ~2.6 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, Si ve B’nin alaşımın sertlik değerini artırdığını göstermektedir. Özellikle alaşım içindeki bor oranının yüksek olması tane boyutu küçülmesinde etkili olduğu ve bu durum gerilme enerjisini artırarak malzemenin mikrosertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Bunun yanında alaşımın mikro yapısında gözlenen α -Al (Si,B) ve AlB_2 gibi intermetalik fazlar da mikrosertlik değerinin artmasında önemli rol oynamıştır. İntermetalik fazlar, dislokasyon hareketine engel olarak alaşımın sertleşmesine yol açabilmektedir [24]. Diğer taraftan $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının mikrosertlik değeri tavlama sıcaklığının artması ile 300 °C’de 232 ± 9 HV değerine çıkmıştır. 400 °C ve 500 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda tavlama ise alaşımın mikrosertlik değerini düşürmüştür.



Şekil 9. $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının Vickers mikrosertlik değerinin sıcaklıkla değişim grafiği

4 Sonuçlar

Bu çalışmada $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımı ark ergitme yöntemi ile külçe halinde üretilmiştir. Özet olarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır: Alaşımın mikroyapısının, α -Al(B,Si) katı çözeltilisi, Si ve AlB_2 intermetalik fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. Mikroyapının, dendritik yapı ile beraber ötektik yapılardan oluştuğu görülmüştür. DSC ve DTA eğrilerinde, α -Al(B,Si) fazının ergime sıcaklığını temsil eden endotermik pik gözlenmiştir. $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının Vickers mikrosertlik değeri oda sıcaklığında ortalama 108 ± 15 HV olarak hesaplanmıştır. $Al_{50}Si_{25}B_{25}$ alaşımının Vickers mikrosertlik değeri tavlama işlemi sonucunda artmıştır ve 300 °C’de ısısal işlem sonrası 232 ± 9 HV değerine yükselmiştir. 300 °C’den daha yüksek sıcaklıklarda tavlama

işlem alaşımın mikrosertlik değerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Alaşımın mikroyapısında gözlenen intermetalik fazlar mikrosertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Bu çalışma; ark ergitme yönteminin, ergime sıcaklıkları yüksek veya ergime sıcaklıkları birbirinden farklı olan elementlerle alaşım üretmek için kolay ve uygun bir metot olduğunu göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (Proje No: 2017/2-42 D) desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 16

Kaynaklar

- [1] J. Milligan, R. Vintila and M. Brochu, Nanocrystalline eutectic Al–Si alloy produced by cryomilling, *Materials Science and Engineering: A*, 508, 43–49, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.12.017>.
- [2] J. Chen, R. Lengsdorf, H. Henein, D.M. Herlach, U. Dahlborg and M. Calvo-Dahlborg, Microstructure evolution in undercooled Al–8wt%Fe melts: Comparison between terrestrial and parabolic flight conditions, *Journal of alloys and compounds*, 556, 243–251, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.182>.
- [3] F.C.R. Hernandez, J. M. H. Ramirez and R. Mackay, Al–Si alloys: automotive, aeronautical, and aerospace applications, Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58380-8>.
- [4] A. M. A. Mohamed, A. M. Samuel, F. H. Samuel and H. W. Doty, Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al–10.8%Si cast alloy, *Materials & Design*, 30, 3943–3957, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.042>.
- [5] P. Ma, D. Zhang, L. Zhuang and J. Zhang, Effect of alloying elements and processing parameters on the Portevin-Le Chatelier effect of Al–Mg alloys, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 22, 175–183, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1058-2>.
- [6] O. Uzun, T. Karaaslan, M. Gogebakan ve M. Keskin, Hardness and microstructural characteristics of rapidly solidified Al–8–16wt.%Si alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 376, 149–157, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.01.017>.
- [7] Y. Birol, A novel Al–Ti–B alloy for grain refining Al–Si foundry alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 486, 219–222, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.07.064>.
- [8] M. Chemingui, G. Mesmacque and A. W. Kolsi, Effect of heat treatment on plasticity of Al–Zn–Mg alloy: Microstructure evolution and mechanical properties,

- Physics Procedia, 2, 1167–1174, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2009.11.079>.
- [9] M. Gögebakan, O. Uzun, T. Karaaslan ve M.Keskin, Rapidly solidified Al–6.5 wt.%Ni alloy, Journal of Materials Processing Technology, 142, 87–92, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00466-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00466-7).
- [10] M. Gögebakan ve B. Avar, Structural evolutions of the mechanically alloyed Al₇₀Cu₂₀Fe₁₀ powders, Pramana - Journal of Physics, 77, 735–747, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12043-011-0091-6>.
- [11] H. Kaya, U. Böyük, E.Çadırlı ve N.Maraşlı, Measurements of the microhardness, electrical and thermal properties of the Al–Ni eutectic alloy, Materials & Design, 34, 707–712, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.030>.
- [12] B. Cantor, I.T.H. Chang, P.Knight and A.J.B.Vincent, Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, Materials Science and Engineering: A, 375, 213–218, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>.
- [13] M. Gögebakan, Mechanical properties of AlYNi amorphous alloys, Journal of Light Metals, 2, 271–275, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(03\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S1471-5317(03)00011-7).
- [14] M. Gögebakan, The effect of Si addition on crystallization behavior of amorphous Al–Y–Ni alloy, Journal of materials engineering and performance, 13, 504–508, 2004. <https://doi.org/10.1361/10599490419171>.
- [15] H. Okamoto, Phase diagrams for binary alloys, ASM international Materials Park, OH, 2000. ISBN-13: 978-1-61503-046-0. ISBN-13: 978-1-61503-046-0.
- [16] O. N. Carlson, The Al–B (Aluminum–Boron) system, Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 11, pp. 560–566, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF02841717>.
- [17] Warmuzek, Malgorzata, Aluminum–silicon casting alloys: an atlas of microfractographs. ASM international, 2004. ISBN: 978-0-87170-794-9.
- [18] E. Karaköse ve M.Keskin, Microhardness and morphologic characteristics of rapidly solidified Al–12Si–8Ni–5Nd alloy, Metals and Materials International, 16, 383–391, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12540-010-0607-5>.
- [19] M. Uludağ, Ş.Yazman, B.Bakırcıoğlu ve D.Dışpınar, Al–Si Alaşımlarında Si Morfolojisinin İşlenebilirliğe Etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 381–385, 2014. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.66933>.
- [20] E. Karaköse and M. Keskin, Effect of solidification rate on the microstructure and microhardness of a melt-spun Al–8Si–1Sb alloy, Journal of Alloys and Compounds, 479, 230–236, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.01.006>.
- [21] Z. L. Zhao, S. Q. Yin, Y. D. Liu, Z. Q. Zhang and R. F. Ren, Microstructures and corrosion resistance of as-cast aluminum–10 wt.% silicon and aluminum–20 wt.% silicon alloys, Material wissenschaft und Werkstofftechnik 50.9 (2019): 1124–1130. <https://doi.org/10.1002/mawe.201800124>.
- [22] T. Stefania, Optimization of A354 Al–Si–Cu–Mg alloy heat treatment: Effect on microstructure, hardness, and tensile properties of peak aged and overaged alloy, Metals 8.11 (2018): 961. <https://doi.org/10.3390/met8110961>.
- [23] X. Zeng, W. Liu, B. Xu, G. Shu and Q. Li, Microstructure and mechanical properties of Al–SiC nanocomposites synthesized by surface-modified aluminium powder, Metals, 8, 253, 2018. <https://doi.org/10.3390/met8040253>.
- [24] O. Prach, O. Trudonoshyn, P. Randelzhofer, C. Körner and K. Durst, Effect of Zr, Cr and Sc on the Al–Mg–Si–Mn high-pressure die casting alloys, Materials Science and Engineering: A, 759, 603–612, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.038>.





