

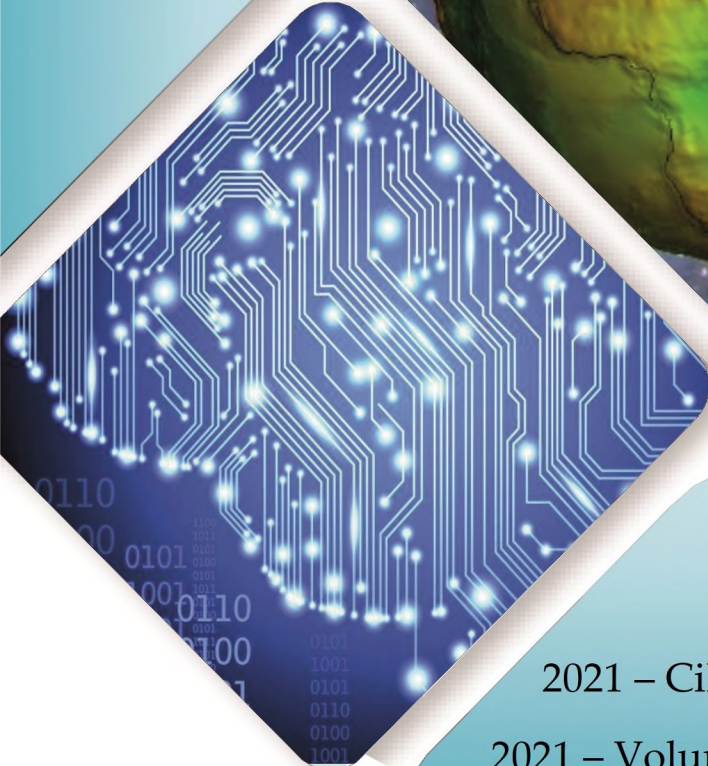


# Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

## Konya Journal of Engineering Sciences



**(KONJES)**  
E-ISSN: 2667-8055



2021 – Cilt: 9 – Sayı: 4

2021 – Volume: 9 – Issue: 4

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)  
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**  
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Halil Kür ad ERSOY**

Chief Editor/Şef Editör

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

Editors/Editörler

**Prof. Dr. Halife KODAZ**

**Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

Section Editors/Alan Editörleri

**Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ**

Prof. Dr. Hsran ÖZKAN

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

**Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

**Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM**

**Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN**

**Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

Assist. Prof. Dr. Muhammed Arif EN

Advisory Board/Danışma Kurulu

**Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University**

**Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University**

**Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University**

**Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University**

**Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University**

**Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University**

**Prof.Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences**

**Prof.Dr. Chryssy POTSIU, National Technical University of Athens**

**Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University**

**Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University**

**Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University**

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

**Prof. Dr. Ali BERKTAY**

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

**Assist. Prof. Dr. Ismail KOC**

**Dr. Emel Zeray OZTURK**

**Res. Assist Emir Ali DINSEL**

**Res. Assist. Aybüke BABADAG**

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı

42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18

Fax : 0 332 241 06 35

E-mail : [konjes@ktun.edu.tr](mailto:konjes@ktun.edu.tr)

Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

## **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

**KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**  
**Konya Journal of Engineering Sciences**  
**(KONJES)**

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

---

Cilt	9	Aralık	2021	Sayı	4
Volume	9	December	2021	Issue	4

---

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

**Araştırma Makalesi (Research Article)**

**NANOSİLİKANIN BİTÜMÜN KIVAMI, VİSKOZİTESİ VE MİKROYAPISINA ETKİLERİ**

Effects of Nanosilica on The Consistency, Viscosity and Microstructure of Bitumen

**Tacettin GEÇKİL, Ceren Beyza İNCE, Eda Tüzün ÖZPINAR ..... 845-857**

**PERFORMANCE COMPARISON OF PID CONTROLLER AND FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR WATER LEVEL CONTROL WITH APPLYING TIME DELAY**

Zaman Gecikmesi Uygulanarak Su Seviyesi Kontrolü İçin PID Kontrolör ve Bulanık Mantık Kontrolörünün Performans Karşılaştırması

**Fuad ALHAJ OMAR ..... (English) 858-871**

**GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMADA DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Deep Learning Models in Image Classification

**İlker DAĞLI, Ali ÖZTÜRK ..... 872-888**

**METAHEURISTIC ALGORITHMS BASED APPROACHES FOR EFFICIENCY ANALYSIS OF THREE-PHASE DRY-TYPE TRANSFORMERS**

Üç Fazlı Kuru Tip Transformatör Verimliliği İçin Meta Sezgisel Algoritma Tabanlı Yaklaşımlar

**Seda KUL, Seyit Alperen CELTEK, İres İSKENDER ..... (English) 889-903**

**INVESTIGATION OF THE CHEMICAL CHARACTERISTICS AND OXIDATIVE STABILITY OF SOME COMMERCIAL COLD-PRESSED OILS**

Bazı Ticari Soğuk Pres Yağların Kimyasal Özelliklerinin ve Oksidatif Kararlılığının İncelenmesi

**Hamide Filiz AYYILDIZ, Mustafa TOPKAFA, Syed Tufail Hussain SHERAZI, Sarfaraz Ahmed MAHESAR, Huseyin KARA ..... (English) 904-916**

**EEG SİNYALLERİNİ KULLANARAK 2B VE 3B HİBRİT BİR VİDEONUN AYRINTILI KANAL/LOB ANALİZİ**

Detailed Channel/Lob Analysis of a 2D and 3D Hybrid Video Using EEG Signal

**Negin MELEK, Mesut MELEK, Temel KAYIKÇIOĞLU ..... 917-931**

- TAŞIT TAMPONLARINDA KULLANILAN POLİMER MALZEMELERİN FARKLI HIZLARDA ABSORBE EDİLEN ENERJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**  
Comparison of Energies Absorbed at Different Speeds of Polymer Materials Used in Vehicle Bumpers  
Ercan ŞİMŞİR, İbrahim YAVUZ, Mustafa Çağdaş ERİK ..... 932-942
- OFDM SİSTEMLERİNDE KANAL KESTİRİMİ İÇİN YENİ BİR UYARLAMALI PİLOT YERLEŞİM ALGORİTMASI**  
A Novel Adaptive Pilot Placement Algorithm for Channel Estimation in OFDM Based Systems  
Fatih AYVENLİ, Çetin KURNAZ ..... 943-964
- ADAPTIVE OPERATION MODEL FOR INTERIOR SMART LOGISTICS IN CYBER PHYSICAL SYSTEMS**  
Siber Fiziksel Sistemlerde İç-Mekân Akıllı Lojistik için Adaptif İşletim Modeli  
Emrah DÖNMEZ, Fatih OKUMUŞ, Adnan Fatih KOCAMAZ ..... (English) 965-980
- PVA/ AMBERLİT IRA 743 HİBRİT MEMBRAN İLE ENDÜSTRİYEL ATIK SUDAN BOR GİDERİMİ**  
Boron Removal from Industrial Wastewater with a PVA/ Amberlite IRA 743 Hybrid Membrane  
Mehtap ÖZEKMEKÇİ, Derya ÜNLÜ, Mehmet ÇOPUR ..... 981-994
- ATMOSFERİK BRÜLÖRDE ENJEKTÖR ÇAPI, ENJEKSİYON HIZI VE HAVA GİRİŞ DELİKLERİ SAYISININ HAVA-YAKIT KARIŞMASINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ**  
Numerical Investigation of the Effect of Injector Diameter, Injection Velocity and Air Inlet Hole Numbers on Air-Fuel Mixing In Atmospheric Burner  
Seyda ÖZBEKTAŞ, Bilal SUNGUR, Bahattin TOPALOĞLU ..... 995-1012
- KALÇA PROTEZİ İÇİN UHMWPE-HAp KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**  
Production and Characterization of UHMWPE-HAp Composites for HIP Prosthesis  
Gözde Fatma ÇELEBİ EFE, Tuba YENER ..... 1013-1024
- PİRİNKAYALAR TÜNELİ (ERZURUM, TÜRKİYE) GİRİŞ VE ÇIKIŞ PORTALLARININ SAYISAL MODELLENMESİ: ÖRNEK VAKA ÇALIŞMASI**  
Numerical Modelling of Entrance and Exit Portals in Pirinkayalar Tunnel (Erzurum, Turkey): A Case Study  
Alaattin SAKCALI, Muhammed Said KAYA, Muhammet ESER ..... 1025-1039
- INVESTIGATION OF ROCK AGGREGATE QUALITY IMPROVEMENT THROUGH CHANGES IN CRUSHING CIRCUIT: A CASE STUDY ON VERTICAL SHAFT IMPACT CRUSHER**  
Agrega Kalitesi İyileştirmenin Kırma Döngüsü Değişimi İle Araştırılması: Dik Milli Kırıcı İçin Örnek Bir Çalışma  
Ekin KÖKEN, Kerem ÇİMŞİR ..... (English) 1040-1050
- RESEARCHING THE EFFECTS OF SOCIO-DEMOGRAPHIC VARIABLES ON THE ETHICAL ATTITUDE LEVEL OF GEOMATICS ENGINEERING STUDENTS**  
Sosyo-Demografik Değişkenlerin Harita Mühendisliği Öğrencilerinin Etik Tutum Düzeyine Etkilerinin Araştırılması  
Şaban İNAM, Halil Burak AKDENİZ ..... (English) 1051-1062

**BALIKESİR İLİ ERDEK İLÇESİ İÇİN BAĞIMSIZ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI VE EKONOMİK ANALİZİ**

Feasibility Study and Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Balıkesir Province Erdek

**Aykut Fatih GÜVEN, Mertcan Kubilay METE ..... 1063-1076**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKILI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARIN ÖZELLİKLERİ**

The Properties of Roller Compacted Concretes Incorporating Blast Furnace Slag

**İsmail KILIÇ, Saadet Gökçe GÖK ..... 1077-1087**

**KOCAELİ-GEBZE TAVŞANLI BÖLGESİ KİREÇTAŞLARININ BETON AGREGASI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Limestones of Kocaeli-Gebze Tavşanlı Region Investigation of Usage as Concrete Aggregate

**Hüseyin AKYILDIRIM, Ahmet KARAKAŞ ..... 1088-1108**

**CO<sub>2</sub> CAPTURE USING POLYETHYLENEIMINE FUNCTIONALIZED SILICA XEROGELS**

Polietilenimin ile Modifiye Edilmiş Silika Kserojellerin Kullanımı ile CO<sub>2</sub> Tutumu

**Gülcihan GÜZEL KAYA, Hüseyin DEVECİ ..... (English) 1109-1118**

**Derleme Makalesi (Review Article)**




**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

The Investigation of Batteries and Thermal Management Systems Used in Electric Vehicles

**Muhammet Yasin KABA, Orhan KALKAN, Ali CELEN ..... 1119-1136**



## NANOSİLİKANIN BİTÜMÜN KIVAMI, VİSKOZİTESİ VE MİKROYAPISINA ETKİLERİ

<sup>1</sup>Tacettin GEÇKİL , <sup>2</sup>Ceren Beyza İNCE , <sup>3</sup>Eda Tüzün ÖZPINAR 

<sup>1,2,3</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

<sup>1</sup> tacettin.geckil@inonu.edu.tr, <sup>2</sup> c.beyzaince@gmail.com, <sup>3</sup> tuzun\_edahotmail.com

(Geliş/Received: 29.05.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 31.08.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada, nanosilika katkısının bitümlerin önemli özelliklerinden olan kıvam, viskozite ve mikroyapı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, penetrasyon sınıfı B 160/220 olan saf bitüme ağırlıkça %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nanosilika katkısı eklenerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Elde edilen saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve dönel ince film etüvü (RTFO) testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir ölçüsü olarak kabul edilen penetrasyon indeksi (PI) değerleri de hesaplanmıştır. Daha sonra, bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki akıcılıkları dönel viskozimetre (RV) deneyi ile, mikroyapılarında meydana gelen değişim ise taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi ile belirlenmiştir. Fiziksel test sonuçlarına göre, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların sertleşerek penetrasyon sınıfının B 100/150 olarak değiştiği, %5 nanosilika oranının kritik bir oran olduğu ve bu oranda sıcaklık hassasiyetinin azaldığı görülmüştür. RV sonuçlarına göre, katkı ilavesi ile bağlayıcıların viskozite değerlerinin artış gösterdiği ve dolayısıyla karıştırma-sıkıştırma sıcaklıklarının da arttığı görülmüştür. SEM sonuçlarına göre, nanosilika ilavesiyle homojen bir bitüm-nanosilika karışımının elde edildiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Nanosilika, Modifiye bitüm, Kıvam, Viskozite, Mikroyapı.

### Effects of Nanosilica on The Consistency, Viscosity and Microstructure of Bitumen

**ABSTRACT:** In this study, the effects of nanosilica additive on consistency, viscosity and microstructure, which are important properties of bitumens, were investigated. For this purpose, modified bitumens were obtained by adding 1%, 3%, 5% and 7% nanosilica additives by weight to pure bitumen with penetration class B 160/220. The physical properties of the obtained pure and modified bitumens were determined by penetration, softening point, ductility and rolling thin film oven (RTFO) tests. In addition, penetration index (PI) values, which are considered as a measure of the sensitivity of bitumens to temperature, were also calculated. Then, the flowability of the binders at high temperatures was determined by the rotational viscometer (RV) test, and the change in their microstructure by scanning electron microscopy (SEM) analysis. According to the physical test results, it was observed that with the hardening of the binders with the nanosilica additive, the penetration class changed to B 100/150, the rate of 5% nanosilica was a critical ratio and the temperature sensitivity decreased at this rate. According to the RV results, it was observed that the viscosity values of the binders increased with the addition of additives and thus the mixing-compaction temperatures also increased. According to the SEM results, it was observed that a homogeneous bitumen-nanosilica mixture was obtained with the addition of nanosilica.

**Key Words:** Nanosilica, Modified bitumen, Consistency, Viscosity, Microstructure.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük bakım-onarım masrafı ve yüksek dayanıklılığa sahip olan yol kaplamalarına artan talepler sebebiyle son yıllarda yüksek kaliteli bitümlü karışım üretiminin giderek artış gösterdiği görülmektedir. Bitümlü karışımlarda düşük miktarda kullanılan ancak kaplamanın performansına doğrudan etki eden bitüm, viskoelastik bir malzeme olması sebebiyle yüksek sıcaklıklarda tekerlek izine, düşük sıcaklıklarda ise termal çatlamaya eğilim göstermektedir. Bu sebeple, tekrarlı yükler altında bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalardaki deformasyonu azaltmak ve kaplamanın hizmet ömrünü arttırmak için, bitümün hem sertleşme eğiliminin artması, hem de elastikiyetini koruması gerekmektedir. Kaplamada oluşabilecek bozulmaları ortadan kaldırmak ve performansını arttırmak amacıyla son yıllarda çeşitli katkı maddeleri kullanılarak bitümler modifiye edilmektedir. Bu amaçla, bitüm modifikasyonu için özellikle polimer kökenli malzemeler kullanılarak kaplamaların özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır (Padhan ve Sreeram, 2018, Shi ve diğ., 2018, Xia ve diğ., 2021, Zhu ve diğ., 2014).

Polimer malzemelerin bitüme eklenmesiyle polimer modifiyeli bitümler (PMB) elde edilmektedir. PMB, polimer katkıların mekanik karıştırma veya kimyasal reaksiyon yoluyla bitüme eklenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bitüm modifikasyonunda kullanılan polimer malzemeler polietilen (PE), polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), etilen-vinil-asetat (EVA), etilen-bütül-akrilat (EBA) ve stiren-bütadien-stiren (SBS) olarak bilinmektedir. Bu polimerlerin modifikasyonda kullanıldığı çalışmalarda, modifiye bitümün yüksek ve düşük sıcaklıklardaki deformasyonlara karşı direncinin arttığı ve daha uzun yorulma ömrüne sahip oldukları ifade edilmiştir (Geçkil ve diğ., 2020, Yusoff ve diğ., 2019).

Ancak, modifikasyonda kullanılan bu polimerlerin büyük çoğunluğunun maliyetli ve yüksek erime noktasına sahip olması, bununla birlikte yol mühendisliğinin en önemli sorunlardan biri olan depolama kararlılığını olumsuz olarak etkilemesi araştırmacıları bu olumsuz durumlara karşı çözüm kaynağı olabilecek nanomateryalleri bitüm modifikasyonunda kullanmaya yönlendirmiştir (Bala ve diğ., 2018, Geçkil ve diğ., 2021, Lu ve Isacson, 2002, Xia ve diğ., 2021).

PMB'lerde karşılaşılan yaşlanma direncini arttırmak, zayıf depolama kararlılığını iyileştirmek ve bağlayıcının esnekliğini artırmak amacıyla son yıllarda nano malzemeler bitüm modifikasyonunda sıkça kullanılmaya başlamıştır (Yusoff ve diğ., 2019, Zhu ve diğ., 2014). Nano malzemeler, çok küçük tane boyutuna sahip ve düşük üretim maliyetli olan malzemelerdir. Yapılan çalışmalarda nanokil, nano hidratlı kireç ve nano karbonat, nanotüp gibi nano boyuttaki malzemelerin bitümlü bağlayıcıların ve sıcak karışımların mühendislik özelliklerini iyileştirmede oldukça etkili olduğu görülmüştür (Almahali ve diğ., 2016, Bala ve diğ., 2018, Lazzara ve Milioto, 2010).

Bu çalışmada, nano boyuttaki bir malzeme olan nanosilika katkısının modifiye bitümlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılarak sonuçları ulusal literatüre kazandırılmaya çalışılmıştır.

Nanosilika, özel tanecik yapısına sahip, beyaz amorf bir tozdur. Geniş bir yüzey alanına sahip olan bu malzeme iyi adsorpsiyona, dağılma kabiliyetine, kimyasal açıdan yüksek saflığa sahiptir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta mukavemet, tokluk ve termal stabilite açısından da oldukça üstün özellikler göstermektedir (Shi ve diğ., 2018, Yao ve diğ., 2013, Yusoff ve diğ., 2019). Nanosilika katkısının bitüm ve BSK modifikasyonunda kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde, Chen ve arkadaşları (2007), çalışmalarında nanosilika-SBR katkılı modifiye bitümlerin tekerlek izi direncinin arttığını ifade etmişlerdir. Shafabakhsh ve arkadaşları (2019), çalışmalarında nanosilika-SBS kompozit katkılı modifiye bitümlerin sertleşme eğiliminin ve yorulma ömrünün arttığını ifade etmişlerdir. Bala ve arkadaşları (2018), çalışmalarında nanosilika partikülleri içeren PP katkılı modifiye bitümlerin performans özelliklerinin iyileştiğini ifade etmişlerdir. Yao ve arkadaşları (2013), çalışmalarında nanosilika katkılı bitümlerin sıcak karışımlarda kullanılmasıyla, modifiye karışımların tekerlek izi derinliğinin oldukça azaldığını ifade etmişlerdir. Sun ve arkadaşları (2017), çalışmalarında nanosilika ile modifiye bitümleri kullanarak sıcak karışımlar hazırlamış ve modifiye karışımların stabilitesinin önemli ölçüde arttığını ifade etmişlerdir.

Çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, nanosilika katkısı bitüme tek bir katkı malzemesi olarak doğrudan ilave edilmiş ve nanosilikanın modifiye bitümlerin kıvamı, viskozitesi ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkileri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite, dönел ince film etüvü (RTFO),



dönel viskozimetre (RV) testleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile belirlenerek sonuçları değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### Materyal (Material)

Bu çalışmada, bitüm modifikasyonunda bağlayıcı olarak penetrasyon sınıfı B 160/220 saf bitüm, katkı malzemesi olarak nanosilika kullanılmıştır. Türkiye Petrol Rafinerileri A.Ş. (TUPRAŞ)'den temin edilen saf bitümün fiziksel özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Saf bitümünün fiziksel özellikleri

*Table 1. Physical properties of pure bitumen*

Özellik	Standart	Limit	Sonuç
Penetrasyon (0,1mm)	ASTM D5	160-220	163
Yumuşama noktası (°C)	ASTM D36	35-43	41,6
Düktilite (cm)	ASTM D113	min. 100	125
Parlama noktası (°C)	ASTM D92	min. 220	244
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM D70	1,0-1,1	1,038
Penetrasyon indeksi (PI)	-	-	-0,27
Kütle kaybı (%)	ASTM D2872	maks. 1,0	0,47

Modifikasyonda kullanılan nanosilika, Elkem Silikon Materyal fabrikasından temin edilmiş ve özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Nanosilika'nın genel özellikleri

*Table 2. General properties of nanosilica*

Özellik	Nanosilika
Form	Ultra ince amorf toz
Koku	Kokusuz
Erime Noktası (°C)	1550-1570
Çözünürlük (Su)	Çözünmez/Hafifçe çözünür
Çözünürlük (Organik Çözücüler)	Çözünmez/Az Çözünür
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	2,2-2,3
Tane boyutu (nm)	11-13
Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /g)	200

### Metot (Method)

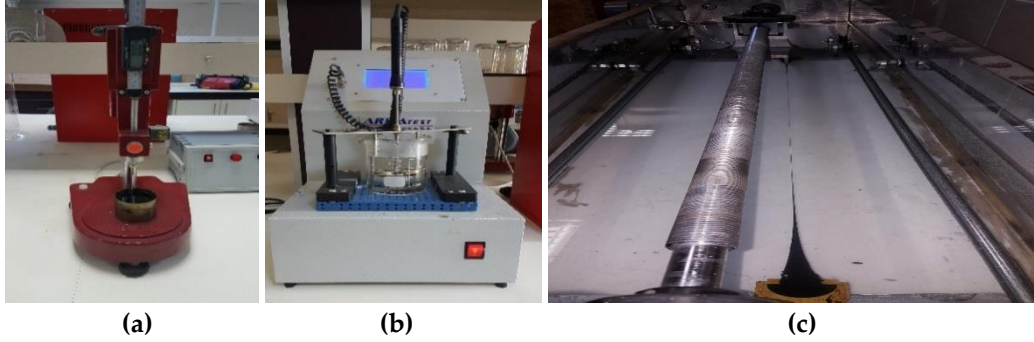
Çalışmada, modifiye bitümler elde etmek amacıyla ilk olarak saf bitüm 150 °C sıcaklığa kadar ısıtıldı. Daha sonra bitüme ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7 oranlarında nanosilika ilave edilerek, 1200 devir/dakika (rpm) hızındaki karıştırıcı ile 60 dakika boyunca aynı sıcaklıkta karıştırma işlemi yapıldı ve modifiye bitümler hazırlandı. Elde edilen saf ve modifiye bitümlerin fiziksel özellikleri geleneksel testlerle, işlenebilirlik özelliği RV deneyi ile ve bağlayıcıların mikroyapısındaki değişim ise SEM analizi ile belirlendi.

Çalışmada, saf ve modifiye bitümler sırasıyla B, B+%1N, B+%3N, B+%5N ve B+%7N olarak kodlanmıştır.

## DENEYSSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

### Bağlayıcıların Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Physical Properties of Binders)

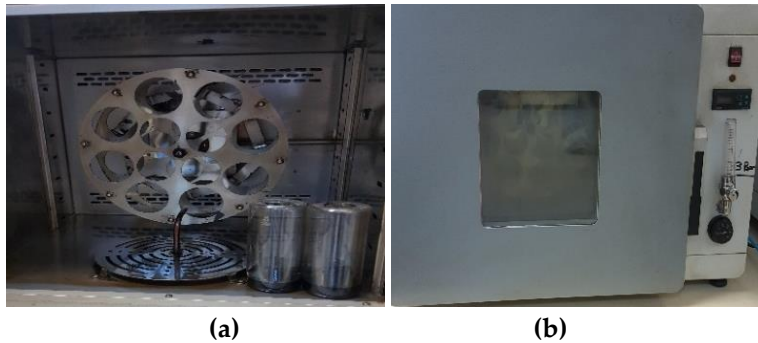
Saf ve nanosilika katkılı bitümlerin fiziksel özellikleri penetrasyon, yumuşama noktası, duktilite ve RTFO gibi geleneksel testlerle belirlenmiştir. Penetrasyon deneyi (Şekil 1a), bitümlerin kıvamı/sertliği hakkında bilgi sahibi olmak için uygulanmaktadır. Deney 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilir ve 100 gr ağırlığındaki bir iğnenin 5 saniye süreyle bitüm içerisinde ilerlediği düşey mesafe olarak tanımlanır. Penetrasyon birimi  $10^{-1}$  mm'dir (ASTM D5). Yumuşama noktası deneyi (Şekil 1b), bitümlerin yüksek sıcaklıklardaki direncini ölçmeyi amaçlar. Deneyde, bitümün belirli bir hızda ısıtılması sonucunda sıcaklığın artması ile yumuşamaya başlayıp tabana temas ettiği andaki sıcaklık tespit edilir (ASTM D36). Duktilite deneyi (Şekil 1c), bitümlerin uzama kabiliyetini belirlemek amacıyla yapılır. Deneyde, standart kalıp içerisinde hazırlanmış bağlayıcının, 25°C sıcaklıkta 5cm/dakika hızla her iki ucundan çekilerek kopuncaya kadar uzadığı mesafe tespit edilir. Duktilite birimi cm'dir (ASTM D113).



Şekil 1. Penetrasyon (a), yumuşama noktası (b) ve duktilite (c) deneyleri

Figure 1. Penetration (a), softening point (b) and ductility (c) tests

RTFO deneyi, bitümlü bağlayıcıların plentte hazırlanma, taşınma, depolanma gibi servis öncesi süreçlerde sıcaklık ve çevre etkileriyle yaşlanması laboratuvar ortamında RTFO testi ile simüle edilmektedir. Deneyde, 8 adet özel şişe (Şekil 2a) içerisine yaklaşık 35 gr bağlayıcı eklenerek şişeler 163 °C sıcaklıktaki etüve koyulur (Şekil 2b). Etüv içerisinde şişeler dakikada 15 devir yapacak şekilde hazırlanmış olan tablaya yerleştirilir ve 80 dakika boyunca şişelere 4000±200 mL/dak olacak şekilde hava verilerek bağlayıcılar yaşlandırılır. Deney bitiminde, bağlayıcıların bünyesinde meydana gelen uçucu madde kaybı kütle kaybı hesabı ile tayin edilir. Kütle kaybı, ilk kütle ile son kütle arasındaki farkın ilk kütleyle bölünmesi ile hesaplanır. Bu deneyle bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki yaşlanma ve oksidasyona karşı direnci değerlendirilebilmektedir (Geçkil ve diğ., 2021).



Şekil 2. RTFOT şişeleri (a) ve RTFOT cihazı (b)

Figure 2. RTFOT bottles (a) and RTFOT device (b)

Çalışmada, fiziksel test sonuçları yardımı ile bitümlerin sıcaklığa karşı hassasiyetlerinin bir parametresi olarak değerlendirilen PI değerleri de denklem 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$PI = \frac{1952 - 500 \times \log(Pen_{25}) - 20 \times SP}{50 \times \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (1)$$

Denklemden  $Pen_{25}$ , 25 °C'deki penetrasyon değerini,  $SP$  ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. PI değerinin artması, bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını ve sertliğinin arttığını göstermektedir. BSK'da, yüksek PI değerine sahip bir bitüm kullanıldığında, karışımların düşük sıcaklıklarda kırılmaya ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı daha dirençli hale geldiği değerlendirilmektedir (Geçkil ve diğ., 2021).

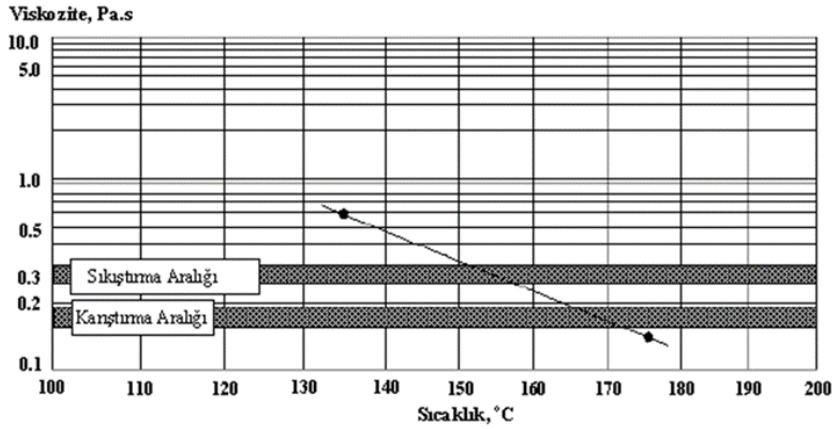
### Bağlayıcıların Viskozite Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of Viscosity Values of Binders)

Bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki viskoziteleri ASTM D4402 standardına göre gerçekleştirilen RV deneyi (Şekil 3) ile belirlenmektedir. Bağlayıcıların yüksek sıcaklıklardaki viskozite değerleri, plente karıştırma ve yoldaki serme esnasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Asfalt enstitüsü tarafından, bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının tespiti için 135 °C ve 165 °C'deki viskozite değerlerinin tespit edilmesi önerilmektedir. Ancak, 135°C'de bağlayıcıların viskozite değerlerinin 3000 cP'yi aşmaması istenmektedir. RV testi sonucunda elde edilen viskozite değerleri kullanılarak çizilen viskozite-sıcaklık grafiği (Şekil 4) yardımı ile BSK'nın karıştırma ve sıkıştırma sıcaklık aralıkları da tespit edilmektedir. Karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının belirlenmesinde sırasıyla 170±20 ve 280±30 cP viskozite sınırlarına karşılık gelen sıcaklık aralıklarının kullanılması önerilmektedir (Alataş ve Kizirgil, 2012, Mcgennis ve diğ., 1994, Zaniwski ve Pumphrey, 2004).



Şekil 3. RV cihazı

Figure 3. RV device



Şekil 4. Viskozite-sıcaklık eğrisi (Alataş ve Kizirgil, 2012)

Figure 4. Viscosity-temperature curve (Alataş ve Kizirgil, 2012)

### Bağlayıcıların Mikroyapısal Analizi (Microstructural Analysis of Binders)

Saf ve nanosilika katkılı bitümlerin, mikroyapılarında yapılarında meydana gelen değişim SEM analizi ile belirlenmiştir. SEM, nano ve makro boyuttaki malzemelerin fiziksel ve kimyasal yapılarında meydana gelen değişimleri belirlemek için kullanılır (Ates ve Yesilbag, 2019). Bununla birlikte, modifiye bitümlerin faz yapıları ve katkı-bitüm uyumu da SEM görüntüleri yardımıyla belirlenebilmektedir (Mazumder ve diğ., 2018).

### DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

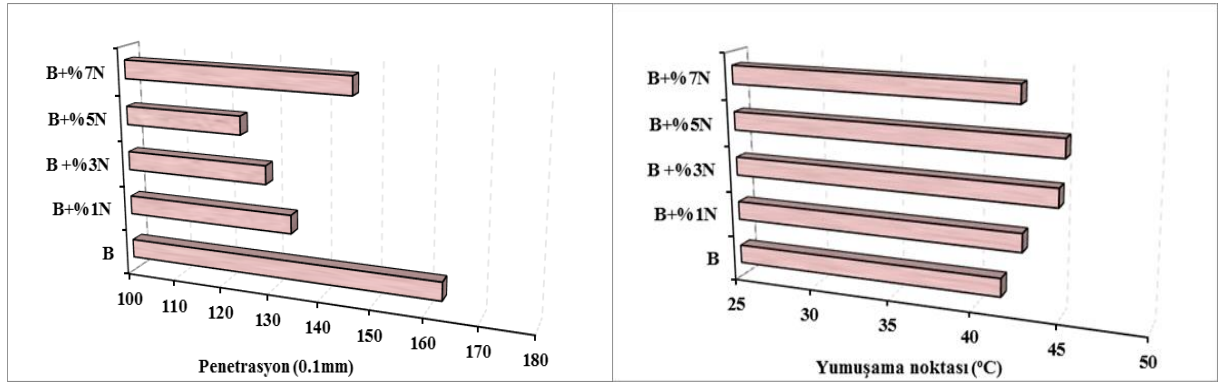
#### Fiziksel Test Sonuçları (Physical Test Results)

Bu çalışmada, saf ve nanosilika katkılı bitümlerin fiziksel özellikleri geleneksel bitüm testleri yardımı ile belirlenmiştir. Ayrıca, bağlayıcıların PI değerleri de hesaplanarak tüm sonuçlar Çizelge 3’de verilmiştir. Bağlayıcıların penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite değerlerinin katkı oranı ile değişimi ise Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.

Çizelge 3. Geleneksel test sonuçları

Table 3. Conventional test results

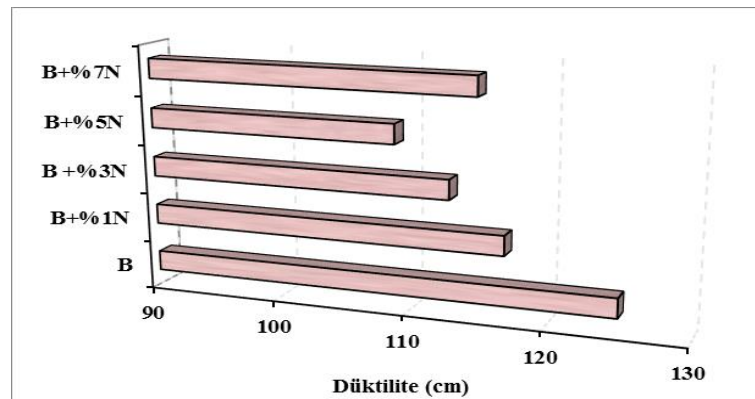
Özellik	Bağlayıcı türleri				
	B	B+%1N	B +%3N	B+%5N	B+%7N
Penetrasyon (0.1mm)	163	134	129	124	146
Yumuşama noktası (°C)	41,6	42,8	44,8	45,1	42,6
Düktilite (cm)	125	117	113	109	115
PI	-0,27	-0,57	-0,05	-0,004	-0,32
<i>RTFOT sonrası</i>					
Kütle kaybı (%)	0,47	0,08	0,10	0,15	0,06



Şekil 5. Bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değişimleri

Figure 5. The changes of penetration and softening point of the binders

Şekil 5’de görüldüğü gibi, B 160/220 penetrasyon sınıfı saf bitüme nanosilika ilavesiyle bağlayıcıların penetrasyon değerlerinde değişimler meydana gelmiştir. Meydana gelen bu değişimler saf bitüme kıyasla sırasıyla %17,8 %20,9; %23,9 ve %10,4 oranında azalma şeklindedir. Bu durum, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların sertleşme eğiliminin giderek arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, nanosilika ilavesiyle oluşan bu sertleşmenin doğal bir sonucu olarak, bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri de saf bağlayıcıya kıyasla sırasıyla %2,9; %7,7; %8,4 ve %2,4 oranında artış göstermiştir. Tüm bu sonuçlar, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların sertliğinin arttığını, bu sebeple nanosilika katkılı bağlayıcıların daha yüksek sıcaklığa sahip bölgelerde kalıcı deformasyon direncini arttırmak amacıyla BSK kaplamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.



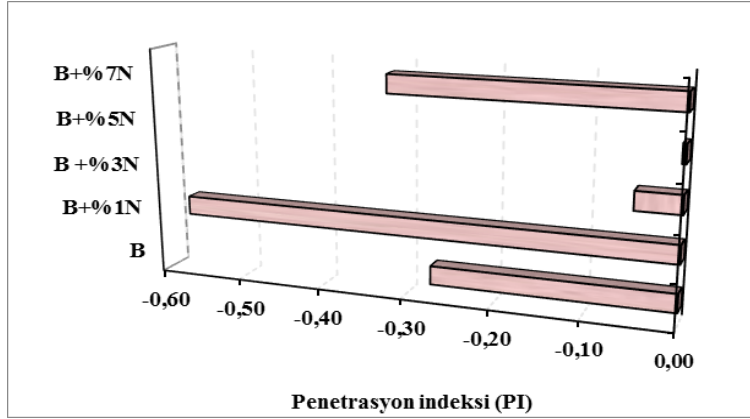
Şekil 6. Bağlayıcıların düktilite değişimleri

Figure 6. The changes of ductility of the binders

Şekil 6 incelendiğinde, nanosilika katkı oranı artışıyla bağlayıcıların düktilite değerlerinde değişimler meydana geldiği görülmektedir. Bu değişimler saf bitüme kıyasla sırasıyla %6,4; %9,6; %12,8 ve %8 azalmalar, bağlayıcıların uzama ve kohezyon yeteneğinin azaldığını gösterse de bu durum olumsuz olarak değerlendirilmemektedir. Çünkü, ASTM D113 standardının saf bağlayıcılar için öngördüğü en az 100 mm uzama yeteneği nanosilika modifiyeli bağlayıcılar için de sağlanmaktadır. Bu durumda, bağlayıcıların kohezyonu ve elastikiyeti üzerinde nanosilikanın olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Modifiye bağlayıcıların fiziksel test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, %5 oranının kritik bir değer olduğu görülmektedir. Bu durum, %5 oranından daha fazla katkı kullanıldığında yüksek özgül ağırlığı sebebiyle katkının karışım içerisinde dibe çökmesinden kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir.

Nanosilika katkı oranına bağlı olarak bağlayıcıların PI değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 7'de verilmiştir.

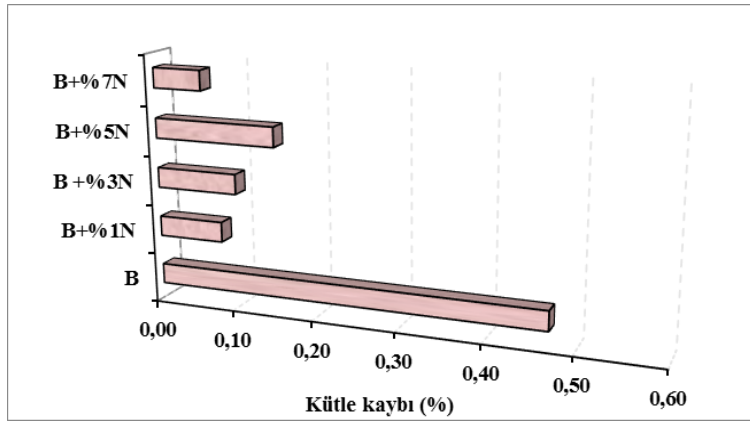


Şekil 7. Bağlayıcıların PI değişimleri

Figure 7. The changes of PI of the binders

Şekil 7 incelendiğinde, nanosilika katkı oranı atışı ile bağlayıcıların PI değerlerinin değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, özellikle B+%5N bağlayıcısının PI değerinde meydana gelen artış, bu orandaki bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetlerinin azalması sebebiyle nanosilika katkı bağlayıcıların özellikle kalıcı deformasyonlara ve düşük sıcaklık çatlaklarına karşı daha dirençli olacağını göstermektedir (Geçkil ve diğ.,2021).

Saf ve nanosilika katkılu bağlayıcıların, yüksek sıcaklık ve hava etkisiyle bünyelerinde meydana gelen uçucu madde kaybı RTFOT ile belirlenmiştir. Nanosilika katkı oranına bağlı olarak, bağlayıcıların kütle kaybı değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 8'de verilmiştir.



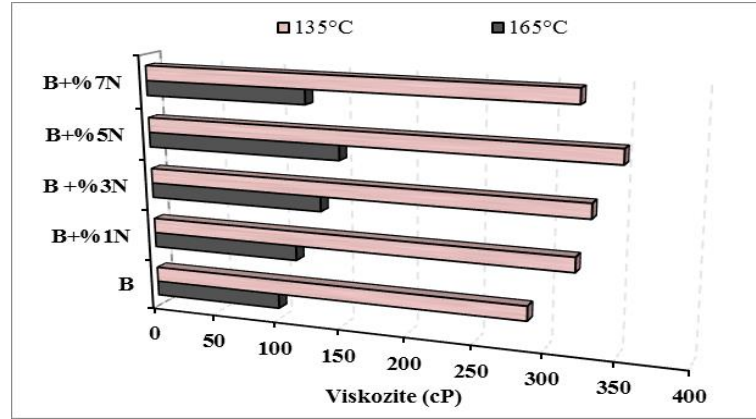
Şekil 8. Bağlayıcıların kütle kaybı değişimleri

Figure 8. The changes of mass loss of the binders

Şekil 8 incelendiğinde, saf ve nanosilika katkılu bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelen kütle kayıpları şartnamenin öngördüğü sınırın (maks. 1,0) oldukça altında kaldığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, nanosilika katkısının bağlayıcıların yaşlanması veya sertleşmesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmadığı ve nanosilika ilavesinin bağlayıcıları yüksek sıcaklık ve oksidasyona karşı daha dirençli hale getirdiği söylenebilir. Bu durumun nanosilika ile iyileşen mikro yapıdan yani büyük yüzey alanına sahip nanosilika partiküllerinin bitüm ile iyi bir adsorpsiyon oluşturması sonucunda elde edilen yüksek matrisli yapısından kaynaklandığı (Karnati ve diğ., 2020) değerlendirilmektedir.

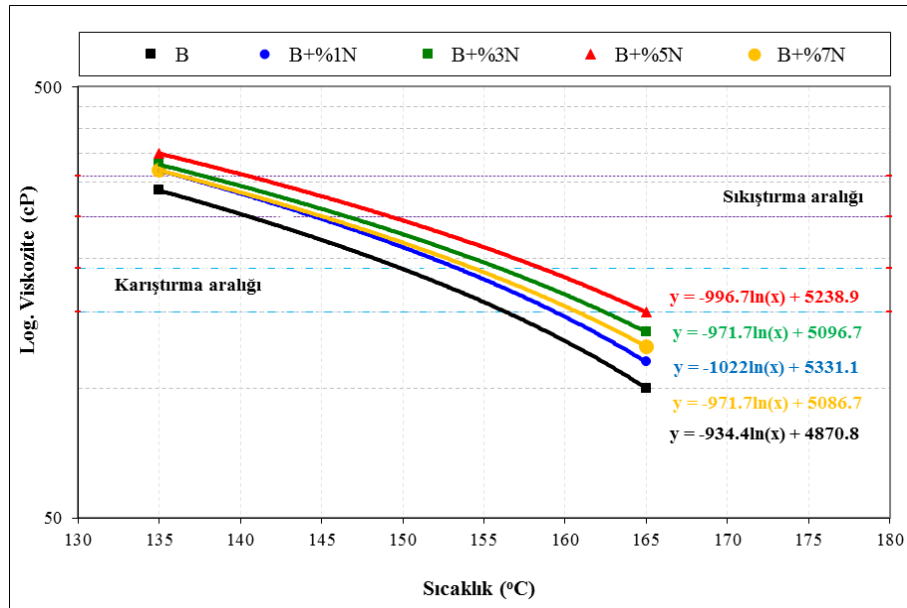
### RV Sonuçları (RV Results)

Saf ve nanosilika modifiyeli bitümlerin, 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskoziteleri Brookfield DV-III dönel viskozimetre cihazı kullanılarak belirlendi. Bitümlü bağlayıcıların işlenebilirlik sıcaklıkları olan plentteki karıştırma ve yoldaki serme sıcaklıkları, belirlenen bu viskozite değerleri yardımıyla oluşturulan sıcaklık-viskozite grafiği yardımı ile tespit edildi. Saf ve nanosilika katkılı bağlayıcıların viskozite değerleri Şekil 9'da, sıcaklık-viskozite grafiği Şekil 10'da, bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları ise Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. Bağlayıcıların viskozite değerleri

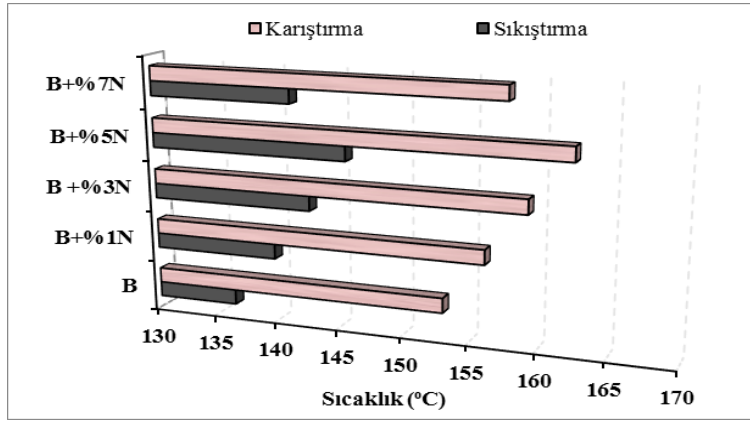
Figure 9. Viscosity values of binders



Şekil 10. Bağlayıcıların sıcaklık-viskozite grafiği

Figure 10. Temperature-viscosity graph of binders

Şekil 10'da görüldüğü gibi, nanosilika katkı oranı artışıyla bağlayıcıların 135 °C ve 165 °C sıcaklıklardaki viskozite değerlerinde önemli oranda değişimler meydana gelmiştir. 135 °C'de meydana gelen değişimler saf bitüme kıyasla sırasıyla %11,3; %14,8; %21,7 ve %11,3 artış, 165 °C sıcaklık için ise sırasıyla %15; %35; %50 ve %25 artış şeklindedir. Bu artışlar, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların kıvamında sertleşme meydana geldiğini ve dolayısıyla akıcılıklarının azaldığını ifade etmektedir.

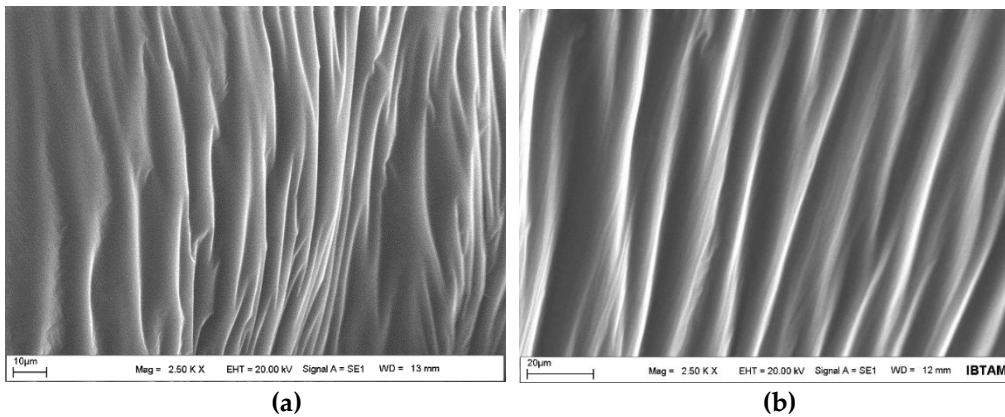


Şekil 11. Bağlayıcıların ortalama karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları  
Figure 11. Average mixing-compaction temperatures of the binders

Şekil 11’de modifiye bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarında meydana gelen değişimler saf bitüme kıyasla sırasıyla karıştırma için %2,0; %4,1; %6,1 ve %3,1 artış; sıkıştırma için ise %2,5; %4,6; %6,7 ve %3,6 artış şeklindedir. Meydana gelen bu artışlar incelendiğinde, özellikle %5 nanosilika katkılı bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının diğer bağlayıcılara nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, %5 nanosilika katkılı bağlayıcıların kıvamında meydana gelen sertleşmeyle birlikte işlenebilirliğinin azalması ve dolayısıyla bu orandaki bağlayıcının karıştırma ve sıkıştırma sıcaklığının da artış göstermesi beklenen bir sonuçtur. Tüm bu sonuçlara göre, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların ortalama karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının artış göstermesi sebebiyle nanosilika modifiye bağlayıcıların plentteki enerji sarfiyatını kısmen de olsa arttıracığı ifade edilebilir. Ancak, bitüm modifikasyonunda etkinliği kanıtlanmış SBS polimerinin karıştırma sıcaklığının 180 °C’ye kadar ulaştığı (Geçkil ve diğ., 2021) göz önüne alındığında bu enerji sarfiyatının göz ardı edilebileceğini söylemek mümkündür.

#### Mikroyapısal Analiz Sonuçları (Microstructural Analysis Results)

Çalışmada, nanosilika katkısının bitümlü bağlayıcıların mikroyapısal yapısı üzerindeki etkileri SEM analizi ile belirlenmiştir. Saf bitüm (B) ile bağlayıcı özelliklerini iyileştirmede kritik bir oran olan %5 nanosilika katkılı bağlayıcının (B+%5N) SEM görüntüleri 2.5K büyütmeyle elde edilmiş ve Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Saf bitüm (a) ve B+%5N bağlayıcısının (b) SEM görüntüleri  
Figure 12. SEM images of pure bitumen (a) and B + 5% N binder (b)

Şekil 12’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, saf bitümün yüzey morfolojisinin oldukça homojen ve tek fazlı bir yapıda olduğu görülmektedir (Şekil 12a). Saf bitüm numunesinde yapısal



gerilmeler sonucunda büzölmeler meydana gelmiştir ki bu durum, oda koşullarındaki soğumadan dolayı kaynaklanmaktadır. Şekil 12b'de %5 nanosilika katkıli bağlayıcının SEM görüntüsü incelendiğinde ise, elde edilen görüntünün saf bitümün yüzey morfolojisine oldukça benzer yapıda olduğu görölmektedir. Bu durumda, nanosilika katkısının bitüm ile homojen olarak karıştığını ve bitüm matrisinin yüzey ara kuvvetini iyileştirerek modifiye karışımın yüksek matrisli bir yapı gibi davranmasını sağladığı (Karnati ve diğ., 2020) ifade edilebilir. Bununla birlikte, kritik bir oran olan %5 nanosilika içeriğinde aglomerasyonların oluşmaması (Shi ve diğ., 2018), elde edilen modifiye karışımın homojen olduğunu (Sui ve diğ., 2018) kanıtlamaktadır. Ayrıca, nanosilika'nın iyi adsorpsiyon özelliğine sahip olması sebebiyle bitüm ile arasında daha iyi bir yapışma yeteneği oluşturabileceği (Shi ve diğ., 2018) de ifade edilebilir.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, nanosilika katkısının bitümün kıvamı, viskozitesi ve mikroyapısı üzerindeki etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Penetrasyon sonuçlarına göre, nanosilika katkı oranının artışı ile modifiye bağlayıcıların %5 oranına kadar sertleştiği, %5 oranından sonra tekrar yumuşamaya başladığı görölmüştür. Bu sonucun, yüksek yoğunluğu sebebiyle nanosilikanın bitüm karışımında dibe çökmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.
2. Yumuşama noktası deney sonuçlarının, penetrasyon sonuçları ile paralellik gösterdiği ve %5 oranına kadar yumuşama noktası değerlerinin artış gösterdiği yani bağlayıcının sertleştiği, ancak bu orandan sonra yumuşama noktası değerlerinin azalmaya başladığı görölmüştür.
3. Düktilite sonuçlarına göre, nanosilika katkısının modifiye bağlayıcıların uzama yeteneği ve kohezyonu üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görölmüştür.
4. PI sonuçlarına göre %5 nanosilika katkıli bağlayıcıların sıcaklığa karşı hassasiyetinin en az olduğu görölmüştür. Bu sonuç, fiziksel test sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde %5 nanosilika katkıli bağlayıcıların yüksek sıcaklardaki kalıcı deformasyon direncinin arttığını ve bu bölgelerde kullanılabilceğini göstermektedir.
5. RTFOT sonuçları, nanosilika katkısının bağlayıcıların yüksek sıcaklık ve oksidasyon direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
6. RV sonuçlarına göre, nanosilika katkısıyla bağlayıcıların viskozite değerlerinin artış gösterdiği ve dolayısıyla nanosilika katkıli bağlayıcıların sertleşmeleri sebebiyle karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının arttığı görölmüştür. Ancak, nanosilikanın bitümün performansını arttırmadaki başarısı, oluşacak enerji sarfiyatını göz ardı edilebileceği şeklinde değerlendirilmektedir.
7. SEM analiz sonuçlarına göre, nanosilika kullanılarak elde edilen bitüm-nanosilika karışımının homojen ve tek fazlı bir yapıda olduğu görölmüştür. Bu homojen yapının, nanosilika modifiyeli bitümün performansı üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu düşünölmektedir.

Sonuç olarak, nanosilika katkısının bitümün orta ve yüksek sıcaklık özellikleri ile sıcaklık hassasiyeti üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu ve yüksek sıcaklıklarda kalıcı deformasyonlara karşı kullanılabilceği görölmüştür. Ayrıca, nanosilikanın bitüm içerisindeki homojen dağılımının bitümlü karışımın performans özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olabileceği değerlendirilmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FYL 2016/99 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alataş, T., Kizirgil, M.E., 2012, "Saf ve polimer modifiyeli bitümlü bağlayıcıların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıklarının dönel viskozimetre deneyi ile belirlenmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 28, Sayı 3, ss. 249-256.

- Almahali, D.I., Hassan, N.A., Albrka Ali, S.I., Wu, J., Liu, Q., Yusoff, N.I., 2016, "Physical and Rheological Characteristics of Polymer Modified Bitumen with Nanosilica Particles", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 41, pp. 1521–1530.
- Ates, A., Yesilbag, Y.O., 2019, "Calcium mineralization analysis in human aortic valve using SEM, XRD and EDX", *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 12, No. 2, pp. 1160-1164.
- Bala, N., Napiyah, M., Kamaruddin, I., 2018, "Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance", *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 8, pp. 447-454.
- Chen, X., Liu, S., Sun, L., 2007, "Preparation and properties of emulsion asphalt modified by nanosilica/SBR composite", *China Rubber Industry*, Vol. 54, pp. 337-340.
- Geçkil, T., İnce, C.B., İssi, S., 2021, "Pirina Modifiyeli Bitümlerin Yüksek Sıcaklıklardaki İşlenebilirliği ve Kalıcı Deformasyon Direnci", *Politeknik dergisi*, (Erken görünüm).
- Geçkil, T., Önal, Y., İnce, C.B., 2020, "Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 32, Sayı 1, ss. 157-166.
- Karnati, S.R., Oldham, D., Fini, E.H., Zhang, L., 2020, "Application of surface-modified silica nanoparticles with dual silane coupling agents in bitumen for performance enhancement", *Construction and Building Materials*, Vol. 244, pp. 118324.
- Lazzara, G., Milioto, S., 2010, "Dispersions of nanosilica in biocompatible copolymers", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 95, No. 4, pp. 610-617.
- Lu, X., Isacson, U., 2002, "Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology", *Construction and Building Materials*, Vol. 16, No. 1, pp. 15-22.
- Mazumder, M., Ahmed, R., Ali, A.W., Lee, S.J., 2018, "SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art review", *Construction and Building Materials*, Vol. 186, pp. 313–329.
- Mcgennis, R. B., Shuler, S., Bahia, H. U., 1994, "Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods", Report No: FHWA-SA-94-069, pp. 104.
- Padhan, R.K., Sreeram, A., 2018, "Enhancement of storage stability and rheological properties of polyethylene (PE) modified asphalt using cross linking and reactive polymer based additives", *Construction and Building Materials*, Vol. 188, pp. 772-780.
- Shafabakhsh, G., Rajabi, M., Sahaf, A., 2019, "The fatigue behavior of SBS/nanosilica composite modified asphalt binder and mixture", *Construction and Building Materials*, Vol. 229, pp. 116796.
- Shi, X., Cai, L., Xu, W., Fan, J., Wang, X., 2018, "Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen", *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp. 705-714.
- Sui, H., Ma, G., Yuan, Y., Li, Q., He, L., Wang, Y., Li, X., 2018, "Bitumen-silica interactions in the presence of hydrophilic ionic liquids", *Fuel*, Vol. 233, pp. 860-866.
- Sun, L., Xin, X., Ren, J., 2017, "Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance", *Construction and Building Materials*, Vol. 133, pp. 358-366.
- Xia, T., Chen, X., Xu, J., Li, Y., Zhang, A., 2021, "Influence of hydrophilic nanosilica premixing method on the property of isocyanate-based polymer modified bitumen", *Construction and Building Materials*, Vol. 275, pp. 122174.
- Yao, H., vd. 2013, "Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 11, pp. 1619-1630.
- Yusoff, N.I., Alhamali, D.I., Ibrahim, A.N.H., Rosyidi, S.A.P., Hassan, N.A., 2019, "Engineering characteristics of nanosilica/polymer-modified bitumen and predicting their rheological properties using multilayer perceptron neural network model", *Construction and Building Materials*, Vol. 204, pp. 781-799.