Parkinson hastalarının aktivitelerinin tanınmasında TinyML tabanlı uç bilişim sistemi

TinyML-based edge information system for recognizing the activities of parkinson patients

Mine Boz^{1,*} , Yeliz Durgun² 

¹ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, 60100, Tokat, Türkiye

² Tokat Gaziosmanpaşa University, Biomedical Device Technology Program, 60100, Tokat, Turkey

Öz

Parkinson hastalığı, insan sağlığını tehdit eden titremenin ana semptom olduğu nörodejeneratif bir hastalıktır. Günümüzdeki araştırmalar, Parkinson Hastalığının önceden tahmin edilebilmesine, tespit edilebilmesine veya sınıflandırılabilmesine odaklanmaktadır. Son yıllarda çeşitli sensörler kullanılarak giyilebilir hareket algılama sistemleri oluşturulmaya başlanmıştır. Raporlanan sonuçlar; sorunların hemen hemen çözüldüğü izlenimini verirken, dikkate alınan verilerin temsil kapasitesi ve buna bağlı olarak performans değerlendirilmesinin güvenilirliği hakkında ciddi sorular ortaya çıkmaktadır. Bu araştırma makalesinde, Edge Impulse yazılımı, Arduino Nano 33 BLE mikrodenetleyicisi ve LSM9DS1 ivme sensörü ile titreme tespiti için sistem yapılmıştır. Arka planda titreme ile istenmeyen genel bir sinyali ayırt edebilmektedir. Bu çalışmada, Edge Impulse makine öğrenme araçlarını kullanarak gelişmiş bir tahmine dayalı sistem tasarımıyla Nesnelerin İnterneti (IoT) ve makine öğreniminin birlikteliğinde ivme sensörü ile hareket tespiti yapılarak hastalığın erken tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Edge Impulse, bu çalışmada titreme ve istenmeyen titreme için çeşitli örneklerden oluşan geniş bir veri kümesini eğitmek için kullanılmıştır. Önerilen sistemin %85 tanıma doğruluğu sağladığı bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Edge impulse, İvme ölçer, Anormallik tespiti, Parkinson hastalığı

1 Giriş

Parkinson hastalığı, nöronların yıkımı, ölümünün neden olduğu ilerleyici nörolojik ve her geçen gün artan bir hastalıktır [1,2]. Dünya çapında, yaklaşık 10 milyon insanı etkileyen en yaygın nörodejeneratif hastalıklardan biri olarak da bilinmektedir. Merkezi sinir sisteminin kalıcı bir dejeneratif işlev bozukluğu olarak bilinir ve bunu hareket bozuklukları takip etmektedir. Bu bozukluklar, konuşma güçlüğü, titreme, kas sertliği, hareket yavaşlığı dengede bozulmalar gibi günlük hayatı zorlaştıran çeşitli semptomlara neden olmaktadır [3,4,5]. Bu semptomlar parkinson hastalarının yaşam standartlarını ciddi şekilde etkileyebilmekte ve klinik tanının temelini oluşturmaktadır [4]. Parkinson hastalığının en yaygın klinik belirtilerinden biri

Abstract

Parkinson's disease is a neurodegenerative disease in which tremor is the main symptom that threatens human health. Current research focuses on predicting, detecting or classifying Parkinson's Disease. In recent years, wearable motion detection systems have started to be created using various sensors. Reported results; While giving the impression that the problems are almost solved, serious questions arise about the representative capacity of the considered data and, accordingly, the reliability of the performance evaluation. In this research paper, the system for flicker detection is made with Edge Impulse and Arduino Nano 33 BLE LSM9DS1. It can distinguish between background flicker and an unwanted general signal. In this study, it is aimed to detect the disease early by using the Edge Impulse machine learning tools to detect motion with an acceleration sensor in combination with an advanced predictive system design, Internet of Things (IoT) and machine learning. Edge Impulse was used in this study to train a large dataset of various multiple samples for jitter and unwanted jitter. It was found that the proposed system provides 85% recognition accuracy.

Keywords: Edge impulse, Accelerometer, Abnormality detection, Parkinson's disease

titremedir ve hastaların yaşamlarında özellikle üst ekstremitede ciddi sıkıntılara neden olmaktadır [5]. Titreme, insan vücudunun farklı bölgelerini etkileyen istemsiz bir kas aktivitesidir. En yaygın olarak, ellerde titreme görülmektedir. Titreme yaşamı tehdit edici değildir fakat çoğu insanı rahatsız edici olabilmekte ve günlük sıradan görevleri yerine getirmeyi zorlaştırmaktadır [6]. Bu nedenle el titremesi tespiti; erken teşhis, erken tedavi ve erken remisyonun terapötik programı için önem arz etmektedir. Sağlık sektörü, insan hayatını etkilemede, bir kişinin yaşam tarzını değiştirmekte ve uzun ömürlülüğü sağlayan önemli derecede sorumlu yüksek öncelikli bir sektördür. IoT cihazlarının günümüzde en önemli özelliği "hastaları, sağlık profesyonellerini takip etmede ve hasta durumu izleme için uzaktan bakıcılara hayati hasta verileri tutmada önemli bir rol

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mine.boz7221@gop.edu.tr (M. Boz)

Geliş / Received: 18.07.2022 Kabul / Accepted: 08.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1144946

oynamaktadır". Makine Öğrenimi (ML), hastalara ve sağlık uzmanlarına verimli ve uygun maliyetli hizmetler sunmak için IoT teknikleriyle cihazların faydalarında devrim yaratan başka bir teknolojik alandır. Son yıllarda, sağlık hizmetleri için IoT ve ML ile ilgili birçok çalışma, çeşitli uluslararası araştırmacılar tarafından ilgi çekmektedir. Yöntemler hakkında, bu araştırmada, tele-tıbbi ve uzaktan sağlık hizmetlerine özel bir yoğunlaşma ile makine öğrenimi tabanlı IoT hizmetine yönelik bir girişimde bulunmaktadır.

Son zamanlarda bilgisayarla görme, dili doğal işleme gibi veri analizinde dahil olmak üzere çeşitli uygulama alanlarında makine öğreniminde oldukça başarılı olmuştur. Makine öğreniminin yüksek doğruluğu hem eğitim hem de çıkarım aşamaları için yüksek hesaplama ve bellek gerektirmektedir.