- Zaniewski, J. P., Pumphrey, M. E., 2004, "Evaluation of Performance Graded Asphalt Binder Equipment and Testing Protocol", *Asphalt Technology Program*, pp. 107.
- Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N., 2014, "Polymer modification of bitumen: advances and challenges", *European Polymer Journal*, Vol. 54, pp. 18-38.



## PERFORMANCE COMPARISON OF PID CONTROLLER AND FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR WATER LEVEL CONTROL WITH APPLYING TIME DELAY

Fuad ALHAJ OMAR 

Zonguldak Bülent Ecevit University, Department of Electric and Energy, Zonguldak, TURKEY

[fuad.a@beun.edu.tr](mailto:fuad.a@beun.edu.tr)

(Geliş/Received: 31.07.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.09.2021)

**ABSTRACT:** Liquid level control is a system often found in most industrial facilities. Usually, embedded control systems are used, as these systems play an increasingly important role in control engineering. Time delay is one of the most important parameters which affects the control systems performance. This study aims to design a water level control system in MATLAB/ Simulink environment using the proportional integral derivative (PID) controller and Fuzzy Logic (FL) controller and then to investigate the effect of the time delay on their performance. The two control systems were tested and compared in terms of performance, with and without applying a time delay. The study highlights the application of two types of delays (distributed time delay and discrete-time delay) to the output of the built-in control system and discusses the results. The results showed that the FL controller is better than the PID controller in terms of stability and performance. Although the rise time of both controllers was almost the same, the FL controller showed higher performance in terms of overshoot and settling time. While the overshoot for the PID controller was 9.33 %, it did not appear when using the FL controller. Moreover, the settling time of the PID controller was 10 seconds, while the FL controller took only 8.6 seconds to achieve stabilization. As a result, the FL controller has demonstrated the ability to eliminate the overshoot problem that appears when using PID controllers and stabilize faster.

**Key Words:** Embedded control system, PID controller, FL controller, Distributed time delay, Discrete-time delay.

### Zaman Gecikmesi Uygulanarak Su Seviyesi Kontrolü İçin PID Kontrolör ve Bulanık Mantık Kontrolörünün Performans Karşılaştırması

**ÖZ:** Sıvı seviye kontrolü, çoğu endüstriyel tesiste sıklıkla bulunan bir sistemdir. Genellikle gömülü kontrol sistemleri kullanılır, çünkü bu sistemler kontrol mühendisliğinde giderek daha önemli bir rol oynar. Zaman gecikmesi, kontrol sistemlerinin performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bu çalışma, MATLAB/Simulink ortamında orantılı integral türev (PID) denetleyicisi ve Bulanık Mantık (FL) denetleyicisi kullanarak bir su seviyesi kontrol sistemi tasarlamayı ve ardından zaman gecikmesinin performanslarına etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. İki kontrol sistemi, zaman gecikmesi uygulanarak ve uygulanmadan performans açısından test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, kontrol sisteminin çıkışına iki tür gecikmenin (dağıtılmış zaman gecikmesi ve ayrık zaman gecikmesi) uygulanmasını vurgular ve sonuçları tartışır. Sonuçlar, FL kontrolörünün kararlılık ve performans açısından PID kontrolörden daha iyi olduğunu göstermiştir. Her iki kontrolörün yükselme süresi hemen hemen aynı olmasına rağmen, FL kontrolör aşım ve yerleşme süresi açısından daha yüksek performans göstermiştir. PID kontrolörü için aşım %9,33 iken, FL kontrolörü kullanılırken görülüyordu. Ayrıca, PID kontrolörünün yerleşme süresi 10 saniye iken, FL kontrolörünün stabilizasyonu sağlama süresi sadece 8,6

saniye sürmüştür. Sonuç olarak, FL kontrolörü, PID kontrolörleri kullanılırken ortaya çıkan aşma sorununu ortadan kaldırma ve daha hızlı stabilize etme yeteneğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gömülü kontrol sistemi, PID kontrolörü, FL kontrolörü, Dağıtılmış zaman gecikmesi, Ayrık zaman gecikmesi.

## 1. INTRODUCTION

Control systems are an essential part of the control process in laboratories, industrial facilities, and many other electronic systems. Therefore, the process of developing these systems has been an area of interest to researchers and specialists in order to meet the new needs of control systems and solve problems that the currently used systems still suffer from (Yang 2012). Embedded control systems are systems in which control algorithms are implemented in real-time by using feedback. Embedded control systems are the synthesis between digital techniques and control theory. Every electrical or mechanical system that contains a control unit and is implemented depending on a digital processor is called an embedded system (Petkov *et al.*, 2018).

The control of the liquid level in the tank is an important aspect widely used in industrial processes (Al Tahtawi and Marsya 2020) (Thakur *et al.*, 2015). In order to obtain high-quality products, the liquid level in the tank must be maintained at a specific point. Since the parameters of the industrial plant change frequently, maintaining the water level at a specific point is difficult (Shahid *et al.*, 2016). For this reason, the liquid level control system is considered a complex system that traditional control methods are insufficient to deal with (Yumurtacı and Verim, 2020). Thus, it is necessary to employ an embedded control system capable of adjusting the liquid level at its set point and which is not affected by the variable disturbances in the plant (Thakur *et al.*, 2015). In such applications, the PID controller is one of the most widely used controllers. By adjusting the parameters of the PID controller according to the nature of the system, the best performance can be obtained (Mukhtar *et al.*, 2019). However, since PID parameters tuning is a challenging task, effective control is difficult to obtain (George and Ganesan, 2020). Therefore, using the FL controller was suggested as a solution to overcome these problems (Dinesh *et al.*, 2015). Many studies made a comparison between the performance of the FL controller and the PID controller in terms of maintaining the level of liquid in a tank, and they found that the FL controller has better stability, smaller overshoot, and fast response (Shahid *et al.*, 2016) (Thakur *et al.*, 2015) (Prusty *et al.*, 2014) (Yahya *et al.*, 2020). Others tested the performance of PID and FL controllers in coupled tank systems and found that FL controller has better performance, and it is a good option for real-world applications (Kumar and Nagpal, 2017). (Shaikh and Kulkarni, 2019) explained that the integration of the FL controller with the PID controller gives a smooth steady-state response without any oscillations or overshoots. The settling time is also improved. (Chen 2021) showed that both PID and FL controllers can control the liquid level to remain stable, but with using the FL controller, the system has better dynamic quality, longer stable response time and higher precision. However, the previous studies did not report any testing of the two control systems to adjust the liquid level in a tank with a time delay applied.

This paper focuses on designing an embedded control system to control the water level in the tank using a PID controller and a FL controller. First, the two controllers will be tested and compared in terms of performance without a time delay being applied. Then the system performance will be tested with a time delay applied to the system output. Two types of time delays will be applied to the system output:

1. Distributed Time Delay.
2. Discrete-Time Delay.

To conduct the design, conduct tests and draw conclusions, MATLAB software will be used, as it provides an environment that meets all the needs of the study.

## 2. MATERIAL AND METHOD

### 2.1. Modeling the system

The system adopted in this research is a water tank shown in Figure 1, where the water level in the tank will be controlled between 0.5 and 1.5 by controlling the valve. The following mathematical equations for the system (water tank) were deduced and modelled using MATLAB.

$$q_{in}(t) = Q_v Valve(t) \quad (1)$$

$$q_{out}(t) = \alpha v_{out} \quad (2)$$

$$v_{out} = \sqrt{2gh(t)} \quad (3)$$

Equation (1) represents the flow rate of water entering the tank.

$Q_v$ : The average pump velocity.

$Valve(t)$ : valve settings.

Equation (2) represents the flow rate of the water leaving the tank.

$\alpha$ : tank hole diameter.

$V_{out}$ : the velocity of the water flow.

Equation (3) represents the velocity of the water leaving the tank, where Bernoulli's law was used.

$g$ : gravitational acceleration.

$h(t)$ : height of the tank.

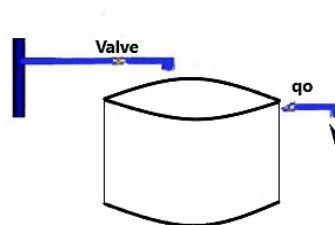


Figure 1. Tank circuit

### 2.2. Work methodology

The working mechanism depends on calculating the error value, which is the difference between the actual value and the desired value. Based on the error value, the controller will adjust the valve to maintain the tank level between 0.5 and 1.5. Figure 2 shows a block diagram of the algorithm.

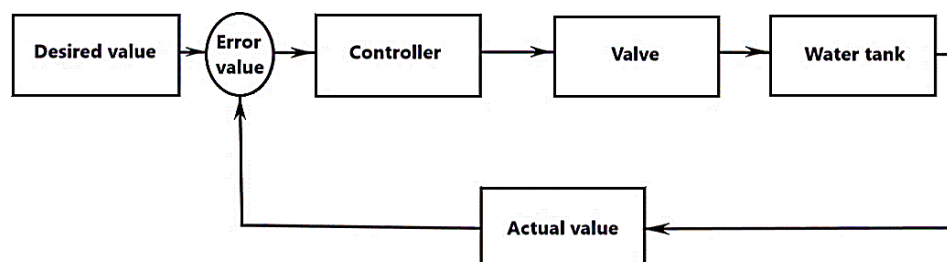


Figure 2. Block diagram of the valve control algorithm

### 2.3. PID controller

This controller made a qualitative leap in improving the performance of control loops, as it provides good results in terms of response time and control accuracy (Torres *et al.*, 2006). It is also distinguished in terms of capabilities due to the diversity of the elements working within this controller. There are proportional controllers, proportional integral controllers, and others to provide the needs of the control system (Muresan *et al.*, 2019). To date, it is still the most preferred type of control system, especially after the introduction of new concepts, such as the synthesis of adaptive controllers (Sreepradha *et al.*, 2016). However, the increasing complexity of control systems required the development of new control mechanisms such as artificial neural networks and FL, which have helped achieve many applications with remarkable success (Kamala *et al.*, 2012). The block diagram of the PID controller is shown in Figure 3. Where  $K_p$  is the proportional gain,  $K_i$  is the integral gain, and  $K_d$  is the derivative gain (Perng *et al.*, 2014).

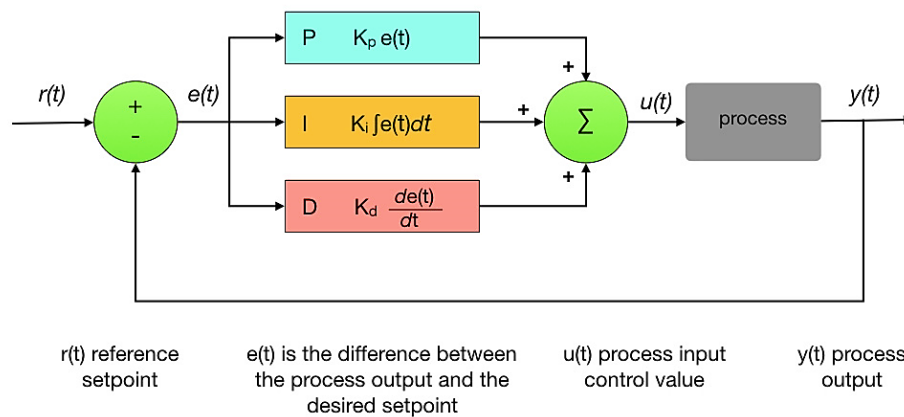


Figure 3. PID Controller

#### 2.3.1. Determining the parameters of the PID controller

PID controller parameters can be determined based on the Ziegler Nichols method, which depends on the response curve of the system shown in Figure 4 (Meshram and Kanojiya, 2012). This method starts making the system unstable by increasing the proportional gain and zeroing the differential and integrative gains. The method then backs off the proportional gain a predetermined amount and sets differential and integrative gains as a function of the oscillation frequency (Ellis, 2012). The parameters of the PID constants can be calculated according to Table (1).

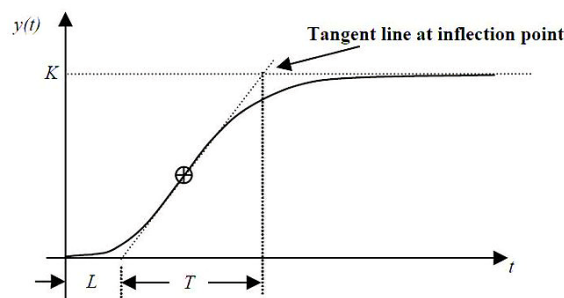


Figure 4. Response Curve of Ziegler-Nichols method

**Table 1.** PID controller parameters

Type of Controller	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	Ku	-	-
PI	0,9 Ku	3L	-
PID	1.2 Ku	2L	0.5L

Where:

$K_u$ : ultimate gain.

$K_p$ : the proportional gain.

$T_i$ : the controller's integrative time constant.

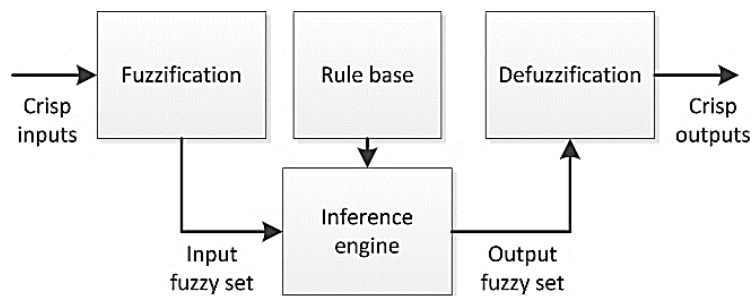
$T_d$ : the controller's differential time constant.

$L$ : delay time.

#### 2.4. FL controller

FL is an approach to computing based on "degrees of truth" rather than the usual "true or false" (1 or 0) Boolean logic on which the modern computer is based (Thompson *et al.*, 2012).

FL is based on fuzzy set theory, which is a generalization of classical set theory, which means that classical sets are a special case of fuzzy sets. In classical sets, the element either belongs to the set or does not at all, while in fuzzy sets, the same element can belong to several sets at the same time (Plerou *et al.*, 2016). The FL controller consists of four main components shown in Figure 5: the Fuzzification, the Rules, the Inference Engine, and the Defuzzification (Boada *et al.*, 2005).



**Figure 5.** FL Controller

### 3. RESULT AND DISCUSSION

#### 3.1. Designing the PID controller

According to Table (1), the values of the parameters of the PID controller were chosen as follows:  $K_p=5$ ,  $K_i=0$ ,  $K_d=1$ .

The system controlled by the PID controller was built in the MATLAB/ Simulink environment as shown in Figure 6. The result of controlling the water level in the tank showed that there is a slight overshoot in the output signal as shown in Figure 7.



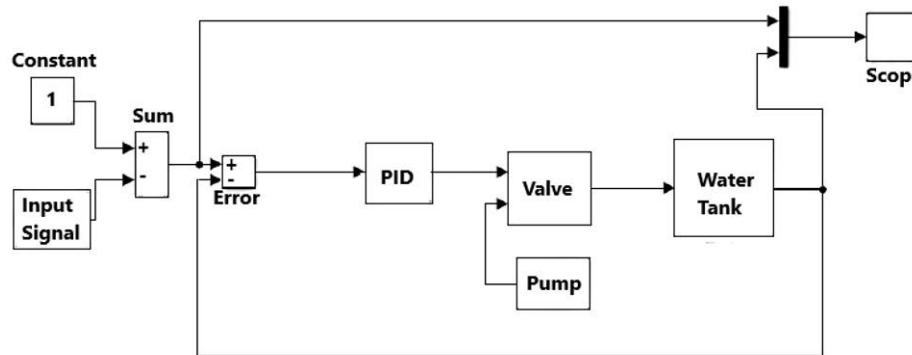


Figure 6. Water tank system with PID controller

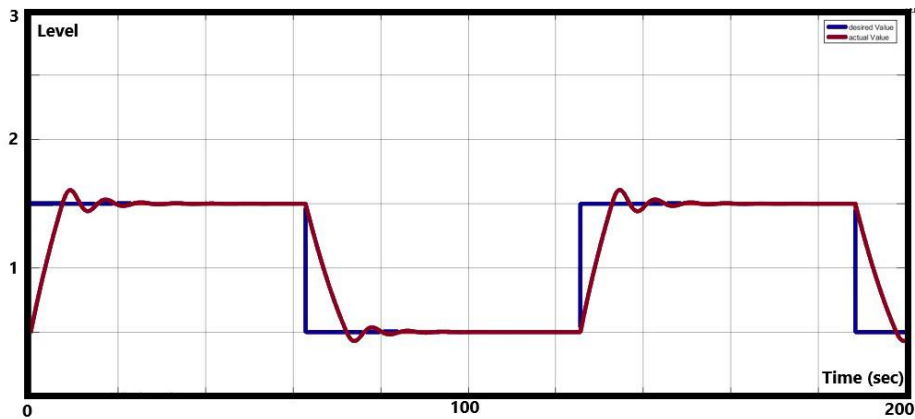


Figure 7. The result of controlling the water level in the tank using the PID controller

### 3.2. Designing the FL controller

The FL controller was built in the MATLAB environment and designed to adjust the water level in the tank by controlling the valve. The FL controller, which was designed as shown in Figure 8, consists of two inputs:

1. Water level (Error).
2. The rate of change of the output.

The output is the valve settings.

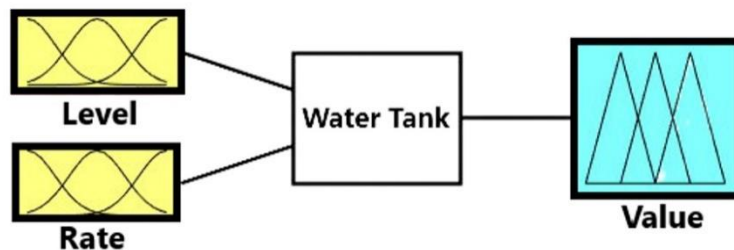
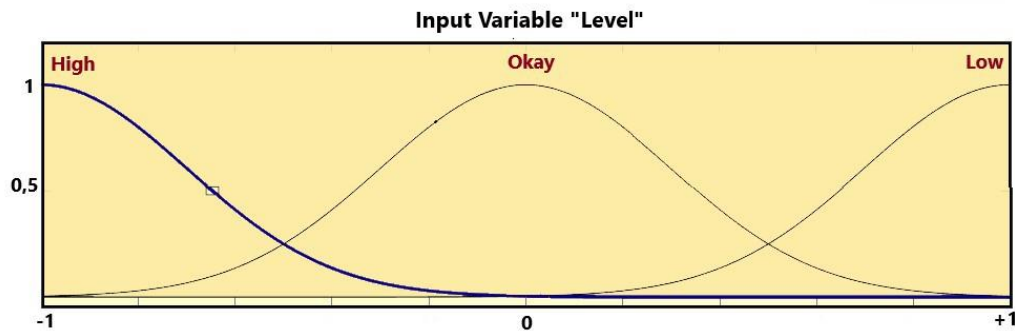


Figure 8. The FL built in MATLAB

Figure 9 shows the membership function of the first input variable of the FL controller. The input variable within the range  $[-1, 1]$  has been divided into three membership functions with a Gaussian distribution:

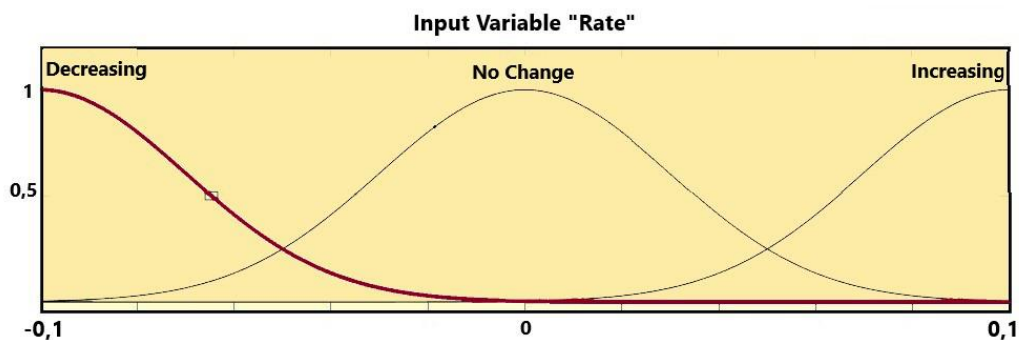
1. **High** within the range  $[-1, -0.3]$ .
2. **Okay** within the range  $[-0.3, 0.3]$ .
3. **Low** within the range  $[0.3, 1]$ .



**Figure 9.** Membership function of the first input variable of the FL controller

Figure 10 shows the membership function of the second input variable of the FL. The input variable within the range  $[-0.1, 0.1]$  has been divided into three membership functions with a Gaussian distribution:

1. Decreasing within the range  $[-0.1, -0.03]$ .
2. No-change within the range  $[-0.03, 0.3]$ .
3. Increasing within the range  $[0.03, 0.1]$ .



**Figure 10.** Membership functions of the second input variable of the FL controller

Figure 11 shows the membership functions of the FL controller's output variable. The variable within the range  $[-1, 1]$  was divided into five membership functions with a trigonometric distribution:

1. Fast close within range  $[-1, -0.9, -0.8]$ .
2. Slow close within the range  $[-0.6, -0.5, -0.4]$ .
3. No-change within the range  $[-0.1, 0, 0.1]$ .
4. Slow open within the range  $[0.2, 0.3, 0.4]$ .
5. Fast open within range  $[0.8, 0.9, 1]$ .

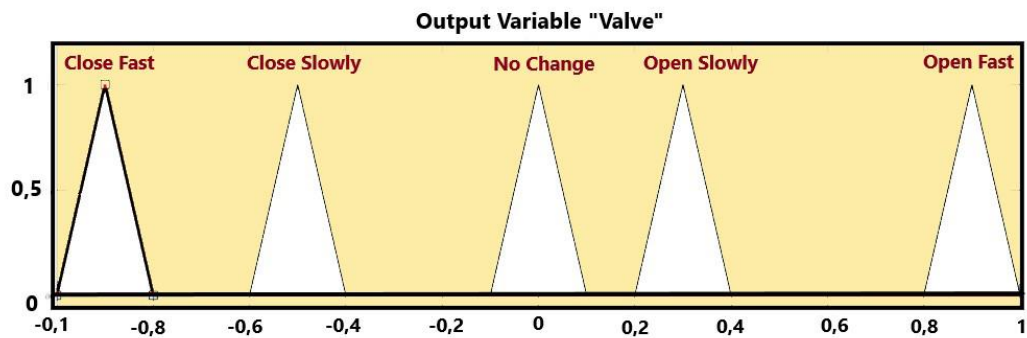


Figure 11. Membership functions of the FL controller's output variable

Five rules were used to control the valve position to maintain the water level in the tank as shown in Table 2.

Table 2. Control rules for FL controller

Rule	Control action
If (Level is High)	then (The valve closes fast)
If (Level is Okay)	then (The valve does not change)
If (Level is Low)	then (The valve opens fast)
If (Level is Okay) and (Rate is increasing)	then (The valve closes slowly)
If (Level is Okay) and (Rate is Decreasing)	then (The valve opens slowly)

The system controlled by the FL controller was built in MATLAB/ Simulink environment as shown in Figure 12. The result of controlling the water level in the tank showed that the overshoot problem was solved by using the FL controller, as shown in the output signal in Figure 13.

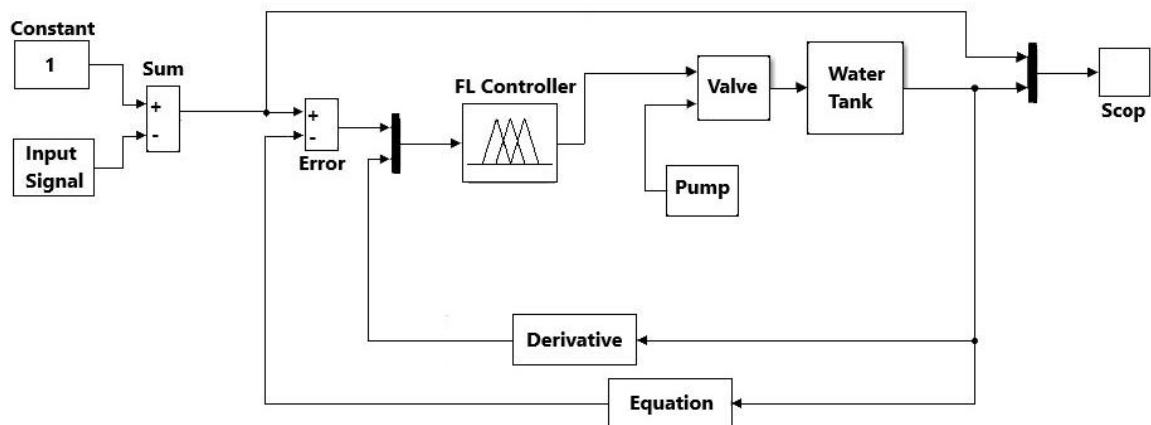
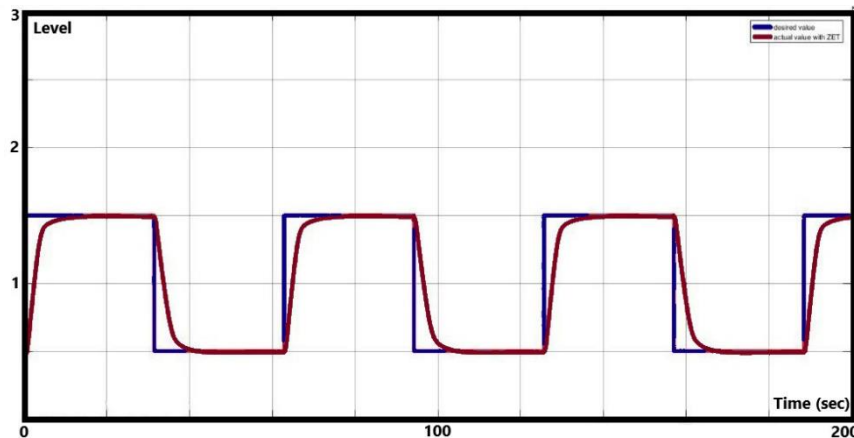


Figure 12. Water tank system with FL controller



**Figure 13.** The result of controlling the water level in the tank using the FL controller

To analyze the results obtained, the comparison of transient responses such as rise time, overshoot and settling time for both controllers are shown in Table 3. In terms of settling time and overshoot, the FL controller showed superior performance compared to the PID controller. While the overshoot using the PID controller was 9.33%, it did not appear with the use of the FL controller. Similarly, the settling time using the PID controller was 10 sec, while by using the FL controller was 8.6 sec. On the other hand, the rise time values were approximately the same, with the PID controller taking 4 seconds while the FL controller taking 4.1 seconds.

**Table 3.** Comparison of transient responses of PID & FL controllers

Controller	rise time (sec)	Overshoot (%)	settling time (sec)
PID	4	9.33	10
FL	4.1	Not present	8.6

### 3.3. Control of the system with a time delay

The two controllers were tested with a system output delay, in which two types of time delays (Distributed Time Delay & Discrete-Time Delay) were applied.

#### 3.3.1. Distributed time delay

The change of the distributed delay output is proportional to the difference between the input and the output and the proportionality constant ( $1/\Delta$ ), and is determined by the following relationship (Beretta and Breda, 2016):

$$\frac{d}{dx}y(t) = \frac{1}{\Delta}[x(t) - y(t)] \quad (4)$$

Depending on the system output (water tank):

$$h'(t) = \frac{1}{\Delta}(q_{in} - q_{out}) = \frac{1}{\Delta}(q_{in} - \alpha\sqrt{2gh(t)}) \quad (5)$$

$\alpha$ : Tank hole diameter.

$q_{in}$ : The water flow rate into the tank.

$q_{out}$ : The water flow rate from the tank.

Assuming:

$$\dot{h} = y', h = y, k = \sqrt{2g}$$

The equation will be as follows:

$$\begin{aligned} y' &= \frac{1}{\Delta} (q_{in} - \alpha k \sqrt{y}) \\ y' &= \frac{q_{in}}{\Delta} - \frac{\alpha k}{\Delta} \sqrt{y} \\ y' + \frac{\alpha k}{\Delta} \sqrt{y} &= \frac{q_{in}}{\Delta} \end{aligned} \quad (6)$$

This is a first-order differential equation that can be solved by Laplace transform:

$$\begin{aligned} L\{y'\} + \frac{\alpha k}{\Delta} L\{\sqrt{Y}\} &= L\left\{\frac{q_{in}}{\Delta}\right\} \\ sY(s) - y(0) + \frac{\alpha k}{\Delta} \frac{\left(\frac{3}{2}\right)}{s^{\frac{3}{2}}} &= \frac{q_{in}}{\Delta} \frac{1}{s} \end{aligned}$$

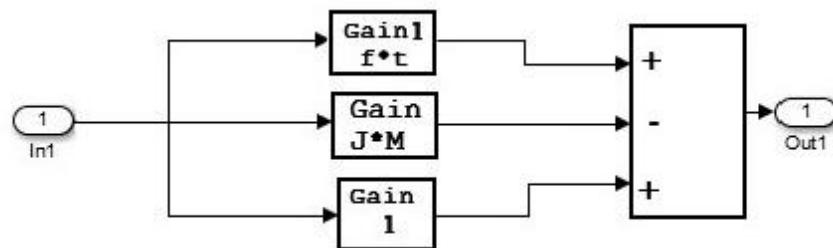
Assuming:  $y(0) = 1$

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{\frac{q_{in}}{\Delta} \frac{1}{s} - \frac{\sqrt{\pi} \alpha k \frac{1}{s^{\frac{3}{2}}}}{2\Delta} + 1}{s} \\ Y(s) &= \frac{q_{in}}{\Delta} \frac{1}{s^2} - \frac{\sqrt{\pi} \alpha k \frac{1}{s^{\frac{5}{2}}}}{2\Delta} + \frac{1}{s} \end{aligned} \quad (7)$$

By applying the inverse Laplace transform to both sides of the relationship (7).

$$\begin{aligned} L^{-1}\{Y(s)\} &= \frac{q_{in}}{\Delta} t - \frac{\sqrt{\pi} \alpha k \sqrt{t^{\frac{3}{2}}}}{2\Delta \frac{3}{4} \sqrt{\pi}} + 1 \\ h(t) &= \frac{q_{in}}{\Delta} t - \frac{2\alpha k}{3\Delta} \sqrt{t^{\frac{3}{2}}} + 1 \end{aligned} \quad (8)$$

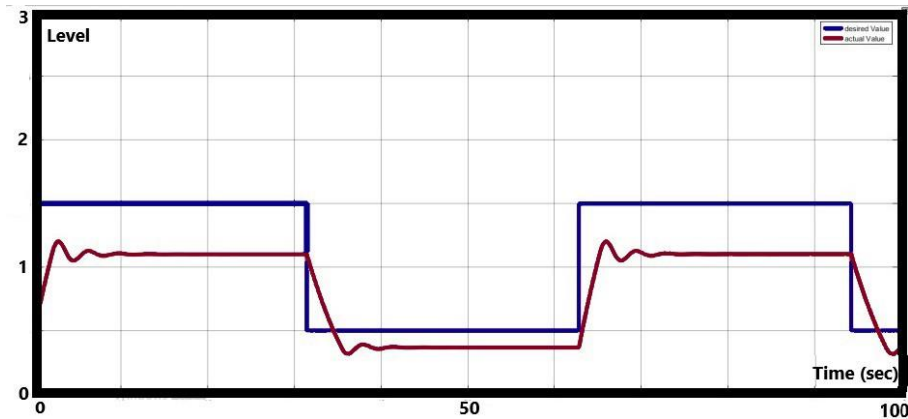
The final solution of equation (8) was modelled in MATLAB, as shown in Figure 14.



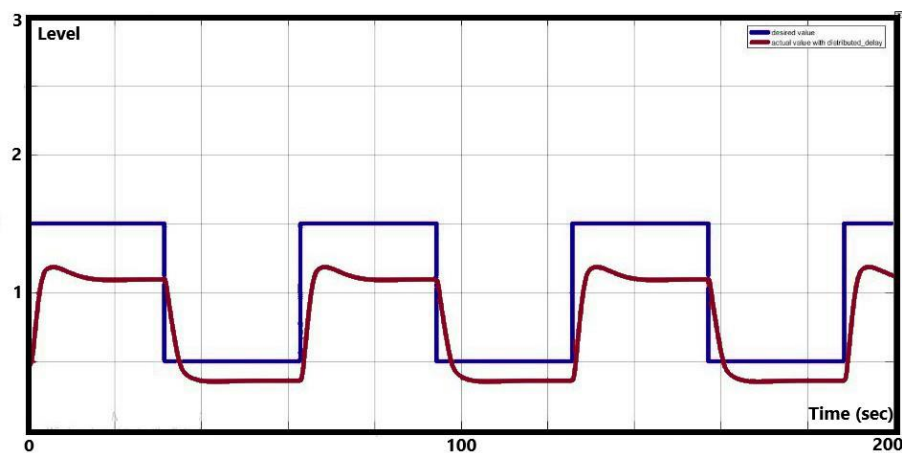
**Figure 14.** Distributed Time Delay Equation Model Using MATLAB

Both controllers have been tested with a time delay of 0.02 sec. Figure 15 shows the result of adjusting the water level in the tank by applying a distributed time delay of 0.02 seconds and using the PID controller for the control process, while Figure 16 shows the result using the FL controllers.

According to the results, when using the FL controller, the application of the time distributed delay shifted the actual output from the desired value by the amount of applied delay. While, when using the PID controller, it shifted the actual output from the desired value with a little vibration.



**Figure 15.** Controlling the water level by using a PID controller and applying a distributed time delay equal to 0.02s



**Figure 16.** Controlling the water level by using FL controller and applying a distributed time delay equal to 0.02s

### 3.3.2. Discrete-time delay

The discrete-time delay is a waiting time for the output data equal to  $\Delta$  (Beretta and Breda, 2016). It is mathematically formulated as follows:

$$y(t) = x(t - \Delta) \quad (9)$$

$\Delta$ : time delay.

To express the time delay in MATLAB, the Delay block is used, and by the Delay Length parameter, the time delay is modified.

Figure 17 shows the result of adjusting the water level in the tank by applying a discrete-time delay of 2 seconds and using the PID controller for the control process, while Figure 18 shows the result using the FL controllers.

According to the results, it was observed that the FL controller produced a stable output signal. Whereas the use of the PID controller resulted in significant vibration in the output signal. This indicates that the more the delay, the worse the result.

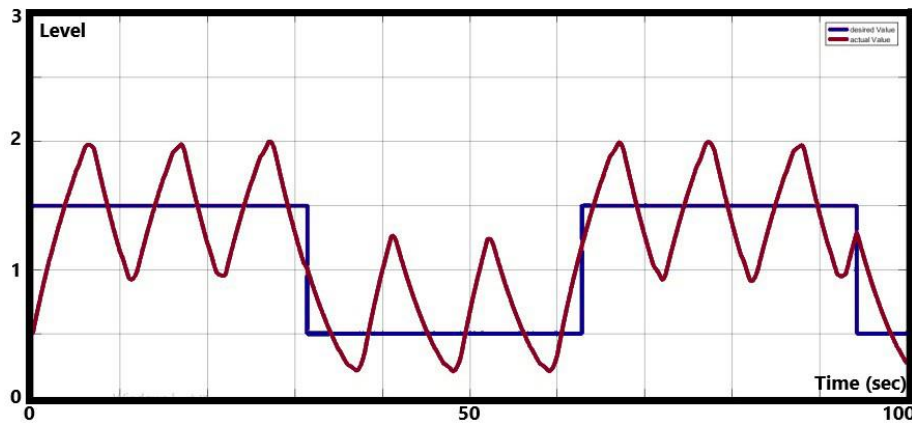


Figure 17. Controlling the water level by using a PID controller and applying a discrete time delay equal to 2s

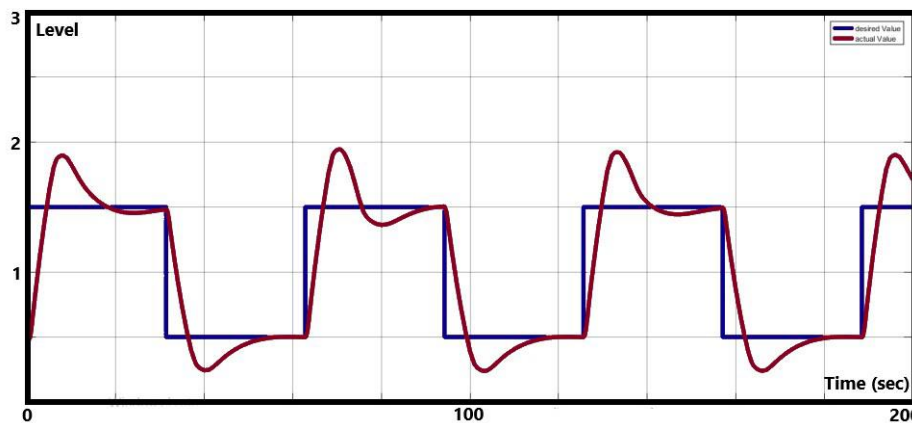


Figure 18. Controlling the water level by using FL controller and applying a distributed time delay equal to 2s

#### 4. CONCLUSION

In this paper, an embedded control system was built in the MATLAB environment to control the water level in a tank. The PID Controller and FL Controller were both tested, and their performance was compared. The first test for the controllers was without applying any time delay, while the second test was by applying two types of time delay: Distributed Time Delay and Discrete-Time Delay. It is concluded from the first test that although the rise time of both controllers was almost the same (about 4 seconds), the FL controller showed higher performance in terms of overshoot and settling time. While the overshoot for the PID controller was 9.33%, it was eliminated when using the FL controller. Moreover, while the settling time of the PID controller was 10 seconds, it took only 8.6 seconds for the FL controller to stabilize.

The results of the second test, which were applied with a distributed time delay of 0.02 sec, showed that with the use of the FL controller, the actual output of the system would change, either slightly increasing or decreasing depending on the value of the delay, meaning that the water level in the tank did not reach the desired level as a result of this delay. Also, with the use of the PID controller, the water level in the tank did not reach the desired level with the presence of vibration in the output signal.

Whereas, with the application of a discrete-time delay of 2 secs, the results showed that both controllers produced vibration in the output signal. When the FL controller is used, the system seeks stability, while with the use of the PID controller, the vibration is large and there is no stability in the tank level. It is concluded that the FL controllers are better than PID controllers in applications where there is a time delay in terms of stability and performance.

## 5. DECLARATION OF INTERESTS

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## REFERENCES

- Al Tahtawi, A. R., & Marsya, S. Y. B. S. C., 2020, "The Implementation of Embedded Fuzzy Logic Controller on Liquid Level Control System. " In *International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2020)*, 161-66. Atlantis Press.
- Beretta, E., & Breda, D., 2016, "Discrete or distributed delay? Effects on stability of population growth. ", *Mathematical Biosciences & Engineering*, 13(1), 19.
- Boada, B. L., Boada, M. J. L., & Diaz, V., 2005, "Yaw moment control for vehicle stability in a crosswind", *International journal of vehicle design*, 39: 331-48.
- Chen, L., 2021, "Principle and Simulation PID Controller of Liquid Level System. ", In *Journal of Physics: Conference Series*, 012187. IOP Publishing.
- Dinesh, C., Manikanta, V. V., Rohini, H. S., & Prabhu, K. R., 2015, "Real time level control of conical tank and comparison of fuzzy and classical PID controller", *Indian Journal of Science and Technology*, 8(S2), 40-44.
- Ellis, G., 2012, "Control system design guide: using your computer to understand and diagnose feedback controllers.", Butterworth-Heinemann.
- George, T., & Ganesan, V., 2020, "Optimal tuning of PID controller in time delay system: a review on various optimization techniques. ", *Chemical Product and Process Modeling*.
- Kamala, N., Thyagarajan, T., & Renganathan, S., 2012, "Multivariable control of nonlinear process using soft computing techniques. ", *Journal of advances in information technology*, 3(1), 48-56.
- Kumar, S., & Nagpal, P., 2017, "Comparative Analysis of P, PI, PID and Fuzzy Logic Controller for Tank Water Level Control System.", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4), 1174-1177.
- Meshram, P. M., & Kanojiya, R. G., 2012, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor. ", *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)* (pp. 117-122). IEEE.
- Mukhtar, A., Tayal, V. K., & Singh, H. P., 2019, "Pso optimized pid controller design for the process liquid level control. ", In *2019 3Rd International Conference On Recent Developments In Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE)* (pp. 590-593). IEEE.
- Muresan, C. I., Birs, I. R., Ionescu, C. M., & De Keyser, R., 2019, "Tuning of fractional order proportional integral/proportional derivative controllers based on existence conditions. ", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 233(4), 384-391.
- Perng, J. W., Chen, G. Y., & Hsieh, S. C., 2014, "Optimal PID controller design based on PSO-RBFNN for wind turbine systems. ", *Energies*, 7(1), 191-209.
- Petkov, P. H., Slavov, T. N., & Králev, J. K., 2018, "Design of Embedded Robust Control Systems using MATLAB®/Simulink®", (Vol. 113). Control, Robotics and Sensors.
- Plerou, A., Vlamou, E., & Papadopoulos, B., 2016, "Visualization of neuro-fuzzy networks training algorithms: The backpropagation algorithm approach.", *Psychology and Mental Health: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 705-737). IGI Global.
- Prusty, S. B., Pati, U. C., & Mahapatra, K., 2014, "Implementation of fuzzy-PID controller to liquid level system using LabVIEW. ", *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)* (pp. 36-40). IEEE.
- Shahid, H., Murawwat, S., Ahmed, I., Naseer, S., Fiaz, R., Afzaal, A., & Rafiq, S., 2016, "Design of a fuzzy logic based controller for fluid level application.", *World Journal of Engineering and Technology*, 4(3), 469-476.



- Shaikh, H. M., & Kulkarni, N. R., 2019, "Perception on PSO, Fuzzy and Fuzzy-PID for Water Level Control of Coupled Tank System. ", *2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)* (pp. 1-5). IEEE.
- Sreepradha, C., Deepa, P., Panda, R. C., Manamali, M., & Shivakumar, R., 2016, "Synthesis of fuzzy sliding mode controller for liquid level control in spherical tank. ", *Cogent Engineering*, 3(1), 1222042.
- Thakur, A. S., Singh, H., & Wadhvani, S., 2015, "Designing of fuzzy logic controller for liquid level controlling. ", *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 8(6), 267-276.
- Thompson, J. A., Roecker, S., Grunwald, S., & Owens, P. R., 2012, "Digital soil mapping: Interactions with and applications for hydrogeology". *Hydrogeology*, 665-709.
- Torres, B. S., De Carvalho, F. B., de Oliveira Fonseca, M., & Seixas Filho, C., 2006, "Performance assessment of control loops—case studies.", *Proc IFAC ADCHEM, Gramado, Brasil*.
- Yahya, S., Al Tahtawi, A. R., Wijayanto, K., & Faizah, B. A., 2020, "Liquid Flow Control Design Based on PID-Fuzzy Controller with anti-Windup Compensator. ", *2020 7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)* (pp. 7-12). IEEE.
- Yang, S. K., 2012, "A new anti-windup strategy for PID controllers with derivative filters. ", *Asian Journal of control*, 14(2), 564-571.
- Yumurtacı, M., & Verim, Ö., 2020, "Liquid level control with different control methods based on Matlab/Simulink and Arduino for the control systems lesson.", *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 4(3), 249-254.



## GÖRÜNTÜ SINIFLANDIRMADA DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>İlker DAĞLI , <sup>2,3</sup>Ali ÖZTÜRK 

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Konya, TÜRKİYE

<sup>2</sup>KTO Karatay Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Pilotaj Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Havelsan A.Ş., Ankara, TÜRKİYE

<sup>1</sup>idagli@erbakan.edu.tr, <sup>2</sup>ali.ozturk@karatay.edu.tr, <sup>3</sup>aliozturk@havelsan.com.tr

(Geliş/Received: 22.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.10.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada ESA (Evrşimsel Sinir Ağları), ResNet ve AİA (Ağ İçinde Ağ) yaklaşımları kullanılarak oluşturulan ve E-Model, R-Model, A-Model şeklinde adlandırılan derin öğrenme modellerinin farklı veri kümeleri üzerinde performansları karşılaştırılmıştır. CIFAR-10 veri kümesi için derin öğrenme modelleri sadece MİB (Merkezi İşlem Birimi) içeren bir makinede ve MİB ile GİB (Grafik İşlem Birimi) içeren bir makinede ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Sadece MİB içeren makinede R-Model, A-Model ve E-Model için sırasıyla yaklaşık 415 saatlik, 129 saatlik ve 3.5 saatlik eğitim aşamaları sonucunda doğrulama veri seti üzerinde sırasıyla %82.76, %87.64 ve %83.47 doğruluk oranları elde edilmiştir. MİB ve GİB içeren makinede ise R-Model, A-Model ve E-Model için sırasıyla yaklaşık 4.45 saatlik, 2.20 saatlik ve 1.82 saatlik eğitim aşamaları sonucunda doğrulama veri seti üzerinde sırasıyla %82.61, %87.95 ve %82.43 doğruluk oranları elde edilmiştir. Diğer veri kümeleri için ise modeller MİB ve GİB içeren makinede çalıştırılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Oluşturulan derin öğrenme modellerinin yapıları, eğitim için kullanılan parametre değerleri, doğrulama verileri için elde edilen karmaşıklık matrisleri, doğruluk ve kayıp grafikleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin öğrenme, Görüntü Sınıflandırma, ESA, CIFAR-10, SVHN, Parmaklar, Çiçekler, Ürün Kalitesi, Balıklar

### Comparison of Deep Learning Models in Image Classification

**ABSTRACT:** In this study, various experiments have been performed via deep learning models based on CNN (Convolutional Neural Networks), ResNet (Residential Energy Services Network) and NIN (Network In Network) approaches and their performances on various datasets have been investigated. The deep learning models were named as E-Model, R-Model and A-Model, respectively. The deep learning models were trained with CIFAR-10 dataset on a machine having only CPU (Central Processing Unit) and a machine having both CPU and GPU (Graphical Processing Unit). On the machine having only CPU, the training time of the R-Model, A-Model and E-Model were approximately 415 hours, 129 hours and 3.5 hours, respectively. The percentage correct values on the validation data set were %82.76, %87.64 ve %83.47, respectively. On the machine having both CPU and GPU, the training time of the R-Model, A-Model and the E-Model were approximately 4.45 hours, 2.20 hours and 1.82 hours, respectively. The percentage correct values on the validation data set were %82.61, %87.95 ve %82.43, respectively. The experimental results for the other data sets were obtained by training the models on the machine having both CPU and GPU. The structures of the constructed deep learning models, the parameters used for the training, the obtained confusion matrices for the validation data, the accuracy and loss graphics are given in detail.

**Key Words:** Deep learning, Image Classification, CNN, CIFAR-10, SVHN, Fingers, Flowers, Product Quality, Fishes

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Derin öğrenme teknikleri günümüzde resim, ses, el yazısı, trafik işaretleri gibi verilerin tanınmasında veya sınıflandırılmasında kullanılmakta ve yüksek doğruluk oranlarıyla dikkat çekmektedir. McCulloch ve Pitts (1943) insan sinir sisteminin temel yapısı olan sinir hücresinin modelini tanımlamıştır. Yapay sinir ağlarının (YSA) da başlangıcı olan bu model, doğrusal problemler üzerinde çok iyi sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, aynı avantaj, XOR problemleri gibi doğrusal olmayan problemlerde elde edilemez. Bu nedenle yapay sinir ağlarına olan ilgi azalmıştır. 1980'lerde insan beyninden ilham alan araştırmalar paralel dağıtık bir model önermiş ve derin öğrenmenin temelleri atılmıştır. Geri yayılma algoritması, geçmişte sinir ağlarını eğitmek için yaygın olarak kullanılmıştır (Rumelhart ve diğ., 1986). 2012 yılında derin öğrenme büyük bir sıçrama yapmıştır. Dünya çapında büyük ilgi çeken ImageNet (Deng ve diğ., 2009) yarışmasında, bir ESA modeli birinci olmuştur (Krizhevsky ve diğ., 2012). Bu derin öğrenmenin ilk başarısı olmakla birlikte, günümüzde derin öğrenmenin popüler olmasının nedenlerinden biri, yeterli miktarda veri üretilebilmesidir. Dünyanın dijitalleşmesiyle veri miktarı daha da büyümekte ve bu büyüyen veriyle birlikte derin öğrenme algoritmaları daha yüksek performans sonuçları elde etmektedir. Derin öğrenme algoritmaları yüksek başarımlar elde ettiği için günümüzde ses, resim, robotik, otonom araçlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Hatta bazı çalışmalarda insanın başarısının üstüne çıktığı görülmekte ve bu çalışmalar insanların resim tanıma konusundaki bakış açılarının değişmesine sebep olmuştur (Ganin ve diğ., 2016). Görüntü sınıflandırma ve tanıma, günümüzün personel takibi gibi sıradan bir otomasyon sisteminde de kullanılmaktadır. Bu sistemlerde arka planda derin öğrenme ve görüntü işleme kullanılabilmektedir.

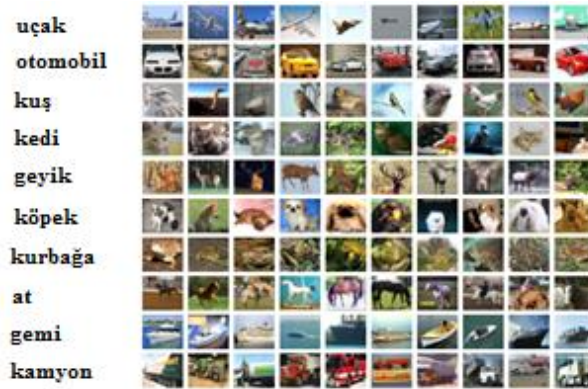
Literatürde farklı derin öğrenme modelleri önerilmiş ve performanslarının karşılaştırılmasında belirli veri kümeleri kullanılmıştır. CIFAR-10 bu amaçla yaygın olarak kullanılan veri kümelerinden birisidir. Ciregan ve arkadaşlarının önerdiği çok kolonlu ESA modelinde birden fazla ESA modelinin eş zamanlı olarak ürettiği sonuçların ortalaması alınarak genel sınıflandırma sonucu elde edilmektedir (Ciregan ve diğ., 2012). CIFAR-10 veri kümesi için uyguladıkları 8 kolonlu ve 10 katmanlı ESA modeliyle %88.8 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Fakat kullandıkları her bir ESA modeli 1.210,710 parametre içermektedir. Bu değeri 8 ile çarpınca yaklaşık 9 milyon parametrelili bir model ortaya çıkmaktadır. Goodfellow ve arkadaşları, önerdikleri ESA modelinde girişlerinden en büyüğünü seçen aktivasyon fonksiyonuna sahip sinir hücreleri kullanmışlardır (Goodfellow ve diğ., 2013). CIFAR-10 veri kümesi için kullandıkları modelde toplam parametre sayısı 1,034,298 olup %90.6 doğruluk oranı elde etmişlerdir. Graham tarafından önerilen ESA modeli çok fazla boş değer içeren veri kümelerinde verimli çalışma hedefiyle ortaya çıkmıştır (Graham, 2014). Modelin toplam parametre sayısı yaklaşık olarak 11,250,000 olup CIFAR-10 veri kümesi üzerindeki doğruluk oranı %93.7'dir. Springenberg ve arkadaşları ESA modelinde kullanılan havuz katmanlarının uygun evrimsel katmanlarla değiştirilerek sadece evrimsel katmanlardan oluşan daha sade ESA modeli oluşturulabileceğini öne sürmüşlerdir (Springenberg ve diğ., 2015). Bu şekilde oluşturdukları toplam 1,300,000 parametrelili ESA modelinin CIFAR-10 veri seti üzerindeki doğruluk oranı %90.9 olarak bulunmuştur. He ve arkadaşlarının önerdikleri toplam 10,200,00 parametrelili ResNet-1001 modelinin CIFAR-10 veri seti üzerindeki doğruluk oranı %95.4'tür (He ve diğ., 2016). Huang ve arkadaşları, çok fazla katmandan oluşarak derinleşen ESA modellerinde katmandan katmana geçişte oluşan bilgi kaybını azaltmak üzere katmanlar arası fazladan bağlantılar içeren yoğun biçimde bağlı ESA modeli önermişlerdir (Huang ve diğ., 2017). CIFAR-10 üzerinde uyguladıkları model 190 katmandan oluşmakta ve toplam 25,600,000 parametre içermektedir. Bu modelin doğruluk oranı %96.5 olarak bulunmuştur. Liu ve Mukhopadhyay, ImageNet ile önceden eğitilmiş ResNet-50 (He ve diğ., 2016) modelinin çıkış katmanından önceki havuz katmanında bulunan resim özelliklerinin bir Hopfield ağında depolanmasına dayanan bir model önermişlerdir (Liu ve Mukhopadhyay, 2018). Önerdikleri model CIFAR-10 veri kümesi üzerinde %83.1 doğruluk oranına sahip olup, modelde yararlandıkları ResNet-50 toplam 25,636,712 parametre içermektedir. Wang ve arkadaşlarının önerdiği ve özellikli düğümleri arasındaki bağlantı durumunun adaptif olarak belirlendiği ESA modeli yaklaşık 19,800,000

parametreye sahip olup CIFAR-10 veri kümesi üzerinde %94'lük doğruluk oranına sahiptir (Wang ve diğ., 2019). Chu ve arkadaşlarının önerdiği gürültülü ayırt edilebilir mimari aramasına dayanan model, toplam 5,500,000 parametre içermekte olup %98.28 doğruluk oranına sahiptir (Chu ve diğ., 2020). Kabir ve arkadaşlarının önerdiği ve gizli katmanlara gelen ağırlık girişlerinin az olduğu dereceli girişe dayanan SpinalNet modeli 20,160,000 parametre içermekte olup, %91.4 doğruluk oranına sahiptir (Kabir ve diğ., 2020). Lu ve arkadaşlarının önerdiği sinirsel mimari transferine dayanan model 6,900,000 parametreye sahip olup %98.4 doğruluk oranına sahiptir (Lu ve diğ., 2021).