Bir makine öğrenme modelinin eğitimi, birden çok zaman diliminde tekrarlama olarak iyileştirilmesi gereken milyonlarca parametre sebebiyle alan ve hesaplama açısından oldukça maliyetli olmaktadır. Giriş verilerinin potansiyel olarak yüksek boyutluluğu ve giriş verileri üzerinden yapılması gereken milyonlarca hesaplama nedeniyle çıkarım, hesaplama açısından pahalıdır.

Makine öğrenimi, hesaplama ihtiyaçlarını karşılamak için bulut bilgi işleminden yararlanmaktadır. Bulut kaynaklarını kullanmak için; ağ kenarındaki verileri, veri kaynağı konumundan bulutta merkezi bir konuma taşınması gerekir. Verileri kaynaktan buluta taşınmanın bu potansiyel çözümü birçok zorluğu beraberinde getirmektedir.

1) Gecikme: Gerçek zamanlı çıkarımlar çoğu uygulama için kritik bir öneme sahiptir. Örneğin, otonom bir araçtan gelen kamera çerçevelerinin engelleri algılamak ve önlemek için hızlı bir şekilde işlemesi ve yanıt vermesi gerekmektedir. Ancak, çıkarım veya eğitim için buluta veri göndermek yayılma gecikmelerine neden olabilir. Gerçek zamanlı etkileşimli uygulamalar için gereken uçtan uca gecikmeli gereksinimleri karşılamamaktadır.

2) Ölçeklenebilirlik: Bağlı cihazların sayısı arttıkça buluta ağ erişiminde tıkanıklık olabileceğinden dolayı, kaynaklardan buluta veri göndermek ölçeklenebilirlik sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

3) Gizlilik: Verilerin buluta gönderilmesi, verilere sahip olan veya davranışları verilerde yakalanan kullanıcılardan gelen gizliliği riske atmaktadır. Kullanıcılar, kişisel bilgilerini (ör. yüzler, konuşmalar) buluta yüklemekten ve uygulamanın bu verileri nasıl kullanacağı konusunda tedirgin olabilirler.

Edge bilişim, gecikme, ölçeklenebilirlik ve gizlilik zorluklarını gidermek için uygun bir çözüm sağlamaktadır. Gecikme zorluklarını uç bilgisayarların uç cihazlardaki veri kaynaklarına yakınlığı uçtan uca gecikmeyi azaltır ve böylece gerçek zamanlı hizmetlere imkan sağlamaktadır. Ölçeklenebilirlik sorununu ele almak için merkezi bir konumda ağ sıkışmalarından kaçınarak bilgi işlem kaynakları sağlayabilen ve işlemci sayısı ile ölçülebilen uç cihazlar, uç bilgi işlem düğümleri ve bulut veri merkezlerinden oluşan hiyerarşik bir sistem oluşturmaktadır. Verilerin kaynağa yakın bir yerde ya da yerel güvenilir bir uç sunucu tarafından analiz edilmesini sağlar, böylece genel internetin geçişini önler ve gizlilik, güvenlik saldırılarına karşı maruz kalmayı azaltmaktadır.

TinyML, mikrodenetleyiciler gibi minyatür ve düşük enerjili makinelerde çalışan modelleri araştıran ve öngören gömülü sistemler ve makine öğrenimi ile ilgili bir bilim alt dalıdır. Uç cihazlar söz konusu olduğunda çok küçük enerji ve küçük bant genişliğine dayalı düşük hareketlilik süresi modelinde yardımcı olmaktadır. TinyML tabanlı cihazların uça makine öğrenimi uygulamalarını çalıştırırken; günlerce, haftalarca, aylarca ve birkaç durumda, hatta uzun yıllar şarjız pillerle çalışmasına imkan sağlamaktadır [7].

Sağlık, akıllı şehir ve akıllı sistem için giyilebilir cihazlar gibi çeşitli versiyonlarda Nesnelere İnterneti (IoT) sensör verilerinin otomatik olarak anlaşılması istenmiştir. Giyilebilir sensörler üzerinde; insan hareketleri tanıma, akıllı bir şehirde yaya trafiği ve akıllı şebekede elektrik yükü tahmini sayılabilmektedir. IoT bağlamındaki bir fark, birlikte karşılaştırılması ve işlenmesi gereken birden çok veri akışı olabilmektedir. Ve bu veri akışları makine öğrenimi tarafından desteklenmesi gereken alan ve zaman korelasyonuna sahiptir. IoT derin öğrenme bağlamındaki bir başka çalışma alanı, derin öğrenme modellerini, yalnızca kilobayt belleğe ve düşük güçlü işlemcilerle sahip olan Arduino Nano 33 BLE gibi hesaplama açısından zayıf uç cihazlara uyacak şekilde sıkıştırılmaya olanak sağlamaktadır [8]. Gömülü makine öğrenimi ile Edge Impulse yazılım platformunu kullanarak çalışabilen ve algılama veya erken teşhis gerçekleştirebilen algoritmalar geliştirmek mümkün hale gelmiştir.

Bu çalışmada, Edge Impulse aracılığıyla parkinson hastalığının önceden tahmin edilmesi, hastaların hareketinin algılanması ve erken tanının sağlanmasına yardımcı olması amaçlanmıştır.

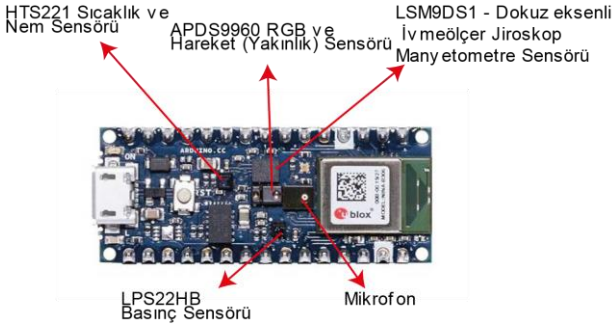
2 Materyal ve metot

Makine öğrenimi (ML), mevcut teknolojik alanın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Uç bilgi işlem ve Nesnelere İnterneti (IoT) ile birlikte, ağın ucundaki kaynak kısıtlı gömülü cihazlarda makine öğrenimi tekniklerini uygulamak için yeni bir fırsat sunmaktadır. Geleneksel makine öğreniminde, bir senaryoyu tahmin etmek için büyük miktarda bilgi işlem performansı gerekmektedir. Önde gelen bir gelişme platformu olan Edge Impulse; TinyML hedefli uç cihazlarda makine öğrenimi modelleri geliştiren bir bulut hizmetidir. Edge Impulse arayüzünü kullanarak geliştirilen yerleşik makine öğrenimi-TinyML paradigması, geleneksel yüksek kapasiteli bilgi işlem sistemlerden gömülü sistem cihazlarına yapmayı hedeflemektedir. Bu tür geçişler yapılırken, öğrenme modellerinin doğruluğunu korumak, verimli kaynaktan dağıtım kolaylığı sağlamak gibi çeşitli zorlukların üstesinden gelinmektedir. Bu, uç platformlar için AutoML işlemeyi destekler. Ayrıca bu tür cihazlarda öğrenme modellerini dağıtmak için akıllı telefonlar da dahil olmak üzere bir dizi kartı desteklemektedir. Eğitim bulut platformunda yapılır ve eğitilen model, veri iletili etkinleştirilmiş bir yol izlenerek bir uç cihaza aktarılabilir [9]. Bu çalışmada hastalardan gerçek veri toplamının uzun ve karmaşıklığını göz önünde bulundurularak Edge Impulse ile parkinson hastalığını erken teşhis için gerçek veri ile çok sayıda el titremesi verisi oluşturmak hedeflenmiştir.