ESA, ResNet ve AİA yaklaşımları ile oluşturulan derin öğrenme modellerinin performanslarının karşılaştırıldığı bu çalışmada, bu amaçla yaygın olarak kullanılan veri kümeleri yanında daha önce derin öğrenme modelleri uygulanmamış geniş ölçekli balık veri kümesi (Ulucan ve diğ., 2020) üzerinde sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bu üç modelin parametre sayısının literatürde kullanılan modellerden daha az olmasına dikkat edilmiştir. Parametre sayısının az olması, modelin depolama ve bellek gereksinimini azaltan bir durum olduğu için bu modelleri kullanacak uygulamaların etkinliği için avantaj sağlayacağı düşünülmüştür.

## VERİ KÜMELERİNİN TANIMI (DESCRIPTION OF DATA SETS)

Cifar-10 (Krizhevsky, 2009) görüntü tanıma ve sınıflandırma çalışmalarında kullanılan 32x32 RGB biçiminde 60,000 adet görüntü içeren bir veri kümesidir. Bu görüntüler uçaklar, arabalar, kuşlar, kediler, geyikler, köpekler, atlar, gemiler, kamyonlar olmak üzere 10 sınıftan oluşur. Bu çalışmada, CIFAR-10 veri kümesindeki 50000 görüntü eğitim, 10000 görüntü test için kullanılmıştır. Şekil 1'de örnek resimler ile CIFAR-10 veri kümesine ait sınıflar gösterilmektedir.



Şekil 1. CIFAR 10 Veri Kümesi

Figure 1. CIFAR-10 Dataset

SVHN (Google Street View House Numbers) veri kümesi (Netzer ve diğ., 2011), 0 ila 9 arasındaki 10 farklı sınıfa ait rakamların görüntülerini içermektedir. Görüntüler, değişik çözünürlüklerde, renkli ev numaralarına ait rakamlardan oluşmaktadır. SVHN veri kümesi 73,257 adet eğitim verisi ve 26,023 test verisi içermektedir.

Bu çalışmada kullanılan diğer veri kümeleri kaggle platformunda yayınlanmış bulunan Parmaklar (Koryakin, 2019), Çiçekler (Nilsback ve Zisserman, 2006), Ürün kalitesi (Dabhi, 2020) ve Balıklar (Ulucan ve diğ., 2020) veri kümeleridir.

Parmaklar veri kümesi, işaret dili ile 0 ila 5 arasındaki rakamların parmaklar yardımıyla gösterimini içeren görüntülerden oluşmaktadır. Eğitim kümesi 18,000 görüntü ve test kümesi 36,000 görüntü içermektedir.

Çiçekler veri kümesi, 17 farklı çiçeğe ait görüntülerden oluşmaktadır. Eğitim kümesinde her çiçek için 80 görüntü, test kümesinde ise her çiçek için 10 görüntü bulunmaktadır. Dolayısıyla, eğitim kümesi toplam 1360 test kümesi ise 170 görüntüden oluşmaktadır.

Ürün kalitesi veri kümesi, metal döküm sürecinde ürünlerin yüzeylerinde oluşan istenmeyen düzensizliklerin tespit edilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Veri kümesinde, yüzeyin düzgün olduğu ve arızalı olduğu ürün görüntüleri yer almaktadır. Eğitim kümesinde 6633 görüntü, test kümesinde ise 715 görüntü bulunmaktadır.

Balıklar veri kümesi (Ulucan ve diğ., 2020), 9 farklı deniz ürününe ait farklı açılardan çekilmiş görüntülerden oluşmaktadır. Eğitim kümesi 9000 görüntü, test kümesi ise 430 görüntü içermektedir.

## DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ (DEEP LEARNING METHODS)

### ESA (Evrşimsel Sinir Ağları)

Evrşimsel sinir ağları ilk olarak 2012 yılında nesne tanıma alanında yapılan ImageNet yarışmasında Krizhevsky'nin AlexNet (Krizhevsky ve diğ., 2012) modeli ile birinci olmuş ve daha önceki hata oranlarında yaklaşık %10'luk bir düşüş yaratarak modelin potansiyelini ortaya koymuştur (İnik ve Ülker, 2017). Günümüzde artan miktarda veri ve grafik işlemci üniteler gibi donanımlarla bilgisayar performanslarındaki artış, ESA gibi derin öğrenme yöntemlerinin başarısı ve popülerliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. ESA, klasik YSA'lardan farklı olarak herhangi bir öznitelik girdisi beklemeyerek, girilen nesnelere göre kendi özniteliklerini hiyerarşik olarak basitten karmaşığa doğru çıkarmaktadır. Örneğin ilk katmanlarda kenar, köşe bilgisi gibi basit öznitelikler elde edilirken daha sonraki katmanlarda görüntüye ait daha detaylı öznitelikler elde edilmektedir (Kızrak ve Bolat, 2018). Bu dinamik yapı, ESA'nın sınıflandırma başarısında önemli bir artış elde edilmesini sağlamıştır. Dahası, ESA mimarisinde kullanılan bırakma yöntemi, ağı eğitimi verilerinin ezberlenmesini ve aşırı kullanılma sorununu önlemiştir. ESA mimarileri, Şekil 2'de gösterildiği gibi Giriş (Input), Özellik Öğrenimi (Feature Learning) ve Sınıflandırma (Classification) olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler, işlevsel olarak sırasıyla Girdi (Input), Konvolüsyon (Convolution), Havuz (Pooling), Tam Bağlı (Fully Connected), Bırakma (Dropout), Düzleştirme (Flattening) ve Sınıflandırma (Classification) katmanı olmak üzere bazıları tekrarlı olmak üzere 7 ana katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar, çalışmada kullanılan veri kümesi için aşağıda açıklanmıştır.

### Girdi Katmanı (Input Layer)

Bu katman ESA mimarisinin ilk katmanı olup, verilerin diğer katmanlara aktarıldığı bölümdür. Örneğin, bu çalışmada giriş katmanını oluşturmak için 32x32 boyutlu renkli görüntülerden oluşan bir veri kümesi kullanılmaktadır. Performans ve doğruluk oranını artırmak ve aşırı eğitimi (overfitting) önlemek için bu katmana girdi olan veriler üzerinde veri ön işleme (data preprocessing) ve veri çoğaltma (data augmentation) işlemleri de yapılmaktadır (İnik ve Ülker, 2017).

### Konvolüsyon Katmanı (Convolution Layer)

Bu katman, ESA mimarilerinin temelidir ve bu katmandaki filtrelerle özellik çıkarımı yapılır. Adım değerine göre filtreler, x ve y eksenine göre simetriği alınarak veya alınmadıkça (çapraz korelasyon) giriş görüntüleri üzerinde kaydırılır. Giriş değerleri ve filtre değerleri her adımda çarpılmakta, toplanmakta ve çıkış matrisine yazılmaktadır. Ardından aktivasyon fonksiyonuna girmeden önce bir eğilim (bias) değeri ile toplanmaktadır (Kızrak ve Bolat, 2018). Konvolüsyon işleminde giriş matrisi ile çıkış matrisi arasında boyut farklılıkları olabilir. Eğer girdi boyutu  $(n \times n) = (32 \times 32)$ , filtre boyutu  $(f \times f) = (3 \times 3)$ , ve adım kaydırma değeri (stride = 1) ise, çıktı matrisi boyutu denklem 1 kullanılarak elde edilir.

$$\left[ \frac{(nf)}{s} + 1 \right] \times \left[ \frac{(nf)}{s} + 1 \right] \quad (1)$$

Çıktı matrisinin boyutu küçültmek istenmiyorsa, giriş matrisinin etrafında "dolgu" adı verilen piksel ekleme yöntemi kullanılabilir. Bu amaçla Denklem 2'de görülen hesaplama ile çıktı boyutu hesaplanabilir.

$$\left[ \frac{(n + 2p - f)}{s} + 1 \right] \times \left[ \frac{(n + 2p - f)}{s} + 1 \right] \quad (2)$$

Önceki örnek için aynı değerlere 1 dolgu değeri ( $p = 1$ ) eklenirse, sonucun giriş boyutuna eşit ( $32 \times 32$ ) olarak değiştiği görülecektir (Kızrak ve Bolat, 2018).

#### **Havuz Katmanı (Pooling Layer)**

Bu katmanda, ağ üzerinde özellik çıkartma veya öğrenme gerçekleştirilmez. Performans iyileştirme ve maliyet azaltma amacıyla, giriş matrisinin genişliği ve uzunluğu kanal numarası sabit tutularak azaltılır. Örneğin, giriş değeri  $32 \times 32 \times 64$  iken çıkış değeri  $16 \times 16 \times 64$  olarak hesaplanabilir. Bu, bilginin azalmasına yol açar, bu da maliyetleri azaltmak için bilgilerin tehlikeye atılması anlamına gelir. ESA mimarilerinde sıkça kullanılan havuzlama yöntemleri maksimum havuzlama (max pooling) ve ortalama (average) havuzlamadır (İnik ve Ülker, 2017).

#### **Tam Bağlı Katman (Full Connected Layer)**

Bu katman, önceki bölümlerde anlatılan ve ardı sıra tekrar eden öznelik çıkarım katmanlarından sonra gelmektedir. Kendisinden önceki katmandaki tüm alanlar ile bağlantılıdır (İnik ve Ülker, 2017). Örneğin,  $16 \times 16 \times 256$  boyutundaki çıktı, öncelikle  $4096 \times 1$  matris ile tam bir bağlantı yaparak,  $65536 \times 1$ 'e dönüştürülür. Sınıflandırma katmanına gelmeden önce, tüm nitelikler  $65536 \times 4096$  boyutundaki geleneksel bir sinir ağına aktarılır.

#### **Bırakma Katmanı (Dropout Layer)**

Ağın bazı düğümlerini kaldırarak ağın aşırı yüklenmesini önlemek için kullanılan katmandır (İnik ve Ülker, 2017).

#### **Sınıflandırma Katmanı (Classification Layer)**

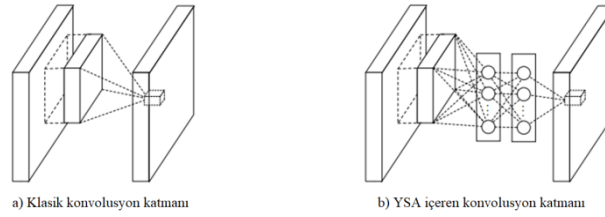
Tam bağlı katmanı takip eden ve ağın sınıflandırılmasını ve tahminini yapan katmandır. CIFAR-10 veri kümesi için tam bağlı katmandan 4096 nöron 10 nörona indirgenir ve bir  $4096 \times 10$  matris yapısı oluşur. Sınıflandırma katmanı genellikle başarısından dolayı softmax fonksiyonunu kullanır. CIFAR-10 veri kümesi için Softmax, 0 ile 1 arasında 10 sınıflandırma değeri oluşturur ve 1'e en yakın değer ağımızın tahminidir (İnik ve Ülker, 2017).

#### **Düzleştirme Katmanı (Flattening Layer)**

Bu katmanın görevi Tam bağlı katmanın girişindeki verileri hazırlamaktır. Matris halinde bulunan görüntünün tek boyutlu vektöre dönüştürülmesini sağlamaktadır. Düzleştirme katmanı bu işlemi otomatik olarak yapmaktadır. Bu işlem aynı zamanda boyut değiştirme işlemi olarak düşünülebilir. Düzleştirme işleminde yapay sinir ağını hızlıca eğitmek amaçlanmaktadır.

#### **Ağ İçinde Ağ (Network In Network)**

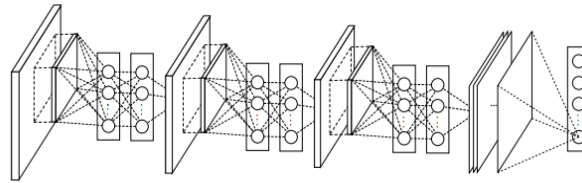
Lin ve arkadaşları (2013) sonradan Google'ın Inception modeline de ilham veren şekil 2'de görülen yeni bir ESA mimarisi ortaya attı. Bu mimari, klasik ESA mimarilerinde konvolüsyon katındaki giriş ve çıkış arasına iki katmanlı bir MLP yapısı eklenerek oluşturulur.



**Şekil 2. a) Klasik Konvolüsyon Katmanı b) YSA içeren Konvolüsyon Katmanı (Convolution Layer with MLP) (Liu ve diğ., 2017)**

*Figure 2. a) Classical Convolution Layer b) Convolution Layer with MLP*

Klasik ESA mimarilerinde önerilen bir diğer değişiklik ise konvolüsyon işlemlerinden sonra tamamen birleştirilmiş tabaka kullanmak yerine, softmax sınıflandırma işlemi için gerekli boyut küçültmenin, küresel ortalama havuzlama tabakası kullanılarak gerçekleştirilmesidir (Lin ve diğ., 2013). Doğrusal olmayan bir YSA yapısına sahip olan AİA mimarisi, ESA mimarilerindeki yerel filtrelerde özütleme ve soyutlama üzerine düşük seviyeli doğrusal filtreler geliştirmiştir. Çünkü karmaşık özelliklerin her zaman kolayca doğrusal olarak ayıramadığı belirtilmektedir. Bu çalışmada kullanılan AİA yapısı oluşturulurken, Şekil 3’de verilen ve Lin ve diğ., (2013) tarafından geliştirilmiş olan AİA yapısından esinlenilmiştir. Lin ve diğ., (2013) tarafından önerilen orijinal AİA modelinin CIFAR-10 üzerindeki doğruluk oranı veri çoğaltma olmadan %89.59 iken veri çoğaltma uyguladıklarında %91.19 olarak bulunmuştur.

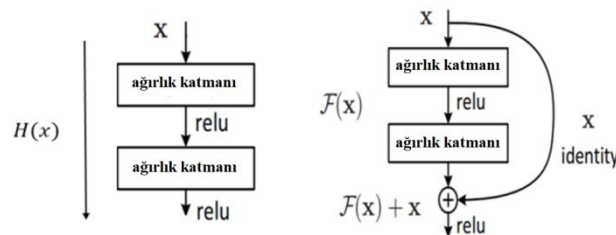


**Şekil 3. Lin ve diğ. (2013) tarafından önerilen AİA yapısı**

*Figure 3. The structure of Network In Network proposed by Lin et al. (2013)*

### ResNet (Deep Residual Network)

ResNet, ESA mimarisinde küçük değişiklikler ile oluşturulmuştur. Bu değişiklikler, derin ağın hızlı bir şekilde eğitilmesini, büyük bir ağ yerine derin bir ağ oluşturarak parametrelerin sayısının azaltılmasını, yokuş geçiş dereceleri sorununun giderilmesini ve resim sınıflandırma başarısının artmasını sağlamıştır. ResNet modeli ağın derinliğini artırırken, kaybolan gradyanlar ve optimizasyon zorlaşması bu problemlerden çıkan olumsuzlukları engellemektedir. Şekil 4’de artık bağlantılı konvolüsyonun işleyişi gösterilmiştir.



**Şekil 4. Klasik Konvolüsyon ve Artık Bağlantılı Konvolüsyon (He ve diğ., 2016)**

*Figure 4. Classical Convolution and Residual Connected Convolution*

ResNet mimarisinde  $F(x) = H(x) \cdot x$  düzlemsel olmayan (non-linear) fonksiyonu ile haritalandırma yapmaktadır (He ve diğ., 2016). Giriş değerinden çıkış değerine ek bir kısayol bağlantısı ile giriş değeri olan  $x$ ,  $F(x)$  fonksiyonuna eklenmekte,  $F(x)+x$  olarak Relu fonksiyonuna geçirilmektedir (He ve diğ., 2016). 2 katmanın sonunda yeni katmana geçerken giriş değeri olarak bu değer eklenmekte ve bu şekilde ağı eğitmek daha kolay hale gelmektedir. Evrişimsel sinir ağını daha düzenli hale getirmek amacıyla kuyruk normalizasyonu kullanılmaktadır. Düzenleyici bir etkiyle birlikte eğitim esnasında sinir ağının yok olma gradyanına bir direnç göstermesini sağlamaktadır. Bu işlem modelin eğitim süresini kısaltarak daha iyi bir performans göstermesine yardımcı olur. Global Ortalama Havuzlama işlemi önceki katmandaki özellik haritasının ortalama çıktısını hesaplayan bir işlemdir. Bu oldukça basit işlem, verileri önemli ölçüde azaltarak modeli son sınıflandırma katmanı için hazırlar.

## DERİN ÖĞRENME MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI (IMPLEMENTATION OF DEEP LEARNING MODELS)in

Bu bölümde, ESA, AİA ve ResNet yaklaşımlarıyla oluşturulan ve sırasıyla E-Model, A-Model ve R-Model olarak adlandırılan modellerin uygulanmasında kullanılan yöntem ve parametreler açıklanmaktadır. Bu modeller çeşitli açık kaynak kütüphaneler aracılığıyla oluşturulabilmektedir. Bu çalışmada, Python programlama dili üzerinde geliştirilmiş olan tensorflow kütüphanesi ile modeller gerçekleştirilmiştir. Tüm ön işleme, eğitim ve test işlemleri bu kütüphanenin sınıf ve yöntemleriyle gerçekleştirilmiş, sonuç analizleri de tensorboard, sklearn ve matplotlib kütüphaneleri yardımıyla oluşturulmuştur.

### E-Model (E-Model)

Çizelge 1’de, E-Modelin parametreleri listelenmektedir. Sınıflandırma katmanındaki ve bir önceki tam bağlı katmandaki düğüm sayısı kullanılan veri kümesindeki sınıf sayısına bağlı olarak değişmektedir. Bu çizelgede CIFAR-10 veri kümesindeki 10 farklı sınıfla uygun olacak şekilde 10 düğümden oluşmaktadır. Diğer veri kümelerindeki sınıf sayılarına göre bu katmanlardaki düğüm sayıları uygun biçimde değiştirilmiştir. Bu tablodaki parametreler ilgili modelin literatürde kabul edilmiş girdileri baz alınarak oluşturulmuştur.

**Çizelge 1.** CIFAR-10 Veri Kümesi için E-Model

*Table 1. E-model for CIFAR10 dataset*

Katman	Giriş Boyutu	Filtre Boyutu	Filtre	Dolgu	Kaydırma	Aktivasyon
Konvolüsyon 1	32x32	3x3	32	same	1	Relu
Havuzlama (Maks)-1	32x32	2x2			2	
Konvolüsyon 2	16x16	3x3	64	same	1	Relu
Havuzlama (Maks)-2	16x16	2x2			2	
Konvolüsyon 3	8x8	3x3	64	same	1	Relu
Havuzlama (Maks)-3	8x8	2x2			2	
Düzleştirme	2x2x64 (256’ dan 1’e)					
Tam Bağlı	512 (256’ dan 512’ ye)					
Bırakma	0.1					
Tam Bağlı	256 (512’ ten 256’ ya)					
Bırakma	0.1					
Tam Bağlı	10 ( 256’ ten 10’ a)					
Sınıflandırma	10					

Çizelge 1’de görüldüğü gibi E-Model art arda gelen 3’er adet konvolüsyon ve maksimum havuzlama katmanı ile bunların ardından gelen düzleştirme katmanı içermektedir. Düzleştirme katmanından sonra sırasıyla 512, 256 ve 10 düğüm içeren 3 adet tam bağlı katman gelmekte, bunların arasında ise 2 adet



birakma katmanı yer almaktadır. Sınıflandırma katmanı ise Softmax fonksiyonunu kullanan 10 adet düğümden oluşmaktadır.

### A-Model (A-Model)

Bu çalışmada kullanılan A-Modelinin parametreleri Çizelge 2'de gösterilmiştir. Bu çizelgede de yine sınıflandırma katmanındaki düğüm sayısı CIFAR-10 veri kümesine göre 10 olarak verilmiştir. Diğer veri kümelerindeki sınıf sayılarına göre bu katmanlardaki düğüm sayıları uygun biçimde değiştirilmiştir.

**Çizelge 2.** CIFAR10 Veri Kümesi için A-Model

*Table 2. A-model for CIFAR10 dataset*

Katman	Giriş Boyutu	Filtre Boyutu	Filtre Sayısı	Dolgu	Kaydırma	Aktivasyon
Konv1	32x32	5x5	192	same	1	Relu
YSA1-1	32x32	1x1	160	0	1	Relu
YSA1-2	32x32	1x1	96	0	1	Relu
Havuzlama (Maks)-1	32x32	3x3		same	2	
Bırakma-1	0.5, 16x16					
Konv2	16x16	5x5	192	same	1	Relu
YSA2-1	16x16	1x1	160	0	1	Relu
YSA2-2	16x16	1x1	96	0	1	Relu
Ortalama Havuz	16x16	3x3		same	2	
Bırakma-2	0.5, 8x8					
Konv3	8x8	3x3	192	same	1	Relu
YSA3-1	8x8	1x1	192	0	1	Relu
YSA3-2	8x8	1x1	10	0	1	Relu
Ortalama Havuz	8x8	8x8		same	8	
Düzleştirme	1x1x10 to 10					
Softmax	10					

Çizelge 2'de yapısı verilen A-Model'de 3'er adet konvolüsyon ve havuzlama katmanı arasında 2'şer adet YSA yapısı bulunmaktadır. Bu YSA'ların giriş boyutları sırasıyla 32x32, 16x16 ve 8x8 olup, filtre boyutları 1x1 şeklindedir. Konvolüsyon ve YSA katmanlarındaki düğümlerde Relu aktivasyon fonksiyonu, sınıflandırma katmanında ise Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Sınıflandırma katmanından hemen önce Düzleştirme katmanı yer almaktadır.

### R-Model (R-Model)

Bu çalışmada kullanılan R-Model'in parametreleri Çizelge 3'de verilmiştir. Bu çizelgede de yine sınıflandırma katmanındaki düğüm sayısı CIFAR-10 veri kümesine uygun olacak şekilde 10 olarak verilmiştir. Diğer veri kümelerindeki sınıf sayılarına göre bu katmandaki düğüm sayıları uygun biçimde değiştirilmiştir. Çizelge 3'te yapısı verilen R-Model'de 2 adet bırakma katmanı arasında 5 adet artık bağlantılı konvolüsyon (ABK) bloğu yer almaktadır. Bu blokların filtre sayısı sırasıyla 16, 32, 32, 64 ve 64 olup, ikinci ve dördüncü bloklarda aşağı örnekleme yapılmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu olarak sınıflandırma katmanında Softmax, diğer katmanlarda Relu kullanılmaktadır. Son ABK bloğunu takip eden bırakma katmanından sonra kuyruk normalizasyonu uygulanmakta, daha sonra Global Ortalama Havuzlama katmanı gelmektedir. Sınıflandırma katmanından hemen önce 10 adet düğüm içeren tam bağlı katman yer almaktadır. Diğer veri kümelerindeki sınıf sayılarına bağlı olarak bu katmandaki düğüm sayıları farklıdır.

**Çizelge 3.** CIFAR10 Veri Kümesi için R-Model

Table 3. R-Model for CIFAR10 dataset

Katman	Giriş Boyutu	Filtre Boyutu	Filtre Sayısı	Aşağı Örnekleme	Aktivasyon
Konv1	32x32	3x3	16		Relu
Bırakma	0.2				
Res-blok1* x5	32x32	3x3	16		Relu
Res-blok2* x1	32x32	3x3	32	Var*	Relu
Res-blok3* x4	16x16	3x3	32		Relu
Res-blok4* x1	16x16	3x3	64	Var*	Relu
Res-blok5* x4	8x8	3x3	64		Relu
Bırakma	0.2				
Kuyruk Normalizasyonu + Aktivasyon(Relu)					
Global Ortalama	8x8x64 'den 64'a				
Tam Bağlı	10 (64 'ten 10'a)				
Softmax	10				

## SONUÇLAR VE ANALİZ (RESULTS AND ANALYSIS)

Bu bölümde farklı veri kümeleri üzerinde E-Model, A-Model ve R-Model modellerinin uygulanması sonucu elde edilen karmaşıklık matrisleri, başarı oranları, kayıp oranları ve çalışma süreleri karşılaştırmalı olarak listelenmektedir.

Şekil 5'te verilen karmaşıklık matrisi E-Modelin CIFAR-10 veri kümesinin doğrulama kısmı üzerine uygulanması ile elde edilmiştir. E-Model en iyi otomobil (923) ve kurbağa (924) sınıflarını doğru tahmin etmiştir.

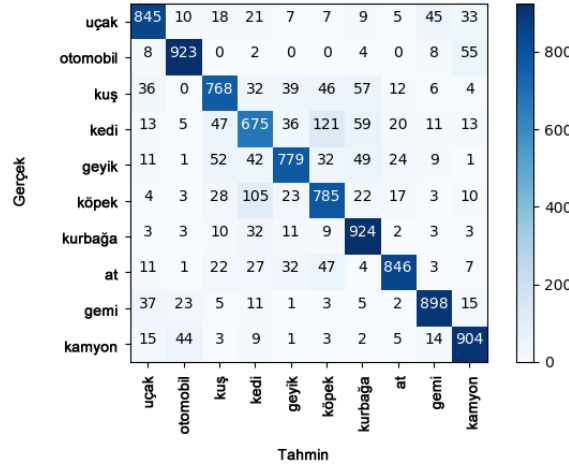
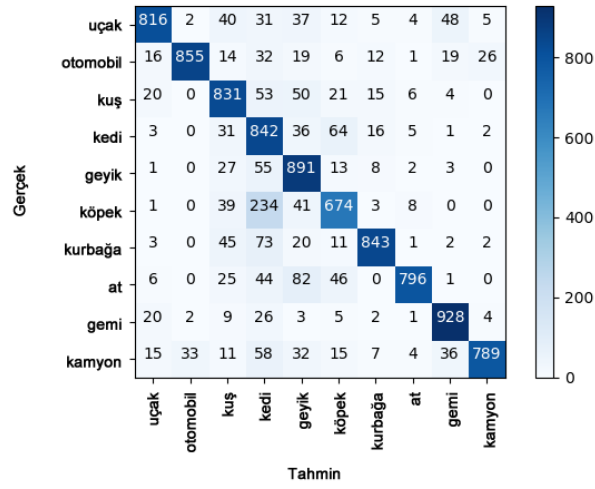
**Şekil 5.** E-Model Karmaşıklık Matrisi

Figure 5. E-Model Confusion Matrix

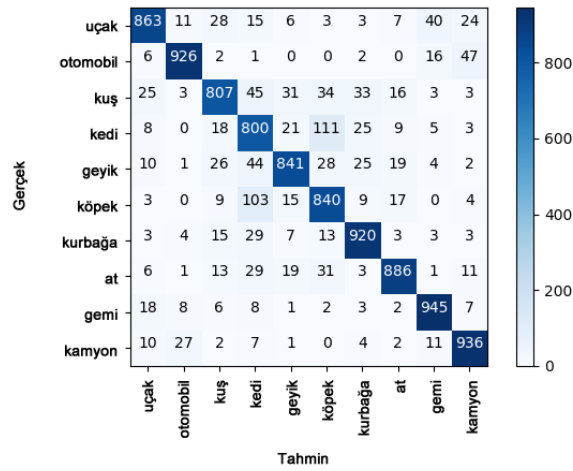
Şekil 5'i incelediğimizde denenen E-Modelin hatalarının genellikle gerçek hayatta birbirine yakın olan sınıflarda olduğunu görebiliriz. Örneğin, kedi sınıfı bir görüntüyü köpek veya kurbağa olarak tahmin etme olasılığı, bir araç olarak tahmin etme olasılığından daha büyüktür.



Şekil 6. R-Model Karmaşıklık Matrisi

Figure 6. R-Model Confusion Matrix

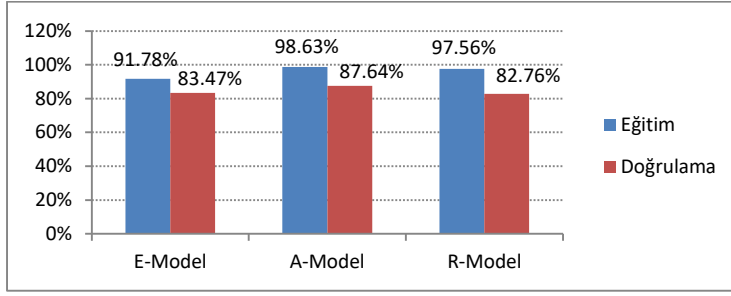
Şekil 6'daki karmaşıklık matrisini incelendiğinde, R-Modelin gemi sınıfında (928) iyi performans gösterdiğini görüyoruz. Aksine, en yanlış sınıflandırılan resimler birbirine yakın oldukları bilinen keci, köpek ve kurbağa sınıfındaki resimlerdir.



Şekil 7. A-Model Karmaşıklık Matrisi

Figure 7. A-Model Confusion Matrix

Şekil 7'ye göre, denenen A-Model gemi ve kamyon sınıflarında (945 ve 936) yüksek başarı oranı elde etmiştir. A-Modelin en düşük başarı oranı, keci sınıfı görüntülerini köpekler olarak sınıflandırmaktır.



Şekil 8. Derin Öğrenme Modellerinin Performansları

Figure 8. Performances of The Deep Learning Models

Şekil 8’de derin öğrenme modellerinin sadece MİB içeren bilgisayarda CIFAR-10 veri kümesi üzerinde karşılaştırma grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre, eğitim ve doğrulama veri kümeleri üzerinde en iyi başarımla %98.63 ve %87.64 doğruluk ile A-Model’e aittir. Eğitim veri kümesi üzerindeki en başarılı ikinci model %97.56 doğruluk ile R-Model’dir. E-Model’in eğitim doğruluğu %91.78 ve doğrulama veri kümesi doğruluğu %83.47 olarak bulunmuştur. R-Model’inin doğrulama veri kümesi üzerindeki doğruluğu ise %82.76’dır.

Çizelge 4’te Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 V4 2.20 GHz 2 işlemcili, 24 GB RAM’e sahip sunucu üzerinde her bir modelin CIFAR-10 eğitim kümesi üzerinde çalışma süreleri ve doğrulama veri seti üzerindeki doğruluk oranları verilmiştir. Modeller ayrıca, Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU 2.60GHz işlemcili, 16 GB RAM ve 1920 Cuda çekirdekli 8 GB paylaşımlı sistem belleğine ve 6 GB ayrılmış video belleğe sahip NVIDIA GeForce RTX 2060 grafik kartlı bir dizüstü bilgisayarda çalıştırılmıştır. Çizelge 4’te bu denemelerle ilgili sonuçlar yer almaktadır. Sadece CPU içeren birinci makine için “Sadece MİB”, CPU ve GPU içeren ikinci makine için ise “MİB+GİB” kısaltmaları kullanılmıştır. GPU kullanımı ile modellerin eğitim süresi dramatik biçimde azalmıştır.

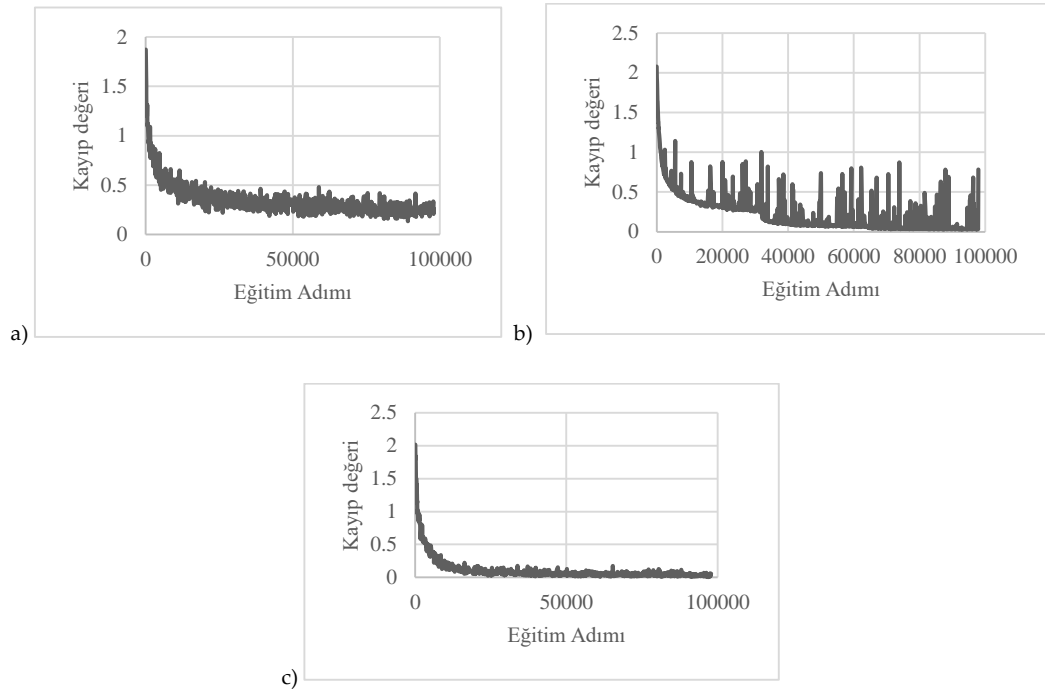
Çizelge 4. Modellerin Karşılaştırılması

Table 4. Comparison of the models

Model	Parametre Sayısı	Sadece MİB		MİB+GİB	
		Çalışma Süresi	Doğruluk Oranı	Çalışma Süresi	Doğruluk Oranı
A-Model	966,986	129 saat	%87.64	2.2 saat	%87.95
R-Model	550,058	415 saat	%84.72	4.45 saat	%87.60
E-Model	715,018	3.5 saat	%83.47	1.8 saat	%82.43

Çizelge 4’e göre modellerin doğrulama veri kümesi üzerindeki doğruluk oranları birbirine çok yakındır. Eğitim ve test doğruluğunu göz önüne alarak, Şekil 8’deki en yüksek doğruluk oranının A-Model’de olduğu görülmektedir. Fakat, bu modelin parametre sayısı 966,986’dır. Eğitim süresi 415 saat ve parametre sayısı 550,058 olan R-Modelin doğruluğunun A-Model’in altında kaldığı görülmektedir. En kısa eğitim süresine sahip E-Model’in R-Model’den biraz daha iyi doğruluk oranına sahip olduğu gözlenmiştir.

Şekil 9, 10 ve 11’deki grafikler sadece MİB içeren makine üzerinde modellerin CIFAR-10 veri kümesi üzerinde çalıştırılması ile elde edilmiştir. Şekil 9’da modellerin eğitim adımı sayılarına karşılık kayıp grafikleri görülmektedir.



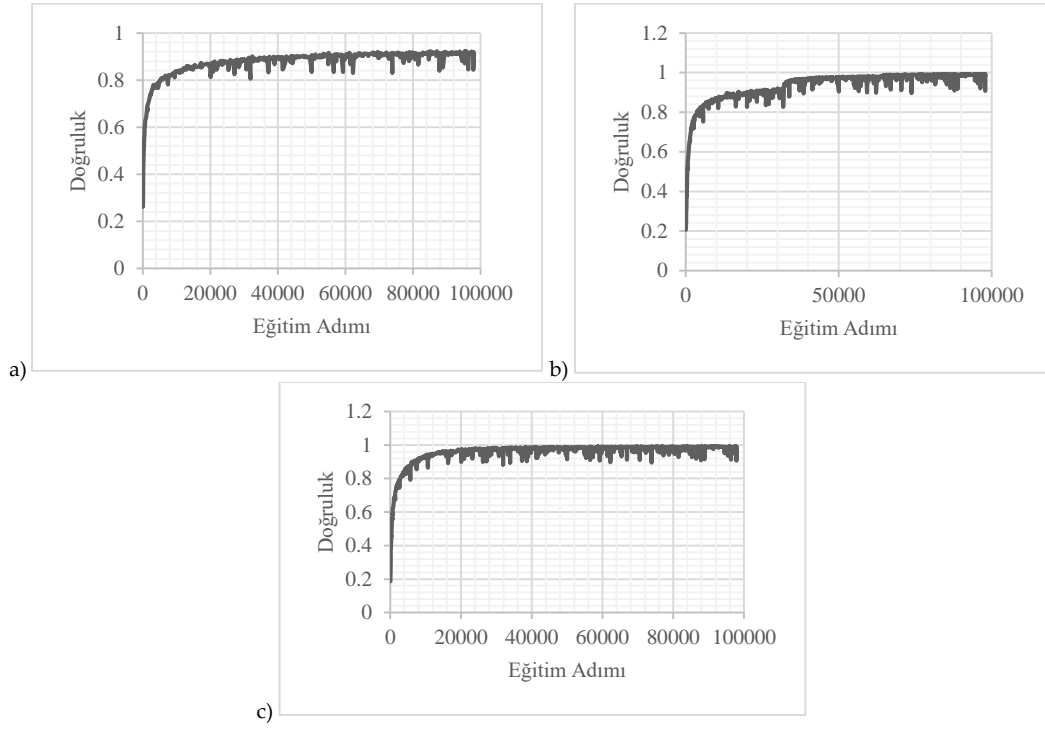
**Şekil 9.** Modellerin eğitim aşaması kayıp grafikleri a) E-Model b) R-Model c) A-Model

*Figure 9. Loss plots of the models during training a) E-Model b) R-Model c) A-Model*

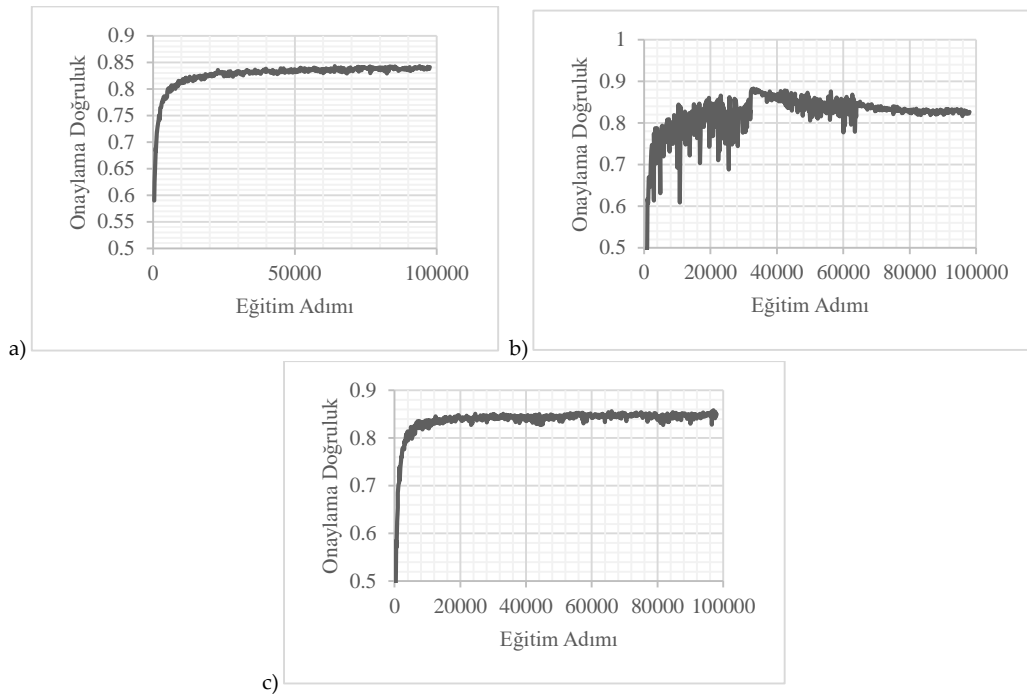
Şekil 9'da eğitim adımı sayısına göre hata oranlarındaki düşüş karşılaştırıldığında, en hızlı düşüş oranına A-Model'in sahip olduğu gözlemlenebilmektedir. Fakat E-Model'in de A-Model'e yakın bir sonuç ürettiği gözlemlenmiştir.

Şekil 10'daki doğruluk grafiklerinde x eksenini eğitim verileri üzerindeki başarı oranını göstermekte ve y eksenini modelin kaç eğitim adımı çalıştığını göstermektedir. Grafik incelendiğinde eğitim adımı sayısıyla doğru orantılı olarak aşırı iniş ve çıkma olmadığı gözlemlenmektedir. Grafikte aşırı iniş ve çıkışın olmaması ve eğitim adım sayısıyla artan bir doğruluk grafiğinin olması modellerin eğitim verilerini başarıyla öğrendiğini göstermektedir.

Şekil 11'de derin öğrenme modellerinin onaylama verileri üzerindeki doğruluk oranları gösterilmektedir. Bu grafiklere göre E-Modelin doğruluğunun %85'in altında kaldığı görülmektedir. R-Model'in yaklaşık 36,000 adımdan sonra düşüş yaşadığı gözlemlenmiştir. A-Modelin doğruluğunun ise %85'in üzerine çıktığı görülmektedir. R-Model'in eğitim doğruluğunun %100'e yakın olmasına rağmen, doğrulama doğruluğunun %82-85 Aralığında olması R-Model'in eğitim verilerini ezberlediğini göstermektedir.



**Şekil 10.** Modellerin eğitim verileri üzerinde doğruluk grafikleri a) E-Model b) R-Model c) A-Model  
*Figure 10.* Accuracy plots of the models on training data a) E-Model b) R-Model c) A-Model



**Şekil 11.** Modellerin test verileri üzerinde doğruluk grafikleri a) E-Model b) R-Model c) A-Model  
*Figure 11.* Accuracy plots of the models on validation data a) E-Model b) R-Model c) A-Model

Bu çalışmada kullanılan modellerin, literatürde yer alan bazı modeller ile CIFAR-10 veri kümesi üzerindeki doğruluk oranı ve içerdikleri parametre sayısına göre karşılaştırılması Çizelge 5'te verilmiştir.

**Çizelge 5.** Literatürdeki bazı modellerle bu çalışmada önerilen modellerin karşılaştırılması*Table 5. Comparison of the proposed models with some of the models in the literature*

Model	Doğruluk Oranı	Parametre Sayısı
MCDNN (Ciregan ve diğ., 2012)	%88.8	1,210,710
Maxout DNN (Goodfellow ve diğ., 2013)	%88.32	1,034,298
SSCNN (Graham, 2014)	%93.7	11,250,000
ACN (Springenberg ve diğ., 2015)	%90.92	1,300,000
ResNet-1001 (He ve diğ., 2016)	%95.4	10,200,000
DenseNet (Huang ve diğ., 2017)	%96.54	25,600,000
UL-Hopfiled (Liu ve Mukhopadhyay, 2018)	%83.1	25,600,000
ACNet (Wang ve diğ., 2019)	%94	19,800,000
NoisyDARTS (Chu ve diğ., 2020)	%98.28	5,500,000
SpinalNet (Kabir ve diğ., 2020)	%91.40	20,160,000
NAT (Lu ve diğ., 2021)	%98.40	6,900,000
A-Model	%87.64	966,986
R-Model	%84.04	550,058
E-Model	%83.47	715,018
(Bu çalışmada kullanılan modeller)		

Çizelge 5'te görüldüğü gibi Liu ve Mukhopadhyay (2018)'ın önerdiği UL-Hopfield modeli hariç, modellerin karmaşıklığı ve dolayısıyla parametre sayısı arttıkça doğruluk oranı artmaktadır. Bu çalışmada önerilen üç modelin de parametre sayısı literatürde kullanılan modellerden daha azdır. Bu durum, modellerin depolama ve bellek gereksinimini azaltan bir durum olacağı için bu modelleri kullanacak uygulamaların etkinliği için avantaj sağlayabilir. Özellikle, 242,826 parametreye sahip ve eğitim süresi 3.5 saat olan E-Model, bu modelden çok daha fazla parametre sayısına sahip MCDNN (1,210,710 parametre) ve Maxout DNN (1,034,298 parametre) ile karşılaştırılabilir doğruluk oranlarına sahiptir. Ayrıca, yaklaşık 25,600,000 parametreye sahip ResNet-50 modelini içeren UL-Hopfiled modelinden daha yüksek doğruluk oranına sahiptir.

Derin öğrenme modellerinin CIFAR-10 veri kümesi üzerinde eğitilmesi için kullanılan parametre değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 6.** Modellerin CIFAR-10 veri kümesi üzerinde eğitilmesinde kullanılan parametre değerleri*Table 6. Parameters used for training the models on CIFAR-10 data set*

Model	Epoch sayısı	Batch boyutu	Optimizasyon algoritması	Öğrenme oranı	Öğrenme oranı azalma
A-Model	500	256	Adam	0.0001	0.000001
R-Model	500	256	Adam	0.0001	0.000001
E-Model	500	256	Adam	0.0001	0.000001

Çizelge 6'da gösterildiği gibi tüm modeller için epoch sayısı, batch boyutu aynıdır. Başlangıç ağırlık değerleri gloriot\_uniform yöntemi ile oluşturulmuştur.

CIFAR-10 veri kümesi dışında derin öğrenme modelleri farklı SVHN, Parmaklar, Çiçekler, Ürün Kalitesi ve Balıklar veri kümeleri üzerinde MİB ve GİB içeren makine kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çizelge 7'de bu veri kümeleri için modellerin karşılaştırmasına dair sonuçlar verilmiştir. Her bir veri kümesi için modellerin tümünde eğitim aşamasında en düşük doğrulama kaybına sahip model kaydedilmiştir. Modellerin doğruluk veri seti üzerinde değerlendirilmesi eğitim aşamasında kaydedilen en iyi modeller kullanılarak yapılmıştır. Doğruluk değeri, doğrulama veri kümesi üzerinde elde edilen doğruluktur.

**Çizelge 7.** Modellerin diğer veri kümeleri üzerinde karşılaştırılması

*Table 7. Comparison of the models on the other data sets*

Veri kümesi	Resim Boyutu	Modeller	Eğitim Süresi	Doğruluk (Doğrulama)	Epoch sayısı	Batch boyutu	Optimizasyon algoritması	Öğrenme oranı	Öğrenme oranı azalma
SVHN	32x32	A-Model	37 dk	%94.88	100	256	Adam	0.001	0.000001
		R-Model	67 dk	%94.79	100	256	Adam	0.0001	
		E-Model	28 dk	%90.00	100	256	Adam	0.001	
Parmaklar	32x32	A-Model	3 dk	%94.78	100	32	Adam	0.001	0.000001
		R-Model	3 dk 20 sn	%95.21	100	32	Adam	0.001	0.0001
		E-Model	3 dk 30 sn	%90.12	100	32	Adam	0.001	0.000001
Çiçekler	32x32	A-Model	33 dk	%86.18	500	64	Adam	0.001	0.000001
		R-Model	38 dk	%89.29	500	64	Adam	0.001	0.000001
		E-Model	30 dk	%87.05	500	64	Adam	0.001	0.000001
Ürün Kalitesi	128x128	A-Model	3 dk 10 sn	%95	200	16	Adam	0.001	0.000001
		R-Model	3 dk 40 sn	%98.75	200	16	SGD	0.01	0.000001
		E-Model	3 dk	%98.12	200	16	Adam	0.001	0.000001
Balıklar	128x128	A-Model	142 dk	%97.09	500	64	Adam	0.0001	0.000001
		R-Model	165 dk	%96.07	500	64	Adam	0.0001	0.000001
		E-Model	137 dk	%96.76	500	64	Adam	0.0001	0.000001

Çizelge 7'de belirtildiği gibi modellerin eğitilmesinde genel olarak optimizasyon algoritması olarak Adam kullanılmıştır. Sadece Ürün Kalitesi veri kümesinde R-Model'in eğitilmesinde SGD (Stochastic Gradient Descent) algoritmasının Adam'dan daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Sadece Çiçekler veri kümesi için her üç modelin doğruluğu %90 altında kalmıştır. Diğer veri kümelerinde ise doğruluk tüm modeller için %90 ve üzerindedir. Balıklar veri kümesi (Ulucan ve diğ., 2020) üzerindeki doğruluk A-Model, R-Model ve E-Model için sırasıyla %97.09, %96.07 ve %96.76 olarak bulunmuştur. Bu veri kümesi üzerinde derin öğrenme modelleri kullanılarak sınıflandırmanın yapıldığı herhangi bir çalışma yoktur. Ulucan ve diğ., (2020) 6 farklı özellik çıkarım yöntemi kullanarak elde ettikleri özellikleri Destek Vektör Makinelerine (DVM) uygulayarak sınıflandırma yapmışlardır. Doğrulama veri kümesi için en iyi ortalama doğruluk değerlerini kontrast ve enerji özellikleri için sırasıyla %97.64 ve %97.47 olarak bulmuşlardır. En kötü doğruluk değerleri ise BoF (Bag of Features) yöntemi ile bulunan özellik ve gri seviye eş oluşum matrisinden yararlanarak buldukları ikinci ve üçüncü momentin toplamı olan özellik ile elde edilmiştir. Bu değerler sırasıyla %81.55 ve %89.57 olarak bulunmuştur.

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, AiA, ResNet ve ESA modellerine ait yaklaşımlar kullanılarak A-Model, R-Model ve E-Model olarak adlandırılan özgün derin öğrenme modeller oluşturulmuş ve literatürde yaygın olarak kullanılan veri kümeleri yanında, daha önce derin öğrenme yöntemleri uygulanmamış Balıklar (Ulucan



ve diğ., 2020) veri kümesi üzerinde performansları karşılaştırılmıştır. CIFAR-10 veri kümesi için eğitim sürelerini ve performanslarını karşılaştırma amacıyla modeller MİB ve MİB+GİB içeren bilgisayarlarda ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Performanslar arasında çok az fark olduğu, fakat MİB+GİB içeren bilgisayarda eğitim süresinin dramatik biçimde azaldığı tespit edilmiştir. Diğer veri kümelerinin tümü için modeller MİB+GİB içeren bilgisayarda eğitilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Modellerin eğitim aşamasında en düşük doğrulama kaybına sahip model kaydedilerek ilerlenmiştir. Doğruluk veri seti üzerinde modellerin değerlendirilmesi eğitim aşaması sonunda elde edilen en iyi modeller kullanılarak yapılmıştır.

Ulucan ve diğ., (2020) kendilerinin elde ettiği balık görüntülerini sınıflandırmak için literatürde yaygın olarak kullanılan resim özellik çıkarım yöntemleri ile elde ettikleri özellikleri DVM'ye uygulamışlardır. Dolayısıyla eğitim ve sınıflandırma işlemlerinden önce yoğun işlem gerektiren özellik çıkarımı adımı bulunmaktadır. Öte yandan, derin öğrenme yöntemleri özellik çıkarım adımı gerektirmeden eğitim ve sınıflandırma yapabilmektedir. Bu çalışmada oluşturulan A-Model, R-Model ve E-Model'in Balıklar veri kümesi üzerindeki doğruluğu, Ulucan ve diğ. (2020)'nın en iyi sonucu veren kontrast özelliğiyle elde ettikleri doğruluk oranına çok yakın bulunmuştur. Her modelin bir veri kümesindeki görüntü sınıfları üzerindeki doğruluk değerleri birbirinden farklı ve diğerlerine göre daha iyi olabildiği için, sonraki çalışmalarda genel sınıflandırma performansını artırmak üzere modellerin tahmin sonuçlarının birleştirileceği hibrid yöntemlerin kullanılabilceği düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Chu, X., Zhang, B., & Li, X., 2020, Noisy differentiable architecture search, arXiv:2005.03566.
- Ciregan, D., Meier, U., & Schmidhuber, J., 2012, Multi-column Deep Neural Networks for Image Classification, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Providence, RI, USA, 2012, pp. 3642-3649.
- Dabhi, R., 2020, (2020, 03.06.2021). *Casting product image data for quality inspection*. Available: <https://www.kaggle.com/ravirajsinh45/real-life-industrial-dataset-of-casting-product>.
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.J., Li, K., & Fei-Fei, L., 2009, Imagenet: A large-scale hierarchical image database, in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009, CVPR 2009, IEEE Conference on. IEEE, 2009*, pp. 248-255.
- Ganin, Y., Kononenko, D., Sungatullina, D., & Lempitsky V., 2016, Deepwarp: Photorealistic image resynthesis for gaze manipulation, *European Conference on Computer Vision*. Springer, Cham, pp. 311-326.
- Goodfellow, I., Warde-Farley, D., Mirza, M., Courville, A., & Bengio, Y., 2013, *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, PMLR, 28(3):1319-1327.
- Graham, B., 2014, Spatially-sparse convolutional neural networks, arXiv:1409.6070.
- He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J., 2016, Deep residual learning for image recognition, in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016*, pp. 770-778.
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L. & Weinberger, K. Q., 2017, Densely Connected Convolutional Networks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, USA, pp. 2261-2269.
- İnik, Ö. & Ülker, E., 2017, Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6(3): 85-104.
- Kabir, H.M.D.; Abdar, M.; Jalali, S.M.J.; Khosravi, A.; Atiya, A.F.; Nahavandi, S.; Srinivasan, D., 2020, SpinalNet: Deep neural net workwith gradual input, arXiv:2007.03347.
- Kızrak, M.A., Bolat, B., 2018, Derin Öğrenme ile Kalabalık Analizi Üzerine Detaylı Bir Araştırma, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, (11) 3: 263-286.
- Koryakin, P., 2019, (2019, 03.06.2021). *Fingers*. Available: <https://www.kaggle.com/koryakinp/fingers>.
- Krizhevsky, A., 2009, Learning multiple layers of features from tiny images, Master's thesis, Department of Computer Science, University of Toronto.

- Krizhevsky, A., Sutskever, I. & Hinton, G. E., 2012, ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, NIPS'12: Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems, Lake Tahoe Nevada, USA, 2012, pp. 1097-1115.
- Lin, M., Chen, Q., & Yan, S., 2013, Network in network, arXiv:1312.4400.
- Liu, Q & Mukhopadhyay, S., 2018, Unsupervised Learning using Pretrained CNN and Associative Memory Bank, *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2018)*, 8-13 Jul 2018, Rio, Brazil, pp. 1-8.
- Liu, Q., Zhang, N., Yang, W., Wang, S., Cui, Z., Chen, X., & Chen, L., 2017, A Review of Image Recognition with Deep Convolutional Neural Network, In: Huang DS., Bevilacqua V., Premaratne P., Gupta P. (eds) *Intelligent Computing Theories and Application. ICIC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 10361. Springer, Cham.
- Lu, Z., Sreekumar, G., Goodman, E., Banzhaf, W., Deb, K. & Boddeti, V. N., 2021, Neural Architecture Transfer, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (43): 2971-2989.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W., 1943, A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4): 115-133.
- Netzer, Y., Wang, T., Coates, A., Bissacco, A., Wu, Bo. & Ng, A.Y., 2011, Reading Digits in Natural Images with Unsupervised Feature Learning, *NIPS Workshop on Deep Learning and Unsupervised Feature Learning*.
- Nilsback, M. & Zisserman, A., 2006, A Visual Vocabulary for Flower Classification, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp.1447-1454.
- Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. & Group T.P.R., 1986, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, MIT Press, Cambridge.
- Springenberg, J.T., Dosovitskiy, A., Brox, T. & Riedmiller, M., 2015, Striving for simplicity: The All Convolutional Net, arXiv:1412.6806.
- Ulucan, O., Karakaya, D. & Turkan, M., 2020, A Large-Scale Dataset for Fish Segmentation and Classification, *2020 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-5.
- Wang, G., Wang, K., & Lin, L., 2019, Adaptively Connected Neural Networks, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, CA, USA, 2019, pp. 1781-1790.