İvme sensörü ve Arduino Nano 33 BLE devre kurularak; öncelikle farklı pozisyonlarla (“sabit duruş” ve “titreme”) cihazdan veriler alınmaktadır. Parkinson hastalarında el titremesini tespit etmek amacıyla sabit duruş ve titreme farklı pozisyonlarla 2 ayrı eğitim yapılmıştır.

2.1 Sistem içeriği

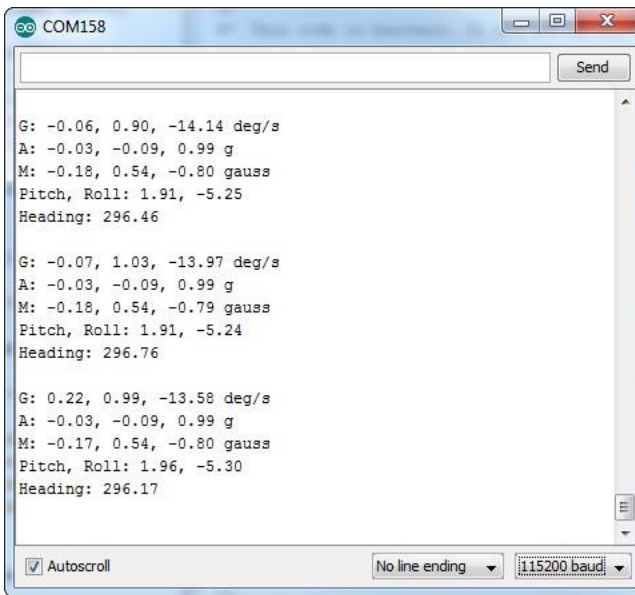
Bu çalışmanın ana bileşenleri Arduino Nano 33 BLE ve dahili LSM9DS1 modülüdür. Seri iletişim ile birbirine bağlıdır ve devre şeması Şekil.1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Devre şeması

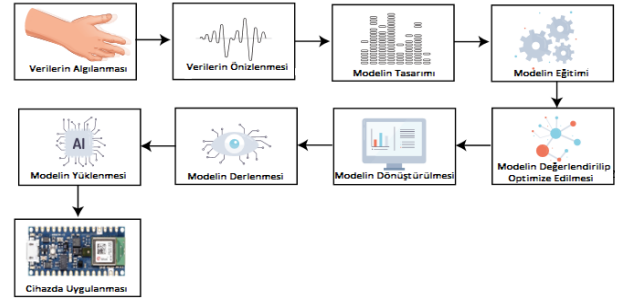
Arduino Nano 33 BLE, 64 MHz’de çalışan FPU’lu 32 bit Cortex M4 işlemcidir. Arduino tarafından oluşturulmuş geliştirme panosuna sahiptir. Bu sayede Arduino kütüphanesini kod yazarken kullanmayı kolaylaştırmaktadır. Arduino, bu üründe temel olarak Mbed kullanmaktadır, böylece hem Arduino kütüphanesini hem de Mbed kütüphanesini RTOS ile aynı anda kullanımı yapılmaktadır. Arduino, mikrodenetleyiciler üzerindeki genel gelişimin yanı sıra AI ile başlamak için en kolay hale getirenlerdir. Arduino, Edge Impulse AI modellerini geliştirme panolarına taşımayı kolaylaştırmıştır [10].

2.2 Çalışma basamakları



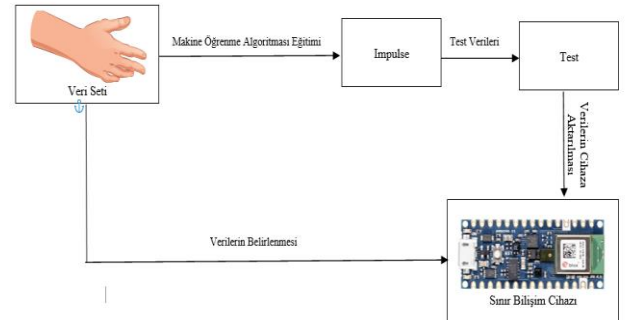
Şekil 2. Arduino seri ekran ölçümleri

LSM9DS1, 3 eksenli bir jiroskop ve 3 eksenli bir ivmeölçerden oluşmaktadır. İlk olarak, LSM9DS1 jiroskop açısı ve ivme bilgisini alır ve daha sonra orjinal verilere göre DMP işleme yoluyla dürtülü elde etmesi ve ardından üç eksenli Euler açısını, yani adım açısını, yuvarlanma açısını ve yalpalamayı elde etmek için tutum algoritmasını hesaplamaktadır. Daha sonra veriler seri port üzerinden ana bilgisayara iletmektedir [11]. Devrede kullanılan ivme sensörünün Arduino Nano 33 BLE Arduino Seri Ekran Ölçümleri Şekil.2’de gösterilmektedir. Makine öğrenimi modelini eğitmek ve test etmek için sensör verileri toplanmaktadır. Bu veriler, daha sonraki işlemler için Edge Impulse platformuna aktarılmıştır. Verileri Edge Impulse sunucusunda saklayabilmek için birkaç yol sağlanmıştır. Verileri iletmeyen yollarından biri olan ve iyi bir desteğe sahip olduğu Edge Impulse veri iletilicisidir. Bu kenar darbe iletilici, Edge Impulse sunucusuna doğrudan bağlantı yoluyla veri aktarımı sağlayan bir Edge Impulse yazılım paketi olan Edge Impulse Komut Satırı Arayüzü (CLI) araçlarında bulunan bir programdır. Bu program, verileri örneklemek için bir seri arabirim aracılığıyla bir mikro denetleyiciye bağlanmaktadır. Uygulama geliştirilmesinde izlenen metodoloji Şekil.3’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3. TinyML'nin uygulama akışının blok şeması

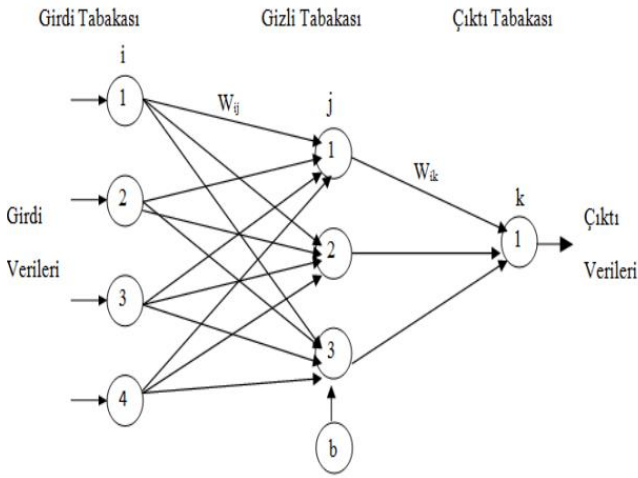
Şekil.4 'de gösterilen makine öğrenimi çerçevesi, Edge Impulse modelini temsil eder. Arduino Nano 33 BLE ile Sınırlı Bilişim için Sinir Ağı modeli kullanarak, oluşturulan modelleri mikrodenetleyici üzerinde çalıştırılabilir. Bu çalışma için Edge Impulse üzerinde bulunan sınıflandırma algoritmalarından sinir ağları sınıflandırması (NN classification) kullanılmıştır.



Şekil 4. Edge impulse blok diyagramı

2.2.1 Yapay Sinir Ağı modeli (YSA) ;

Yapay sinir ağı (YSA), insan beynindeki nöronların yapısının çalışmasından esinlenerek modellenen bir donanım ve/veya yazılım sistemidir. YSA'lar ağırlıklarıyla birbirine bağlanmış elamanlardan oluşur. Kısaca sinir ağları olarak da adlandırılırlar. YSA için en sık kullanılan metotlardan, hataların geriye yayılma ilkesine göre çalışan geriye beslemeli (feedforward-back-propagation) modeli kullanılmıştır. Yapay sinir ağı hücresi; girdi tabakası, değişken ağırlık çarpanları, toplam fonksiyonu, tanımlama (aktivasyon) fonksiyonu ve çıktı tabakası olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Şekil.5'te üç tabakalı yapay sinir ağı şeması gösterilmektedir.



Şekil 5. 3 Tabakalı yapay sinir ağı mimarisini

3 Tabakalı Yapay Sinir Ağı Mimarisinde, W_{ij} ve W_{jk} sırası ile girdi ve gizli tabakası, yine gizli tabaka ile çıktı tabaka arasındaki bağlantı ağırlıklarını ifade etmektedir. Bu değerler, bir önceki girdi verilerinin işlem yapılan eleman üzerindeki etkisini ifade eden katsayı değerleridir. İlk başta rastgele ağırlık değerleri alan bu katsayılar, eğitim aşamasında tahmin çıktıları ile gerçek çıktıları karşılaştırılarak sürekli değişmektedir. Ve hataları en aza indiren bağlantı ağırlık değerleri ayarlanıncaya kadar hata miktarları geriye doğru ilerlemektedir.

3 Bulgular ve tartışma

Toplanan veriler, önerilen bu makine Öğrenimi tekniğinde; veri toplama, veri ayrıştırma, makine öğrenimi modelleme ve kesinlik testi olarak bu adımlar izlenmelidir.

• Veri Toplama: Çeşitli kaynaklardan veri toplama ve analiz etme mekanizmasıdır. Süreçteki en zor ve en kritik adımlardan biri veri toplamadır. Çok fazla araştırma ve izleme gerektirmektedir.

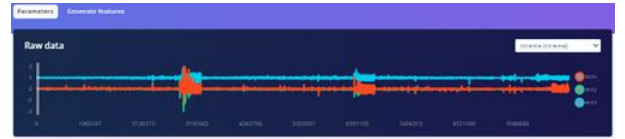
• Veri Ayrıştırma: Bir veri dizisini başka bir veri biçimine dönüştürme işlemidir. Ayrıştırıcı dosyayı alarak insanlar tarafından kolayca anlaşılabilir bir dosya haline dönüştürmektedir.

• Makine Öğrenimi Modellemesi: Belirli bir işte en uygun olanı bulmak için makine öğrenimi modellerini eğitip değerlendirilen öz yinelemeli bir süreçtir.

• Doğruluk Testi: Sınıflandırma modelini doğru bir şekilde derecelendirmek için kullanılmaktadır. Model tarafından yapılan doğru tahminlerin yüzde olarak doğruluğu gösterilir.

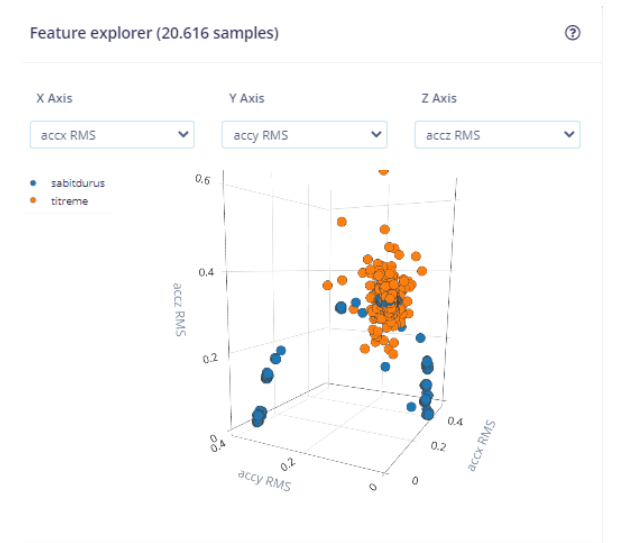


Şekil 6. Sabit duruş grafiği

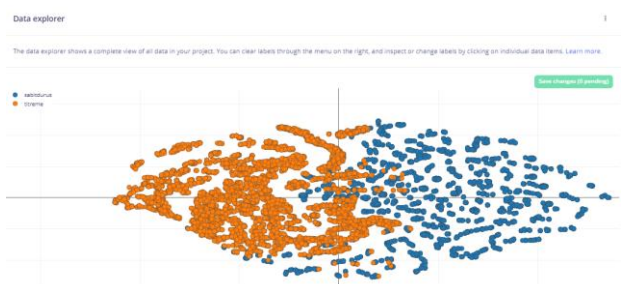


Şekil 7. Titreme grafiği

Verileri elde ettikten sonra, Edge İmpulse da 'Spektral Analiz' sinyal işleme bloğunu kullanarak bir filtre uygulanmaktadır. Spektral analiz gerçekleştirilir ve frekans ve spektral güç verilerini çıkarmaktadır. Veri grafikleri Şekil.6 ve Şekil.7'de gösterildiği gibi iki ayrı kategoriye ayrılmaktadır.



Şekil 8. Sinir ağı tarafından sınıflandırılan tüm eğitim veri kümesi



Şekil 9. Veri gezgini

20.616 verinin toplu bir grafikte yer aldığı parkinson tespitini yapabilmek adına tüm veri grafiklerinin karşılaştırılması ‘Özellik Gezgini’ komutu ile yapılabilmektedir. Sinir Ağı Tarafından Sınıflandırılan Tüm Eğitim Veri Kümesi Şekil.8’de gösterilmektedir. Verileri toplarken veri seti, eğitim ve test setlerine ayrılmaktadır. Model sadece eğitim seti ile eğitildi ve test seti, modelin görünmeyen veriler üzerinde ne kadar iyi performans göstereceğini doğrulamak için kullanılmıştır. Bu, modelin yaygın bir olay olan eğitim verilerine uyum oranını gösterecektir. Edge Impulse ‘Model Test’ sayesinde tüm test veri örneklerini sınıflandıracak ve modelin nasıl performans gösterdiğine dair genel bir doğruluk çıkartacaktır.