## METAHEURISTIC ALGORITHMS BASED APPROACHES FOR EFFICIENCY ANALYSIS OF THREE-PHASE DRY-TYPE TRANSFORMERS

<sup>1</sup>Seda KUL , <sup>2</sup>Seyit Alperen CELTEK , <sup>3</sup>Ires ISKENDER   
<sup>1</sup>sedakul@kmu.edu.tr, <sup>2</sup>salperenceltek@kmu.edu.tr, <sup>3</sup>ires@cankaya.edu.tr

<sup>1</sup>Karamanoglu Mehmetbey University, Engineering Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, Karaman, TURKEY

<sup>2</sup>Karamanoglu Mehmetbey University, Engineering Faculty, Energy Engineering Department, Karaman, TURKEY

<sup>3</sup>Cankaya University, Engineering Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, Ankara, TURKEY

(Geliş/Received: 01.06.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 07.09.2021)

**ABSTRACT:** Transformers are considered as the significant contributors to the efficient transmission and distribution of electrical energy. The ability to change the voltage and current levels in inverse proportion help to reduce the conductor losses. However, today's stringent requirements for more significant efficiency markings turn attention to the efficiency of individual components in a power system. Therefore, a great deal of effort is being placed to maximize the efficiency of the transformers without compromising their fundamental function. This is a complex problem and requires the use of advanced design tools. Metaheuristic methods developed in recent years are being used in electrical engineering, where they provide savings in design time and great success in finding the optimum solution. In this study, we have used the Particle Swarm Optimization (PSO), the Simulated Annealing (SA), and the Tree Seed Algorithm (TSA) methods, respectively. The objective is to develop a design methodology for three-phase dry-type transformers and to maximize their efficiency. The results of the three algorithms are compared to validate the optimum solution. For the demonstration of the process, a three-phase 100 kVA dry-type transformer is used. After the mathematical model of the transformer is created, the transformer parameters, current density (s), and transformer iron cross-section acceptability (C) are optimized. As a result, it has been observed that the efficiency of transformers can be increased beyond what is achieved with conventional techniques. The efficiency has been optimized and increased from 97.5% to 98.44%.

**Key Words:** Optimization, dry-type transformer, metaheuristic algorithms, transformer efficiency.

### Üç Fazlı Kuru Tip Transformatör Verimliliği İçin Meta Sezgisel Algoritma Tabanlı Yaklaşımlar

**ÖZ:** Transformatörler, elektrik enerjisinin verimli iletimi ve dağıtımına önemli katkı sağlayan unsurlar olarak kabul edilir. Gerilim ve akım seviyelerini ters orantılı olarak değiştirme yeteneği, iletken kayıplarının azaltılmasına yardımcı olur. Bununla birlikte, günümüzün daha önemli verimlilik işaretlerine yönelik katı gereksinimleri, bir güç sistemindeki bireysel bileşenlerin verimliliğine dikkat çekiyor. Bu nedenle, temel işlevlerinden ödün vermeden transformatörlerin verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için büyük çaba sarf edilmektedir. Bu karmaşık bir sorundur ve gelişmiş tasarım araçlarının kullanılmasını gerektirir. Son yıllarda geliştirilen meta-sezgisel yöntemler, tasarım süresinde tasarruf ve optimum çözümü bulmada büyük başarı sağladıklarından elektrik mühendisliğinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada sırasıyla Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Benzetimli Tavlama (SA) ve Ağaç Tohum Algoritması (TSA) yöntemlerini kullandık. Amaç, üç fazlı kuru tip transformatörler için bir tasarım metodolojisi geliştirmek ve verimliliklerini en üst düzeye çıkarmaktır. Üç algoritmanın sonuçları, optimum çözümü doğrulamak için karşılaştırılır. Prosesin gösterimi için üç fazlı 100 kVA kuru tip bir

transformatör kullanılır. Transformatörün matematiksel modeli oluşturulduktan sonra transformatör parametreleri, akım yoğunluğu (s) ve transformatör demir kesiti kabul edilebilirliği (C) optimize edilmiştir. Sonuç olarak, transformatörlerin verimlerinin geleneksel tekniklerle elde edilenin üzerinde artırılabilceği gözlemlenmiştir. Verimlilik optimize edilmiş ve 0.975'ten 0.9844'e yükseltilmiştir.

*Anahtar Kelimeler:* Optimizasyon, kuru tip transformatör, meta sezgisel algoritmalar, transformatör verimliliği.

## 1. INTRODUCTION

In recent years, increasing demand for eco-friendly and efficient energy systems has made dry-type transformers the top choice of many critical applications. The main motivation behind this choice is that the dry-type transformers are safer and more reliable compared to oil-immersed transformers. They are the ideal choices for risky areas, industrial plants, environments that require safety, reliability, non-flammable, and eco-friendly such as marine systems, transit applications, and urban areas. However, this type of transformer is more expensive and has voltage and power limitations. Therefore, the critical problem in overall design has become achieving an optimal solution for cost and efficiency. Many techniques have been developed and applied to reduce the cost and improve the efficiency of the dry-type transformers. In literature, optimum design of dry-type transformers has been studied using different optimization techniques such as Genetic Algorithm (GA), Artificial Bee Colony (ABC), Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Neural Network (ANN), and different nature-inspired and metaheuristic algorithms.

In this section, an overview of the optimization studies of transformers is presented. These studies have used different optimization techniques and considered optimizing the cost, mass, efficiency, parameter, and temperature. The minimum cost and mass optimization analysis for a 1.5 kVA dry-type transformer was performed using the GA with two different mutation operators and compared against each other (Celebi, 2008). The genetic algorithm is one of the oldest known optimization methods for transformer design. In (Smolka and Nowak, 2011), the GA and the Computational Fluid Dynamics (CFD) were used to optimize the coil and air-gap dimensions for hot-spot and average temperature. These results are compared with the existing devices. After the GA applications, the researcher in (Tosun *et al.*, 2012) used the Tabu Search Algorithm to obtain the minimum weight for the maximum efficiency. They compare this method with the classic numerical calculation results for a 1.5 kVA three-phase transformer in terms of efficiency.

Cost is an essential parameter during the design process in industry; therefore, mass optimization is a popular topic for studying; however, efficiency and dimension validation should be considered in terms of feasibility. The general objective of the studies is cost optimization with different techniques and evaluating the performance by comparing the results against each other (Cheema *et al.*, 2013; Azizian *et al.*, 2016; Patil and Kushare, 2016; Orosz *et al.*, 2017; Gaikwad, 2018). (Cheema *et al.*, 2013) uses four different methods for comparing and examining the result in terms of efficient thermal design. GA and SA were used to optimize the overall cost of the system for the real data of all types of transformers, such as oil-immersed and dry-type in (Gaikwad, 2018). Then, GA, PSO, and ABC are also compared according to performance and process speed (Azizian *et al.*, 2016). The Grey Wolf optimization technique was implemented for the first time in transformer optimization and compared to other optimization methods in (Orosz *et al.*, 2017). Invasive Weed optimization was first time used in an industrial application with other metaheuristic methods (Aksu and Demirdelen, 2018). Another study used the Tree Pruning method for design optimization; a 200 MVA transformer was simulated with FEM (Soldoozy *et al.*, 2018). Researchers optimized all design parameters in order to minimize both the losses and the cost. In (Demirdelen, 2018), the volume optimization and minimum-cost maximum efficiency optimization were performed using the Firefly algorithm (FA). It was used for the first time in volume calculation in this study. The PSO algorithm was used to decide the joint design of the transformer based on core performance, and a FEM model was created based on obtained parameters (Alyozbakay *et al.*, 2019).

In other studies, up to now, they mainly used optimization algorithms such as Genetic Algorithm, ANN, surface respond, pattern search, honey bee mating, ant colony optimization for cost, thermal, loss, and mass optimization and compared their performances. Later, some tested their suitability with FEM, and some made measurements on existing transformers (Zhang *et al.*, 2013; Orosz *et al.*, 2020). All the literature review made in this paper is summarized in Table 1. It is seen that the efficiency analysis of transformers is the fundamental subject almost in every design optimization; what comes later is the optimization of cost, weight, volume, and thermal behavior, respectively.

**Table 1.** Review summary of fundamental optimization studies made for transformers

Ref.	Year	Cooling Type	Objective Function	Optimization Technique	Methodology	Conclusion
(Celebi, 2008)	2008	Dry-type	Min-cost and mass	Genetic Algorithm	Optimized $C$ and $s$ parameters with two different mutation operators	Random and partial mutation operators are applied, and random mutation yields a better performance to get the minimum mass
(Tosun <i>et al.</i> , 2012)	2012	Dry-type	Min weight	Tabu Search Algorithm	Numeric Transformer formulation	Comparing mathematical and optimization results within each other
(Cheema <i>et al.</i> , 2013)	2013	Oil-type,	Min cost	Direct search, Differential Evolution, Simulated annealing, Random search,	The hybrid approach is composed of multiple algorithms constrained optimization of the objective function. Four differently rated transformers were designed and tested.	Design made by this optimization achieves lower magnetic flux density and current density. Optimization results have improved efficiency, and projected longer operational lifetimes, and so on.
(Azizian <i>et al.</i> , 2016)	2016	Dry-type	Min cost	GA, PSO, ABC	Compared within each other in terms of design parameters and cost	PSO is the best in terms of rapid convergence, accuracy, and simplicity of implementation
(Patil and Kushare, 2016)	2016	Dry-type	low cost, low weight, small size	FEM	Optimized value of Inter-coil spacing or the insulation thickness	Analysis of the Electric field stresses three variants of Inter-coil insulation thickness using FEM by ElecNet software.
(Orosz <i>et al.</i> , 2017)	2017	Dry-type	Min cost	Meta Heuristic, Brute Force Algorithm, PSO, Gray wolf optimization,	These four techniques were compared to see the accurate solution in the case of core-form power transformers.	The meta-heuristic algorithm gave more accurate results in a much shorter time than any other examined method. The grey wolf optimization algorithm had a better performance for low iterations than the particle swarm optimization.
(Basak, 2017)	2017	Dry-type	Min cost	Simulated Annealing and Pattern Search	Finding optimal design parameters for low cost using effective methods	SA has better optimal design parameters result for min-cost than a pattern search algorithm
(Gaikwad, 2018)	2015	Oil-type, synthetic oil-type and Dry-type	Min cost	GA and Simulated Annealing	Insurance cost is optimized using GA to achieve economic benefits and optimal placement	The working model optimized placing, rating, quantity considering average demand and gave a user-friendly tool, optimize placing for getting cost-effective results in terms of different types of transformers.
(Aksu and Demirdelen, 2018)	2018	Dry-type	Min weight and cost, max	Firefly, Invasive Weed, Multi-	$C$ and $s$ parameters are optimized	PSO finds the fastest way to the optimal solution. FA algorithm calculated weight

			efficiency	Objective Algorithms		priority; the IWO algorithm calculated weight and efficiency with the same priority.
(Soldoocy <i>et al.</i> , 2018)	2018	Oil- type	Min weight and cost, design optimization	Tree Pruning Method	Genetic algorithm, unrestricted population size evolutionary multi-objective optimization, and heuristic method were compared.	6.5%, 5.9% and 2.1% reduced, respectively.
(Demirdelen, 2018)	2018	Oil type	Volume optimization	Firefly optimization	Optimization of design parameters of transformer and comparison with GA results	Obtained results with FA were better than those obtained with GA. FA was also faster.
(Alyozbakay <i>et al.</i> , 2019)	2019	Oil-type	Min loss	PSO	Different joint types and materials were used to obtain the optimal design parameter.	An interaction was observed between Matlab code for PSO and the ANSYS software. The first results generated by the PSO were used. The losses, core, and oil temperature were measured using the ANSYS software.
(Demirdelen, 2019)	2019	Dry-type	Optimum efficiency	Firefly optimization	Optimum efficiency was evaluated depending on the losses, winding size, and the $C$ coefficient. Magnetic and thermal analysis concerning the lifetime of the transformer were done	Single Phase Transformer was designed and optimized based on design parameters, and the result showed that optimal efficiency has a significant impact on the temperature behavior
(Rodríguez, <i>et al.</i> , 2019)	2019	Dry-type	Geometric parameters were optimized to reduce power loss	Artificial Bee algorithm	Power loss and volume were optimized to get min cost	Six design parameters were optimized and compared with ABC, ant colony, honey bee mating, simulated annealing optimization algorithms
(Esenboga and Demirdelen, 2020)	2020	Dry-type	Min weight and cost, max efficiency	PSO based on ANN	$C$ and $s$ parameters are optimized	Weight and efficiency values were obtained, and FEM analysis
(Wang <i>et al.</i> , 2020)	2020	Dry-type	Min loss and cost	GA	The cross-sectional area of the core and length of the winding coil are optimized to minimize loss and cost	The relationship between loss, cost, and design parameters was analyzed, an optimization model was established with min loss and cost optimization aim.
(Orosz <i>et al.</i> , 2020)	2020	Oil-immersed	Min total cost	NSGA II and FEM	The study presents a novel, evolutionary algorithm-based transformer optimization to determine the optimal conductor shape for the windings during this examined design stage.	The precision of the analytical formulas used is about 5% less compared to FEM-based calculations. This difference is acceptable as less than 1%.

In this paper, the optimization problem is defined mathematically by expressing the objective function in terms of the analytical formulas used by manufacturers for the electromagnetic design of transformers.

We have come across many brand-new research and publications that propose novel metaheuristic algorithms for optimization during our literature review study so far. Our motivation is to quickly adopt this technology to our field of expertise and improve dry-type transformers. Verified performance via Finite Element Analysis (FEA) and computer simulation will guide designers and accelerate the design of future high-performance transformers. Therefore, in this study, the Tree Seed Algorithm (TSA) optimization method, which is a newly developed optimization algorithm, is used in dry-type transformer optimization for the first time. The results are compared with other metaheuristics techniques for performance verification.

Finite Element Analysis of the transformer has been simulated using the optimized design parameters for electromagnetic behavior to validate the result. This application allows us to test the optimization results faster. If the results do not match the practical application, optimization can be repeated.

It is possible to summarize the main objectives of this study as follows:

- First time application of the Tree Seed Algorithm to a dry-type transformer design optimization problem
- Comparing results in terms of accuracy, process speed, and performance with other state-of-the-art transformer optimization methods
- Analysis of the transformer via FEM for the validation of optimization results

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 describes the mathematical design of a three-phase dry-type transformer. The methodology of the optimization technique and objective functions have been explained in Section 3. The optimization results and discussion are shown in Section 4. The conclusions are summarized in Section 5.

## 2. MATHEMATICAL DESIGN OF THREE-PHASE DRY-TYPE TRANSFORMERS

The mathematical model of the three-phase dry-type transformer is obtained, and the boundary conditions of objective function have been determined according to reference (Tosun *et al.*, 2012). Using these boundary conditions and objective functions, optimization will be performed according to current density ( $s$ ) and transformer iron cross-section acceptability ( $C$ ) values.

$$\begin{aligned} 2.2 < s < 3.5 \text{ (A/mm}^2\text{)} \\ 5.9 < C < 10.6 \text{ (cm}^2\text{Joule}^{-1/2}\text{)} \end{aligned}$$

$S$  (kVA),  $U_1$  and  $I$  are parameters of the transformer, and they are the apparent power, excitation or winding voltage, and the current, respectively.

$$S = \sqrt{3}U_1I \quad (1)$$

$q_{fe}$  is the iron cross-section of the core, and  $f$  is a fundamental frequency of the system.

$$q_{fe} = C \sqrt{\frac{1000S}{3f}} \quad (2)$$

The radius of the iron core ( $D$ ) is obtained as:

$$D = \sqrt{\frac{4q_{fe}}{(0.677)\pi}} \quad (3)$$

Primary and secondary winding turn ratios are defined in Eq. 4. Here  $B$  is the magnetic flux density.

$$N_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}4.44fBq_{fe}10^{-8}} \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{U_2}{\sqrt{34.44} f B q_f e 10^{-8}} \quad (5)$$

Cross-section of the transformer primary and secondary winding is obtained respectively:

$$q_1 = \frac{I_1}{s} \quad (6)$$

$$q_2 = \frac{I_2}{s} \quad (7)$$

$L_s$  is the height of windings, and  $A_s$  is specific amper winding as 387 A /cm for a 100 kVA transformer given in (Aksu and Demirdelen, 2018):

$$L_s = 2 \frac{N_1 I_1}{A_s} \quad (8)$$

$a$  is a window width for the core type transformer and  $k_{cu}$  is defined as a window copper fill factor.

$$a = (0.04) \frac{N_2 q_2}{(0.1) k_{cu} L_s} \quad (9)$$

to obtain average winding lengths:

$$L_{m_1} = \pi(D + 3.32) \quad (10)$$

$$L_{m_2} = \pi(10D + 8 + a_2) \quad (11)$$

After calculating winding lengths, winding resistances can be calculated, and  $\rho_0 = 2.65 \times 10^{-8} \Omega m$  denotes electric resistivity for aluminium.

$$r_1 = \rho_0 \frac{L_{m_1} N_1}{q_1} \quad (12)$$

$$r_2 = \rho_0 \frac{L_{m_2} N_2}{q_2} \quad (13)$$

$r_1$  and  $r_2$  are used to calculate winding losses:

$$P_{cu1} = 3I_1^2 r_1 \quad (14)$$

$$P_{cu2} = 3I_2^2 r_2 \quad (15)$$

Total winding losses can be given as below

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} \quad (16)$$

After determining the winding losses, the next step is calculating iron (core) losses. To obtain iron losses, weights of legs and yokes, specific yoke iron loss ( $p_{fej}$ ) and specific leg iron loss ( $p_{feb}$ ) must be calculated separately.

$$p_{feb} = p_{10} \xi_2 B^2 \quad (17)$$



$p_{10}$  and  $\xi_2$  are defined as the loss factor and the additional loss factor, respectively. The detailed definitions of these constants can be seen in (Aksu and Demirdelen, 2018).  $\gamma_{Fe}=7600 \text{ kg/m}^3$  is the iron-specific weight constant.

$$G_{feb} = 3\gamma_{Fe}q_{fe}L_s10^{-3} \quad (18)$$

$G_{feb}$  is the total weight of the transformer legs. The total iron losses for the legs can be obtained:

$$P_{feb} = G_{feb}p_{feb} \quad (19)$$

$q_{fej}$  is yoke cross-section area and it should be 20% more, therefore  $q_{fej}=1.2q_{fe}$ .

$$G_{fej} = 3\gamma_{Fe}q_{fej}2(2M + 0,8D)10^{-3} \quad (20)$$

Here  $M = 0.851D + 0.1L_sB_j$  is the yoke flux density, and it should be 20% less than flux density in the limbs.  $B_j = \frac{B}{1.2}$ .

$$p_{fej} = p_{10}\xi_2B_j^2 \quad (21)$$

Iron loss of yokes is shown in Eq. 22.

$$P_{fej} = G_{fej}p_{fej} \quad (22)$$

Total iron losses of the transformer in terms of Watt is obtained:

$$P_{fe} = P_{feb} + P_{fej} \quad (23)$$

The total losses of the transformer are shown in Eq. 24.

$$P_{total} = P_{fe} + P_{cu} \quad (24)$$

End of the calculations, the efficiency of the transformer can get as a percentage by Eq. 25. The main target of this paper is to maximize the efficiency of the transformer. Therefore, Eq. 25 is used as an objective function of three optimization methods for this study.

$$\eta = \frac{s}{s+P_{total}} \quad (25)$$

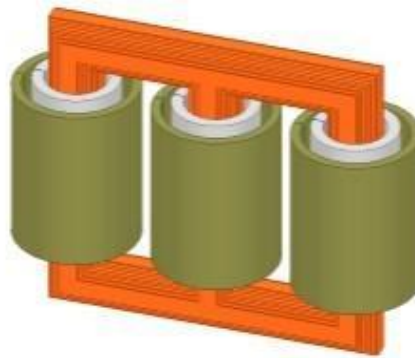
If we express the optimization parameters  $x_1 = s$ ;  $x_2 = C$ ;  $x_3 = \eta$ :

$$X = \{2.2 < s < 3.5, \quad 5.9 < C < 10.6, \quad 0.9 < \eta < 1\}$$

This study applies the optimization process by considering these limit values to a 100 kVA transformer for validation. The optimized parameters have been used to redesign the transformer and seen the feasibility of the study.

**Table 2.** General specifications and dimensions of three-phase dry-type transformer

Quantity	Values
Power Level	100 kVA
Voltages	10/0.4 kV
Turns	1819/42
Window width	245 mm
Diameter of the iron core	146 mm
Primary winding length	450 mm
Secondary winding length	490 mm
Iron cross-section	14740 mm <sup>2</sup>
Window length	580 mm
Core loss ( $P_{coreloss}$ )	400 W
Copper losses ( $P_{cu}$ )	2000 W

**Figure 1.** Transformer ANSYS/Maxwell model

### 3. THE METHODOLOGY OF OPTIMIZATION TECHNIQUES

#### 3.1. Simulated annealing

The simulated annealing (SA) algorithm is a multi-dimensional optimization method inspired by the metallurgical annealing process. Providing the appropriate property changes with the solid-state temperature changes in metal materials with one or several connected processes. To avoid metastable states caused by blast cooling, metals are usually cooled rather slowly. Thus to metals, time is given to reach a stable, structurally robust, and low-energy level.

The same general process is used in the simulated annealing algorithm. Here the temperature value is assigned to a function, and optimization causes a temperature drop. Heat treatment (Simulated Annealing) (SA) is a random search algorithm developed by taking advantage of the analogy between cooling and freezing a metal to its minimum energy crystal structure and investigating the minimum in a more general system. This analogy forms the basis of a combinatorial optimization technique.

Simulated annealing was developed by Kirkpatrick *et al.* in 1983 to solve nonlinear problems (Kirkpatrick *et al.*, 1983). It has attracted the attention of many researchers because of its simple application and wide application area (Bendaoud *et al.*, 2019; Holzschuh *et al.*, 2020). The most important advantage of the algorithm is that it can avoid getting stuck in local minimums over other methods.

The pseudocode that can be used to find the function minimum by simulated annealing is as follows.

1. Choose the initial value of T.
2. Calculate  $f(\vec{x}_i)$  for  $x_i$
3. Calculate  $f(\vec{x}_{i+1})$  for  $x_{i+1}$
4. if  $f(\vec{x}_{i+1}) < f(\vec{x}_i)$ , movement is accepted, otherwise;
  - a. Calculate the  $\omega = \exp[(f(\vec{x}_{i+1}) - f(\vec{x}_i))/T]$
  - b. random  $r$  between  $0 < r < 1$

- c. if  $\omega > r$  the solution is accepted, otherwise rejected
5. Calculate the new  $x_{i+1}$ .
6. Find the minimum fitness.
7. Decrease T
8. If the stop criteria is done, go to step 10
9. Go to step 2 and apply for a new T
10. Finish

Where T is the temperature value, and  $f(x)$  is an objective function.  $x_i$  and  $x_{i+1}$  represent the solution candidate and the relationship between  $x_i$  and  $x_{i+1}$  like in Eq. 26:

$$x_{i+1} = x_i + Q_u \quad (26)$$

Where  $Q_u$  is a matrix that controls the step size distribution.

### 3.2. Particle swarm optimization

The PSO, developed by Eberhart and Kennedy in 1995, is a population-based metaheuristic optimization technique (Eberhart and Kennedy, 1995). PSO, which birds inspire, is assumed that each particle can update its position and velocity by using global and local best values. Many researchers have applied PSO to their study because of its simple application (Latchoumi *et al.*, 2019; Celtek *et al.*, 2020). The position and velocity equations for a conventional PSO are as follows:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1(pbest(t) - x_i(t)) + c_2(gbest(t) - x_i(t)) \quad (27)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (28)$$

Where  $pbest$ ,  $gbest$ ,  $x_i(t)$ ,  $v_i(t+1)$  are the local best particle, the global best particle, the position of particle  $i$  in iteration  $t$ , the velocity of particle  $i$  in iteration  $t+1$ , respectively.

In Eq. 27 and 28,  $t$ ,  $v_i(t)$  and  $x_i(t)$  indicate respectively the number of iterations, the speed of particle  $i$ , and the position of particle  $i$ . The  $c_1$  and  $c_2$  are called acceleration coefficients where  $0 < c_1, c_2 \leq 2$ . The inertia weight  $\omega \in [0.8; 1.2]$  and  $\omega$  set to 1 in the original PSO update speed equation. Inertia weight indicates how much of the previous speed is taken from the previous time step. Shortly, inertia weight was used to balance the global and local search capability of the PSO. Large inertia weight makes the global search easier, while small weight makes the local search easier. Inertia weight provides the balance between local and global search, and as a result, the optimal results are achieved with less iteration. Therefore, the determination of the appropriate value of inertia weight is very critical.

### 3.3. Tree seed algorithm

Tree Seed algorithm (TSA) is one of the heuristic algorithms developed inspired by nature. In this algorithm, the positions of trees and seeds in a certain area are considered as an optimization problem (Kiran, 2015). Each seed production is based on the best or randomly selected tree location in the tree population. The computational process starts by determining the starting positions of the trees using the following Eq. 29;

$$T_{i,j} = L_{j,min} + rand(0,1)(H_{j,max} - L_{j,min}) \quad (29)$$

Where  $i = 1, 2, \dots, N$  and  $j = 1, 2, \dots, D$ ,  $N$  is the tree number,  $D$  is the dimension.  $T_{i,j}$  represents the position of the tree,  $H_{max}$  and  $L_{min}$  represent the top limit and bottom limit, respectively.

After the tree positions are generated, each location optimization problem is evaluated according to the objective function. Seed production is carried out in two different ways for each tree. This selection is determined by the most basic control parameter of the algorithm, defined as search tendency (ST). If the random value generated is lower than this parameter, Eq. 30 is used, and if it is greater, the seed production mechanism in Eq. 31 is used.

$$S_{i,j} = T_{i,j} + rand(-1,1)(B_j - T_{r,j}) \quad (30)$$

$$S_{i,j} = T_{i,j} + rand(-1,1)(T_{i,j} - T_{r,j}) \quad (31)$$

Where  $S_{i,j}$  is the  $j$ th dimension of the  $i$ th seed,  $B_j$  is the  $j$ th dimension of the best tree, and  $T_{r,j}$  is the  $j$ th dimension of the  $r$ th seed, which is random.

After the seeds produced are evaluated according to the purpose function, those with better suitability from the current tree position replace the trees in the next generation. The seed production and development process continues until the maximum number of fitness evaluations (FEs) is reached.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this study, we have aimed to design a 100 kVA dry-type transformer in such a way that the efficiency is maximum. As it is suggested in the references that handle the efficiency issue, the core quality factor (C) and the current density (s), which are the basic design parameters, are selected as the optimization parameters (Celebi, 2008; Tosun *et al.*, 2012; Aksu and Demirdelen, 2018). We formulated the efficiency as the objective function and updated the selected parameters to maximize it (Eq. 25).

Other design parameters used in the transformer design are given in Table 3.

**Table 3.** Parameters used in transformer design (Aksu and Demirdelen, 2018)

Symbols	Parameters	Value
$p_{10}$	Loss factor	1.3
$\epsilon_2$	Additional loss factor	1.15
B	Flux density	[1.5-1.7] T
$U_1$	Primary winding voltage	10000 V
$U_2$	Secondary winding voltage	400 V
$A_s$	Specific ampere winding	387 A/cm

Losses are directly related to the type of transformer to be designed. In this study, the dry-type transformer has been optimized by PSO, TSA, and SA methods. It is aimed to obtain the maximum efficiency for each method. The calculation for each method was carried out in 50 iterations. Each calculation is obtained by running the algorithms 30 times because of the stochastic nature of the methods used in this study.