Veri kümesini keşfetmek, aykırı değerleri veya yanlış etiketlenmiş verileri bulmak için ‘Veri Gezgini’ özelliği kullanılmıştır. Veri gezgini modeli Şekil.9’da gösterilmektedir. Veri gezgini önce verilerden anlamlı özellikler çıkarır ve ardından bu özellikleri 2B alana eşlettirmektedir. Tüm veri kümesine genel bir bakış yapmamıza imkan sağlamaktadır.



Şekil 10. Anormallik tespit grafiği

Edge Impulse da kaydedilen verilerden anormallik tespit grafiği çıkartılarak parkinson hastalığının erken teşhisine yardımcı olmaktadır. Şekil.10’da gösterildiği gibi renk tonunun koyudan açığa doğru giden renk akışı titremenin yaygınlaştığını ve düz konumdan uzaklaştığını ifade etmektedir. Aynı zamanda anormallik değeri, bir anomalinin tespit edilip edilmediğini gösteren bir değerdir. Yani sinir ağı, eğitilmiş sınıflardan birinden çok uzakta olan bir değer algılamaktadır. Anormallik değeri, modelin zaten bildiği bir kümeye kadar olan ortalama değeri temsil edecektir. Bu değer sıfıra ne kadar yakın olursa o kadar iyi olduğunu göstermektedir.

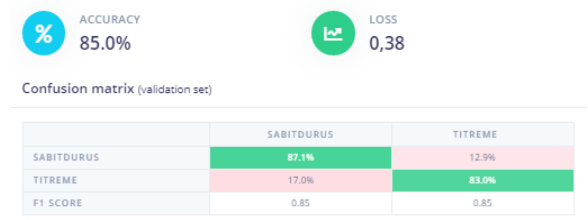
Bu aşamalardan sonra ‘Karışıklık Matrisi’ oluşturularak Şekil.11’de gösterildiği gibi %85 doğruluk ve 0.38 kayıp tespit edilmiştir.

Eğitim Setindeki Veriler: 20.616

Eğitim Setindeki Sınıflar: 2 (Sabit Duruş, Titreme)

İşleme Süresi : 1 ms.

En Yüksek RAM Kullanımı : 1.7 K



Şekil 11. Tahmin doğruluğu ve kaybı ile sınıflandırılan veriler için karışıklık matrisi

Yukarda ifade edildiği gibi bu çalışma, el titremelerinin gömülü bir mikrodenetleyici ile hassas biçimde ölçülmektedir. Yine aynı mikrodenetleyici ile makine öğrenme yöntemleri ile sınıflandırma yapılarak çözüm üretmektedir. Bu yazıda elde edilen sonuçlarla, bir mikrodenetleyicinin sinir ağlarıyla birlikte kullanımının karmaşık laboratuvar değerlendirmelerine bir alternatif olabileceği ifade etmektedir. Parametrelendirme yerine sensör kullanımı ham verilerin doğrudan işlenmesinin daha etkili olduğunu ve klinik olarak ilgili bilgilerinin doğruluk oranını yükselteceğini göstermiştir. Pedrosa ve diğerleri tarafından yapılan araştırmada insan bedenine yerleştirilebilen bir mobil telefon kullanımı önerilmişti [12]. Fakat kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği sorunlarından dolayı etkili olamamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada elde edilen sonuçlar, YSA tabanlı bir parametrik yaklaşımın yüksek doğrulukta bir sınıflandırma yeteneği sağlamasına rağmen, ham sinyal yönetimi ile kullanımının daha yüksek doğruluğu sağlanmasıyla tercih edilen teknik olarak kabul edilebileceğini göstermiştir.

Ancak, küçük örneklem boyutu nedeniyle sonuçlar titizlikle yorumlanmalıdır. Ayrıca, çalışmamızın sınırlı veri seti içerdiği göz önünde bulundurulmalıdır, önerilen yöntemlerin doğruluğu gerçek örneklerle test edilmemiştir. Gelecekte diğer öğrenme modelleri ve farklı sensörlerin kombinasyonu ile bunlar da daha iyi sonuçlar verileceği düşünülmektedir.

Levenberg-Marquardt algoritmalı Yapay Sinir Ağlarının ses veri seti için %95.89 ile en yüksek sınıflandırma doğruluğunu verdiği gözlemlenmiştir. Burada tartışıldığı gibi makine öğrenme tekniklerinin kullanılmasının erken teşhis ve tanı için büyük bir destek olacağına inanılmıştır. Parkinson hastalığı teşhisi için çok sayıda teknik mevcut olmasına rağmen, performansları hala kusurludur. Bu nedenle, CAD algoritmalarının doğruluğunu artırmak için daha fazla iyileştirmeye ihtiyaç vardır. Gelecekte, Parkinson tespiti ve sınıflandırması için genetik algoritma ve Extreme Learning Machine gibi diğer evrimsel algoritmaları kullanmaya başlanacaktır [13].

Konvolüsyonel sinir ağı modeli, EEG ve konuşma analizi gibi tek boyutlu sinyallerde de iyi performans göstermektedir. Bununla birlikte, derin öğrenme modelleri, hastalık tahmini ile ilgili kanıt eksikliğinden dolayı nörologlar ve diğer klinisyenler gibi son kullanıcılar tarafından henüz desteklenmemiştir. Bu yüzden derin öğrenme tabanlı CAD araçlarında daha sonra son kullanıcılar tarafından benimsenebilecek daha açıklanabilir ve yorumlanabilir yöntemleri benimsemeye ve parkinson hastalığından

etkilenen artan sayıda birey için sağlık bakım sonuçlarını iyileştirmeye teşvik edileceği düşünülmektedir [14].

Teknolojinin gelişmeye devam etmesi, parkinson hastalığı gibi pek çok hastalığında erken teşhisinin yapılabilmesinin önünün açılmasına yardımcı olmaktadır. Chatterjee, beyin BT görüntülerini sağlıklı bireyler ve parkinson hastaları arasındaki farklılıkları araştırmıştır [15]. Anese Picco, 18F-DOPA pozitron emisyon tomografisini parkinson hastalarında sağda ve sol putamenin son kısmında 18F-DOPA alımının azaldığını göstermektedir. İki kaudat çekirdeğin başında 18F-DOPA alımı asimetrik ve parkinson hastalığı olanlarda striatum kortekse oranının azaldığı görülmüştür [16]. Parkinson hastalığını analiz etmek için Thanawattano, tremor sinyallerindeki zamansal dalgalanmaları toplamıştır [17]. Parkinson hastalarında kas tonusunu ölçmek için Wright D., taşınabilir bir cihaz geliştirmiştir [18].

Fraivan ve ark. [19], günlük aktivitelere dayalı olarak parkinson hastalığı titreme olaylarını tespit etmek için bir akıllı telefonda ivmeölçeri kullanmıştır. Titremeleri %81 doğrulukla ayırt etmek için sınıflandırıcı olarak Yapay Sinir Ağlarını (YSA) kullanmışlardır.

Zhang ve ark. [20], parkinson hastalarının günlük aktivitelerindeki titremeleri tespit etmek için ivmeölçerler ve makine öğrenimi algoritmaları kullanmıştır. Altı hastalığı derecelendirme ölçeği aktivitesine ve dokuz günlük aktiviteye dayalı veri toplamışlardır. Sınıflandırma modellerinin doğruluğu %75 civarındadır. Ayrıca, verilerini bölümlere ayırmak için 30 saniyeden büyük boyutlara sahip birden çok pencere kullanmışlardır. Buna kıyasla çalışmamızda açık kaynaklı bir veri seti kullanarak, çeşitli parkinson hastalığını tespit etmek için nispeten iyi işleyen bir makine öğrenimi modelini eğitebilmesini sağladık. Nihai hedef, bunun gibi modelleri doğrudan yerleşik mikrodenetleyiciye veya Linux cihazına dağıtmak ve daha fazla tıbbi cihazın uça çıkarım yapmasına imkan sağlamaktır.

4 Sonuçlar

Edge Impulse ML ardışık düzeninin eğitimini, testini ve doğrulamasının sonuçlarını göstermektedir. İlk olarak, modelin bir doğrulama seti üzerindeki eğitim sonuçları incelenmektedir. Bu sonuçlar yalnızca modelin eğitim verileriyle nasıl çalıştığını gösterdiği için, modelin test verileri aracılığıyla yeni verilere nasıl yanıt verdiğine de bakılmaktadır. Ayrıca, fiziksel bir cihazın modelinin çalışmasını gerçek zamanlı olarak doğrulamaktadır. Bu çalışmada gösterilen tüm resimler Edge Impulse kullanıcı arayüzü tarafından oluşturulmuştur. Edge Impulse aracılığıyla eğitimi ve testi, her ikisinin de uygulanabilir yöntemler olabileceğini göstermiştir. Her iki yöntemde de eğitim seti ve test setinde %85'lik yüksek doğruluk elde edilmektedir. Bu, Edge Impulse çerçevesi aracılığıyla cihazın kendisinde ML aracılığıyla insan etkinliği tanımlama gerçekleştirmek için herhangi bir rahatsız edici durumun söz konusu olmadığı ivmeölçer sensörlerinin de uygulanabilirliğini gösterilmektedir.

Birçok çalışma ile birlikte, normal koşullar altında parkinson hastalığı ön tanısı günümüzde esas olarak sağlık çalışanlarının tıbbi deneyimine dayanmaktadır. Ve klinik semptomlar için nesnel değerlendirme göstergelerinin

eksikliği makul bir tanı almayı zorlaştırmaktadır [21]. Edge Impulse, akademinin araştırma faaliyetlerini genel olarak uygulamalı dağıtılmış bilgi işleme yeniden odaklaması için benzersiz bir fırsat sunmaktadır. Edge Impulse makine öğrenme araçlarını kullanarak gelişmiş bir tahmine dayalı sistem tasarımıyla Nesnelerin İnterneti (IoT) entegrasyonu sayesinde ivme sensörü ile hareket tespiti yapılarak hastalığın erken tespiti yapılmasına imkan sağlamaktadır. Hareket sinyallerini yakalamak için kullanılan sensörler, sensörlerin konumları, örnekleme frekansı ve ölçüm aralığı belirtilerek grafikler oluşturulmuştur. Edge Impulse kullanarak bir uç cihazda gerçek zamanlı olarak bir makine öğrenimi modeli çalıştırılmıştır. Verileri yakalamak ve modeli dağıtmak için bir LSM9DS1 ivmeölçeri kullanılmıştır. Hareket sinyalleri, potansiyel uygulamaya uygun verimli konfigürasyonlara sahip ivmeölçer kullanılarak yakalanmıştır. Hareket sinyalleri, anormallik tespiti yapmak için ayrı ayrı gruplara sınıflandırılarak eğitimi tamamlanmıştır. Elde edilen hareket sinyalleri Edge Impulse üzerinden elde edilen grafiklerle yorumlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] S. Tadse, M. Jain, P. Chandankhede, Parkinson's detection using machine learning. Proceedings- 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems ICICCS, 1081–1085, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICICCS51141.2021.9432340>.
- [2] M. Saleh, M. Abbas, R. B. Le Jeannes, FallAID: An Open Dataset of Human Falls and Activities of Daily Living for Classical and Deep Learning Applications. IEEE Sensors Journal, 21(2), 1849–1858, 2021. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3018335>.
- [3] M. T. Ehsan, M. S. R. Sajal, K. A. Mamun, An automated cloud-based tool for Screening of Parkinson's disease in Bangladesh. International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques, 664–668, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICREST51555.2021.9331233>.
- [4] K. Rezaee, S. Savarkar, X. Yu, J. Zhang, A hybrid deep transfer learning-based approach for Parkinson's disease classification in surface electromyography signals. Biomedical Signal Processing and Control, 71, 103161, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.BSPC.2021.103161>.
- [5] L. Tao, X. Wang, X. Peng, P. Yang, J. Qi, Y. Yang, Activity Selection to Distinguish Healthy People from Parkinson's Disease Patients Using I-DA. Proceedings - 2021 17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking, MSN, 66–73, 2021. <https://doi.org/10.1109/MSN53354.2021.00025>.
- [6] L. Tong, J. He, L. Peng, CNN-Based PD Hand Tremor Detection Using Inertial Sensors. IEEE Sensors Letters, 5(7), 2021. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2021.3074958>.

- [7] A. Rana, Y. Dhiman, R. Anand, Cough Detection System using TinyML. Proceedings- International Conference on Computing, Communication and Power Technology, IC3P, 119–122, 2022. <https://doi.org/10.1109/IC3P52835.2022.00032>.
- [8] J. Chen, X. Ran, Deep Learning With Edge Computing: A Review. Proceedings of the IEEE, 2019. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2921977>.
- [9] P. P. Ray, A review on TinyML: State-of-the-art and prospects. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(4), 1595–1623, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUCI.2021.11.019>.
- [10] B. Wiggård and T. Eng, Power Consumption when using AIModels on microcontrollers. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-186026>, 2022. <https://doi.org/10.1515/CDBME-2020-3097/MACHINEREADEABLECITATION/RIS>.
- [11] X. Pengfei, C. Shiwen, Y. Zhang, Design of Pose measurement and Display system based on STM32 and MPU6050. Proceedings - International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems, ICICAS, 71–74, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICICAS53977.2021.00021>.
- [12] S. A. Hossein Tabatabaei, D. Pedrosa, C. Eggers, M. Wullstein, U. Kleinholdermann, P. Fischer, K. Sohrabi, Machine Learning Techniques for Parkinson's Disease Detection using Wearables during a Timed-up-and-Go-Test. Current Directions in Biomedical Engineering, 6(3), 376–379, 2020.
- [13] G. Pahuja, T. N. Nagabhushan, A Comparative Study of Existing Machine Learning Approaches for Parkinson's Disease Detection. 67(1), 4–14, 2018. <https://doi.org/10.1080/03772063.2018.1531730>.
- [14] H. W. Loh, W. Hong, C. P. Ooi, S. Chakraborty, P. D. Barua, R. C. Deo, J. Soar, E. E. Palmer, U. R. Acharya, Application of Deep Learning Models for Automated Identification of Parkinson's Disease: A Review (2011–2021), 2021. <https://doi.org/10.3390/S21217034>.
- [15] J. Chatterjee, A. Saxena, G. Vyas, A. Mehra, A computer vision approach to diagnose Parkinson Disease using Brain CT Images. In 2018 Second International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC) (pp. 463–467), IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCMC.2018.8488034>.
- [16] A. Picco, S. Morbelli, A. Piccardo, D. Arnaldi, N. Girtler, A. Brugnolo, I. Bossert, L. Marinelli, A. Castaldi, F. de Carli, C. Campus, G. Abbruzzese, F. Nobili, Brain 18F-DOPA PET and cognition in de novo Parkinson's disease. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 42(7), 1062–1070, 2015. <https://doi.org/10.1007/S00259-015-3039-0/FIGURES/3>.
- [17] C. Thanawattano, C. Anan, R. Pongthorneri, S. Dumnin, R. Bhidayasiri, Temporal fluctuation analysis of tremor signal in Parkinson's disease and Essential tremor subjects. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 6054–6057, Milan, Italy, 25–29 August 2015. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2015.7319772>.
- [18] D. Wright, K. Nakamura, T. Maeda, K. Kutsuzawa, K. Miyawaki, K. Nagata, Research and development of a portable device to quantify muscle tone in patients with parkinsons disease. Proceedings of the 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS'08-“Personalized Healthcare through Technology,” 2825–2827, Vancouver, BC, Canada, 20–25 August 2008. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2008.4649790>.
- [19] L. Fraiwan, R. Khnouf, A. R. Mashagbeh, Parkinson's disease hand tremor detection system for mobile application. Journal of Medical Engineering & Technology, 40(3), 127–134, 2016. <https://doi.org/10.3109/03091902.2016.1148792>.
- [20] A. Zhang, A. Cebulla, S. Panev, J. Hodgins, & F. de La Torre, Weakly-supervised learning for Parkinson's Disease tremor detection. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS, 143–147, Jeju, Korea (South), 11–15 July 2017. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8036782>.
- [21] J. Meng, Q. Niu, X. Huo, H. Zhao, L. Zhang, X. Wang, Y. Wang, A Detection Method for Parkinson's Hand Tremor Based on Machine Learning. China Automation Congress, CAC, 4105–4109, Beijing, China, 22–24 October 2021. <https://doi.org/10.1109/CAC53003.2021.9728408>.





Düzeltilme Yazısı “KBH₄ hidrolizinde ince film nikel katalizörünü kullanarak hidrojen üretimi ve proses optimizasyonu”

[NÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi 11(4), 1097-1102, 2022]

Erratum to “Hydrogen production and process optimization using thin film nickel catalyst in KBH₄ hydrolysis”

[NOHU Journal of Engineering Sciences 11(4), 1097-1102, 2022]

Meryem Sena Akkuş^{1,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06010, Ankara, Türkiye

Düzeltilme

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, “<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1143291>” DOI numaralı araştırma makalesinde yazar tarafından Şekil 2a ve 2b’de sunulan resimlerin sehven hatalı olarak yüklendiği anlaşılmıştır. Yapılan bu hatadan dolayı yazar, okuyuculardan özür dilemektedir. Makalede yer alan hatalı resimlerin giderilmesi amacıyla yapılan bu düzeltme yazısında makaleye ait doğru resimler ve açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

Orijinal makalenin DOI: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1143291>

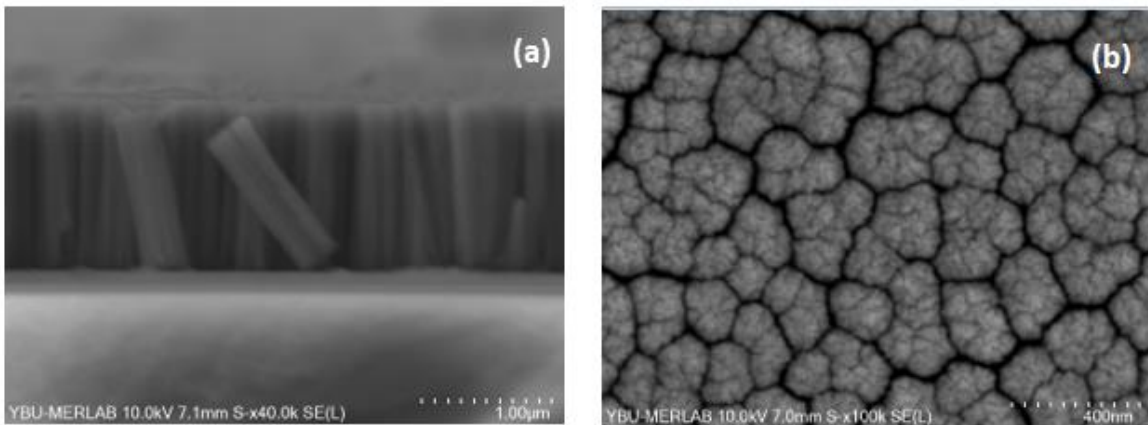
1) Şekil 2a ve 2b’de verilen Magnetron saçırma yöntemiyle hazırlanan nikel katalizörün SEM’deki kesit (a) ve yüzey (b) görüntüleri sehven hata yapılmış olup yerine doğru resimler aşağıda verilmiştir. Şekil açıklamasında değişiklik yoktur.

Erratum

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, in the research article with DOI number “<https://doi.org/10.28948/ngumuh.1143291>”, it was understood that the images presented in Figures 2a and 2b by the author were inadvertently uploaded as incorrect images. The author apologizes to the readers for this mistake. Correct images and explanations of the article are presented below in this correction article, which was made in order to eliminate the faulty pictures in the article.

DOI of original article: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1143291>

1) The cross-section (a) and surface (b) SEM images of the nickel catalyst prepared by the magnetron sputtering method, given in Figures 2a and 2b, were mistaken, and the correct pictures are given below. There is no change in the image description.



Şekil 2. Magnetron saçırma yöntemiyle hazırlanan nikel katalizörün SEM’deki kesit (a) ve yüzey (b) görüntüleri



* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: msakkus@ybu.edu.tr (M. S. Akkuş)

Geliş / Received: 22.11.2022 Kabul / Accepted: 23.11.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1184705