The results of optimization methods are given in Figures 2, 3, and 4. The horizontal axis and vertical axis represent the iteration number and objective function, respectively. The study aims to maximize efficiency while simultaneously obtaining the optimum s and C value of a three-phase dry-type transformer. Thus the objective functions show efficiency. Algorithms optimize the C and s parameters; thus, the transformer losses are minimized, and efficiency is maximized. The values used to plot the curves in three figures are the average values of the multiple runs (30 runs).

Figure 2 shows the SA optimization results. As seen in Figure 2, the SA finds out the best value on the fourth iteration. The best value found out by SA is 0.981. There is a slight fluctuation between iteration 5 and 50. We assume that it is because of the stochastic structure of the SA.

The result of the PSO technique is given in Figure 3. The best value, which is 0.9838, is obtained on the fifth iteration. According to the results of the first iteration, the PSO gives better results than SA. The PSO starts the optimization process with 0.9822, while SA begins with about 0.85. These results show that the PSO method searches the solution space better than SA.

The results of TSA are given in Figure 4. The best value obtained by TSA is 0.98439, which is found in the third iteration. There is no fluctuation between the 3rd iteration and the 50th iteration. Therefore, it can be said that TSA generates very stable results. Therefore, the maximum efficiency of the transformer is obtained as  $\eta = 0.98439$  at  $C = 9.0196$  and  $s = 2.501$ .

The maximum efficiencies obtained by SA, PSO, and TSA optimization algorithms are listed in Table 4. The transformer used as a prototype and the fem model given in Figure 1 above is expressed as Model in Table 4.

Time-dependent FEM analysis has been made with the basic design parameters of the transformer, and current-voltage graphs have been obtained, as seen in Figure 5. In addition, the iron and copper losses are shown separately in Figure 6. These values are the analysis results obtained with basic design parameters before the optimization.

After obtaining the optimum  $C$  and  $s$  values with SA, PSO, and TSA algorithms, transformer dimensions were changed using each method's optimum  $C$  and  $s$  values. Therefore, six separate new simulations (three for core and three for copper losses) have been performed. Table 5 shows the new efficiency values obtained from the analysis of the three-phase dry-type transformer designed with the optimum  $C$  and  $s$  values calculated according to the optimization methods.

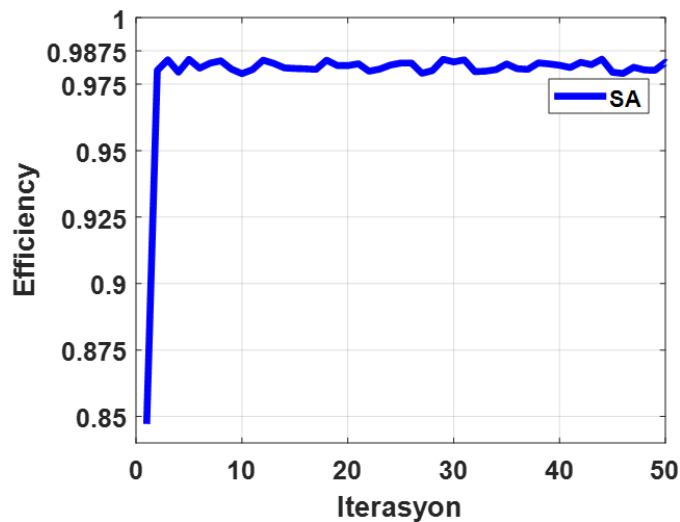


Figure 2. Change of objective function based on SA

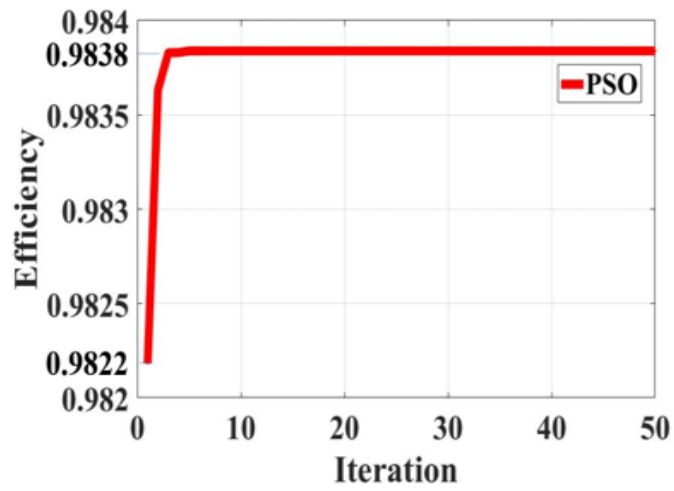


Figure 3. Change of objective function based on PSO

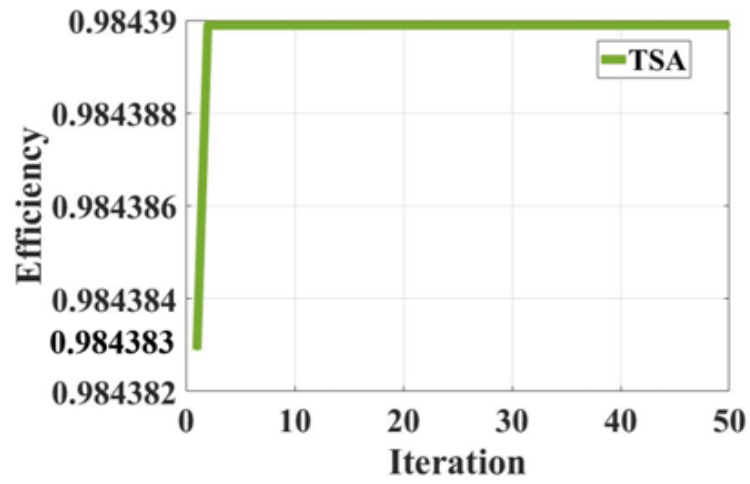


Figure 4. Change of objective function based on TSA

Table 4. Efficiency results of optimization techniques

Algorithms	Efficiency
Model	0.9750
SA	0.9810
PSO	0.9838
TSA	0.9844

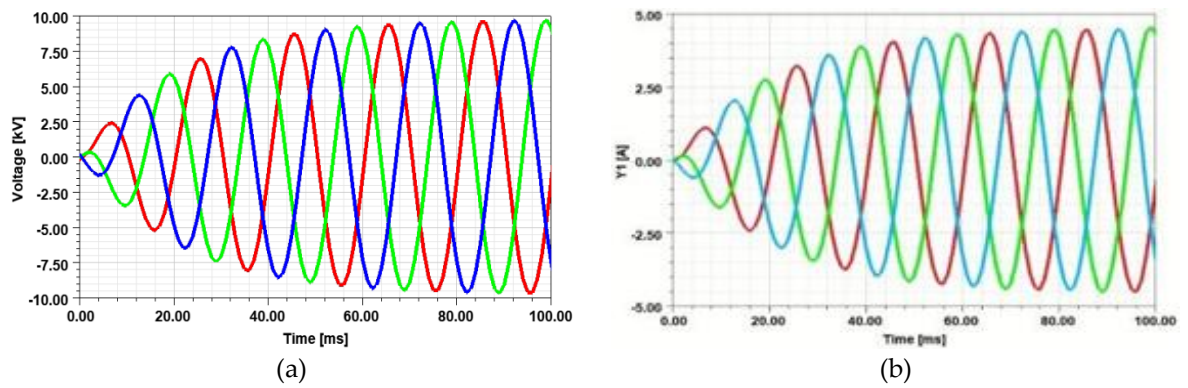


Figure 5. a) Excitation voltage b) Primary current

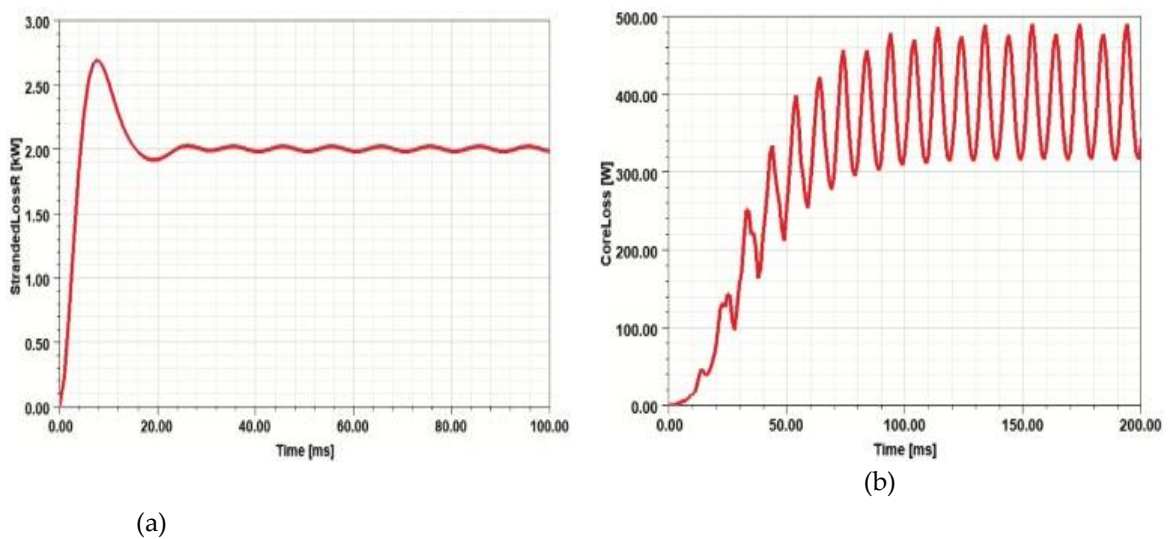


Figure 6. a) Winding Losses b) Core losses

Table 5. Efficiency result of FEM modeling with optimized parameters

Algorithms	Efficiency
Model	0.9750
SA	0.9800
PSO	0.9803
TSA	0.9815

### 5. CONCLUSIONS

In this study, a three-phase 100 kVA dry-type transformer was modeled and optimized to obtain maximum efficiency. Then the electromagnetic analyses are performed by using the ANSYS/Maxwell program. Moreover, the metaheuristic algorithms depending on the core coefficients ( $C$  and  $s$ ) are used to obtain the highest transformer efficiency; the transformer is optimized by the SA, PSO, and TSA methods. The TSA is both the quickest and the best in finding the maximum efficiency among these three algorithms. The maximum efficiency of the transformer is obtained as  $\eta = 0.98439$  at  $C = 9.0196$  and  $s = 2.501$  parameter values. After optimization, the transformer design parameters are re-calculated using these optimized numbers. Maxwell analysis was performed, and optimization efficiency results and analysis results were compared to each other. The relative differences of these two efficiency results are approximately 0.38%, 0.29%, and 0.1% for PSO, TSA, and SA, respectively. In conclusion, we have reached

our goal of creating a guide for transformer manufacturers and designers on optimizing the design parameters for maximum efficiency in dry-type transformers.

## REFERENCES

- Aksu, İ. Ö. and Demirdelen, T., 2018, "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), pp. 1743–1752. doi: 10.1080/15567036.2018.1486908.
- Alyozbaky, O. S., Ab Kadir, M. Z. A., Izadi, M., Gomes, C., Azis, N. B., & Isa, M. B. M. , 2019, "New Optimization Technique to Design the Core of Three-Phase Transformer", *2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering, ICECCPCE 2019*, pp. 13–18. doi: 10.1109/ICECCPCE46549.2019.203740.
- Azizian, D., Bigdeli, M. and Faiz, J., 2016, "Design Optimization of Cast-Resin Transformer Using Nature-Inspired Algorithms", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(9), pp. 3491–3500. doi: 10.1007/s13369-016-2066-x.
- Basak, R., 2017, "Design of Single Phase Transformer Through Different Optimization Techniques", *International Journal of Information and Communication Sciences*, 2(3), p. 30. doi: 10.11648/j.ijics.20170203.11.
- Bendaoud, R., Amiry, H., Benhmida, M., Zohal, B., Yadir, S., Bounouar, S., ... & El Aydi, M., 2019, "New method for extracting physical parameters of PV generators combining an implemented genetic algorithm and the simulated annealing algorithm", *Solar Energy*, 194, pp. 239–247. doi: 10.1016/j.solener.2019.10.040.
- Celtek, S. A., Durdu, A. and Ali, M. E. M., 2020, "Real-time traffic signal control with swarm optimization methods", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 166. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108206.
- Cheema, M. A. M., Fletcher, J. E. and Dorrell, D., 2013, "A practical approach for the global optimization of electromagnetic design of 3-phase core-type distribution transformer allowing for capitalization of losses", *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), pp. 2117–2120. doi: 10.1109/TMAG.2013.2242049.
- Çelebi, M., 2008, "Genetik Algoritma ile Kuru bir Trafonun Maliyet Optimizasyonu. " *ELECO, Bursa, Turkey*, 26-30.
- Demirdelen, T., 2018, "A Heuristic Approach for Volume Calculation of Oil-Type Power Transformers : Firefly Algorithm", 7(4), pp. 41–46.
- Demirdelen, T., 2019, "Optimal design and experimental validation long-lasting, low loss transformer for low power renewable energy system", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 41(20), pp. 2534–2548. doi: 10.1080/15567036.2019.1637973.
- Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995, "New optimizer using particle swarm theory", in *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39–43. doi: 10.1109/mhs.1995.494215.
- Esenboga, B. and Demirdelen, T., 2020, "Efficiency and Cost Based Multi-optimization and Thermal/Electromagnetic Analyses of 3-Phase Dry-Type Transformer", *IETE Journal of Research*. doi: 10.1080/03772063.2020.1732841.
- Gaikwad, S., 2018, "Optimal Placement and Sizing of Distribution Transformers of Existing Network using Genetic Algorithm and Simulated Annealing", *Asian Journal for Convergence in Technology (Ajct)-Ugc Listed*, 4(1). Available at: [www.asianssr.org](http://www.asianssr.org).
- Holzschuh, B., Lahner, Z. and Cremers, D., 2020, "Simulated Annealing for 3D Shape Correspondence", *Proceedings - 2020 International Conference on 3D Vision, 3DV 2020*, pp. 252–260. doi: 10.1109/3DV50981.2020.00035.
- Kiran, M. S., 2015, "TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization", *Expert Systems with Applications*, 42(19), pp. 6686–6698. doi: 10.1016/j.eswa.2015.04.055.



- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P., 1983, "Optimization by simulated annealing", *Science*, 220(4598), pp. 671–680. doi: 10.1126/science.220.4598.671.
- Latchoumi, T. P., Balamurugan, K., Dinesh, K., & Ezhilarasi, T. P., 2019, "Particle Swarm Optimization approach for waterjet cavitation peening", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 141, pp. 184–189. doi: 10.1016/j.measurement.2019.04.040.
- Orosz, T., Borbély, B. and Tamus, Z. Á., 2017, "Performance comparison of multi design method and meta-heuristic methods for optimal preliminary design of core-form power transformers", *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science*, 61(1), pp. 69–76. doi: 10.3311/PPee.10207.
- Orosz, T., Pánek, D. and Karban, P., 2020, "FEM based preliminary design optimization in case of large power transformers", *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4). doi: 10.3390/app10041361.
- Patil, R. and Kushare, B. E., 2016, "Design and optimization of inter-coil insulation system of a Cast resin transformer using FEM", in *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, pp. 2887–2890. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755225.
- Rodríguez, S., Sánchez, N., & Gómez, D., 2019, "Optimization of geometric parameters of power transformer using bee's algorithm", *Annals of Electrical and Electronic Engineering*, 2(7), pp. 7–10. doi: 10.21833/aeee.2019.07.002.
- Smolka, J. and Nowak, A. J., 2011, "Shape optimization of coils and cooling ducts in dry-type transformers using computational fluid dynamics and genetic algorithm", *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(6 PART 2), pp. 1726–1731. doi: 10.1109/TMAG.2011.2109731.
- Soldooy, A., Esmaeli, A., Akbari, H., & Mazloom, S. Z., 2018, "Implementation of tree pruning method for power transformer design optimization", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, (May), pp. 1–19. doi: 10.1002/etep.2659.
- Tosun, S., Öztürk A., Demir H., Kuru L., 2012, Kuru Tip Transformatörün Tabu Arama Algoritması Yöntemi İle Ağırlık Optimizasyonu, *Journal of Advanced Technology Sciences*.
- Wang, T., Liu, J., Wang, Y., & Hui, L., 2020, "Optimization of Structural Parameters for a New-Type Magnetic Integration Structure CRT Considering Loss and Cost", *IEEE Access*, 8, pp. 68525–68532. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984545.
- Zhang, M., Wang, N. and Ding, X., 2013, "Improved artificial fish swarm algorithm for fault diagnosis of dry-type transformer", in *Proceedings - 2013 4th International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2013*, pp. 679–683. doi: 10.1109/ICDMA.2013.161.



## INVESTIGATION OF THE CHEMICAL CHARACTERISTICS AND OXIDATIVE STABILITY OF SOME COMMERCIAL COLD-PRESSED OILS

<sup>1</sup>Hamide Filiz AYYILDIZ , <sup>2</sup>Mustafa TOPKAFA , <sup>3</sup>Syed Tufail Hussain SHERAZI ,  
<sup>3</sup>Sarfraz Ahmed MAHESAR , <sup>4</sup>Huseyin KARA 

<sup>1</sup> Department of Basic Pharmaceutical Sciences, Faculty of Pharmacy, Selcuk University, Konya, TURKEY

<sup>2</sup> Vocational School of Technical Sciences, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, Konya Technical University, Konya, TURKEY

<sup>3</sup> National Centre of Excellence in Analytical Chemistry, University of Sindh, Jamshoro, PAKISTAN

<sup>4</sup> Faculty of Science, Department of Chemistry, Selcuk University, Konya, TURKEY

<sup>1</sup> hfayyildiz@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup> mtopkafa@ktun.edu.tr, <sup>3</sup> tufail.sherazi@yahoo.com, <sup>3</sup> sarfraz.mahesar@usindh.edu.pk,  
<sup>4</sup> hkara@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 14.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.09.2021)

**ABSTRACT:** In this study, the chemical composition and oxidative stability of cold-pressed flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed oils were examined. The results showed that the seed oils contained appreciable amounts of unsaturated fatty acids (above 79 %). Polyunsaturated fatty acids, particularly linoleic acids were dominant, with values ranging from 53.24 % - 71.37 % of the total amount of fatty acids except for pumpkin seed oil. Tocols content was found to be between ~ 490-932 mg kg<sup>-1</sup>, and the flaxseed oil exhibited the highest levels of total tocopherols (977.47 mg kg<sup>-1</sup>) under the experimental conditions. While, the highest PV was found in walnut seed oil (2.81 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>), and the highest content of FFAs was reported for flaxseed oil (1.82 %). OSI values were 4.15, 3.57, 4.31, 3.98 and 4.92 h for the flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed oils, respectively. The obtained data suggest that the seed oils in this study may serve as special dietary sources.

**Key Words:** Cold pressed seed oils, Fatty acid composition, Tocol profile, Oxidative stability, Rancimat

### Bazı Ticari Soğuk Pres Yağların Kimyasal Özelliklerinin ve Oksidatif Kararlılığının İncelenmesi

**ÖZ:** Bu çalışmada, soğuk pres keten tohumu, çörek otu, kabak çekirdeği, ceviz ve haşhaş tohumu yağlarının kimyasal bileşimi ve oksidatif stabilitesi incelenmiştir. Sonuçlar, çekirdek yağlarının kayda değer miktarlarda doymamış yağ asitlerini içerdiğini (% 79'un üzerinde), bunlar arasında ise çoklu doymamış yağ asitlerinin, özellikle de linoleik asitlerin, kabak çekirdeği yağı hariç diğer yağlardaki toplam yağ asidi miktarının % 53.24 ile % 71.37'si arasındaki değerlerde baskın olduğunu göstermiştir. Yağların tokol içeriği ~ 490-932 mg kg<sup>-1</sup> arasında bulunmuş ve deney koşullarındaki en yüksek toplam tokoferol düzeyi (977.47 mg kg<sup>-1</sup>) keten tohumu yağında tespit edilmiştir. En yüksek PV değeri ceviz yağında rapor edilmiş (2.81 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>), en yüksek FFA içeriği ise keten tohumu yağında (%1.82) bulunmuştur. OSI değerleri; keten tohumu, çörek otu, kabak çekirdeği, ceviz ve haşhaş tohumu yağları için sırasıyla 4.15, 3.57, 4.31, 3.98 ve 4.92 saat olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler, bu çalışmadaki tohum yağlarının özel diyet kaynakları olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk pres tohum yağları, Yağ asit kompozisyonu, Tokol profili, Oksidatif stabilite, Ransimat

## 1. INTRODUCTION

Crude edible oils contain many components like glycerides (mono, di, and tri), free fatty acids (FFAs), colour pigments, phosphatides, sterols, tocotrienols, tocopherols, hydrocarbons, some trace metals, etc. (Lacoste, 2014). Based on the nutritional point of view, most of these components are very important. But due to their sensory, odour, taste, and volatility issues, some of these constituents are supposed to be impurities found in the edible oils (Čmolík and Pokorný, 2000). A process through which these impurities are removed from crude oils is called "refinery". Oils need to be refined to obtain an odourless liquid with enhanced oxidative stability and a bland taste (Medina-Juárez and Gámez-Meza, 2011). Degumming, neutralization, bleaching, winterization, and deodorization are the key stages in the oil refining process (Pal *et al.*, 2015). But unfortunately, each processing stage leads to a decrease in bioactive components such as sterols, phenols, tocopherols, tocotrienols, aromas, etc. The amount of each bioactive material lost during refining is determined by the input oil's composition, processing parameters, and efficiency (Naz *et al.*, 2011).

In the last few years, oils produced by mechanical extraction (cold-pressed) without any solvents have been made available to consumers. (Cakaloglu *et al.*, 2018; Yusuf, 2018; Ramadan, 2020). This oil is obtained from different nutty fruits or oilseeds. Consumers appreciate the unique and characteristic taste, the specific aroma, and the intensive color (Cakaloglu *et al.*, 2018) and prefer to use it for cold dishes or salads (Vujasinovic *et al.*, 2010). Generally, compared to refined oils, cold-pressed oils have more nutritional value. They include more natural beneficial ingredients such as tocopherols, sterols, phospholipids, and carotenoids, partially removed at the end of oil refining (Pachauu *et al.*, 2019). Many different data confirm the chemical quality and good sensory properties of cold-pressed oils. (Celenk *et al.*, 2018).

Due to the wide range of edible oil applications, proper knowledge about their composition and quality parameters is vital (Febrianto and Yang, 2011). The fatty acid composition (FAC) of vegetable oils differ from each other according to the length of carbon chains and the number of double bonds (Wardana *et al.*, 2018). In the diet, vegetable oils play a crucial role and contribute to the supply of energy. Vegetable oils are the primary sources of essential fatty acids such as linoleic (C18:2) and  $\alpha$ -linolenic acid (C18:3), which is a pioneer and precursor omega-6 and omega-3 family (Frančáková *et al.*, 2015), believed to be necessary for the proper functioning of the human body, as well as development and physiological activities (Ying *et al.*, 2018). The total amount of these fatty acids is attributed to many diseases such as high blood cholesterol, obesity, coronary heart disease, and cancer (Ferguson *et al.*, 2016; Froyen and Burns-Whitmore, 2020).

In vegetable oils, antioxidants (tocopherols and tocotrienols) are present naturally. Their primary function is to keep the stability of oil by preventing free radicals (Yamauchi, 1997). Naturally occurring compounds with vitamin E activity consist of  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ - tocopherols and tocotrienols. All members of Vitamin E have a positive role in the health of consumers (Žilić *et al.*, 2010; Prescha *et al.*, 2014). Oxidative stability is directly linked to the duration of the oil's shelf life and is influenced by several reasons (Grajzer *et al.*, 2020). FAC, antioxidant content, FFA, peroxides, processing conditions, heat, light, and oxygen concentration are some of these factors (Choe and Min, 2006; Budilarto and Kamal-Eldin, 2015). Chemical analyses generally evaluate the oxidative stabilities of oils include the determination of oxidation stability index (OSI), iodine value (IV), peroxide value (PV) and FFA. The rancimat system measures a heated sample's conductivity at elevated temperature, by which streams of air are transferred, and it can be used to assess the antioxidant effects of tocols (Ayyildiz *et al.*, 2015).

FFA is the most critical quality indicator and measured as % FFA in the oil (Ayyildiz *et al.*, 2011). PV is the number of mill equivalents of oxygen which represents the concentration of peroxide present in the 1 kg of oil and shows the level of oxidation. The IV is the amount of iodine in grams retained by 100 g of oil, and it is a parameter that signifies the oil's degree of unsaturation of the oil. A lower IV indicates the presence of a less quantity of double bonds and more saturated FAs (Kyriakidis and Katsiloulis, 2000).

The main objective of the present study were (i) to evaluate the FAC of the mechanically cold-pressed flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed oils produced in Turkey and (ii) to determine and compare the OSI of CPSOs.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Chemicals, solvents, and samples

All the solvents and chemicals used in the present study were of the analytical and chromatographic grade obtained from BDH (Poole, UK) and Merck (Darmstadt, Germany). The standards of the tocopherols, tocotrienols and fatty acid methyl esters (FAMES), which was the mixture of 37 components were purchased from Supelco (Bellefonte, PA, USA).

Cold-pressed seed oils (flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed) were purchased from local markets in Konya (Turkey). The oil samples were kept in brown glass bottles and stored at 4 °C to protect against any oxidation until analysis.

### 2.2. Preparation of fatty acid methyl esters (FAME)

For the preparation of FAME of the cold press oils, the method previously recommended by EU regulation 2568/91 was used (Commission, 1991). For this, approximately weighed 100 mg of each cold-pressed oil sample into a screw-capped glass tube, and 10.0 mL hexane was added. After the addition of 100 µL of 2N ethanolic KOH solution, the mixture was vigorously shaken for 30 s. Then it was centrifuged at 2500 rpm for 5 min. The supernatant obtained from the process was transferred to vials through filtration using 0.45 µm pore size filter paper and stored at 0 °C in the refrigerator until analysis.

#### 2.2.1. Analysis of FAME by GC-FID

For the study of FAMES, an Agilent 6890N gas chromatography system attached with a flame ionization detector (FID) (Agilent Technologies Inc., Wilmington, DE, USA) was used. The samples (1 µL) were injected through an auto-sampler (an Agilent 7683 series) in a split-split injection mode at a ratio of 100: 1. Helium and hydrogen gases were used as and makeup and a mobile phase, respectively. For the separation of FAMES, HP-88 cyanopropyl capillary column (highly polar) with 100 m×0.25 mm×0.2 µm in size was used. The temperature of the injection and detector was kept at 250 °C. The oven temperature started from 45 °C with 4 min stay time, then it was increased to 175 °C at the rate of 13 °C min<sup>-1</sup> and 27 min was kept the stay time. Then the temperature was raised to 215 °C at the rate of 4 °C min<sup>-1</sup>. Hold time was 35 min at the final temperature. The H<sub>2</sub> and an air flow rate of 30 and 300 mL min<sup>-1</sup> were used as detector gases, respectively. 1200 Series-B.03.02 Agilent software program was used to record the chromatograms of the FAMES. Individual identification of FAs was performed by comparing the FAME mix's retention times on the HP-88 column under the same conditions and reported as the FA percentage.

### 2.3. Analysis of tocopherols & tocotrienols by NP-HPLC

Analysis of tocopherols & tocotrienols was carried out by normal phase HPLC system comprising the following components; a G1311A model quaternary pump, a G1379A model degasser, a 7725i model Rheodyne manual injector system (2 µL loop), a G1321B model fluorescence detector (FLD) and a G1316A model thermostatted column compartment. B.03.02-2008 Chemstation data processor (Wilmington, DE, USA) was used to record the data.

For the determination of tocopherol and tocotrienols, 1 g oil samples were dissolved in 10 mL hexane and 2 µL was injected directly into HPLC through a guard column (7.5 cm×0.4 cm×5 µm in size) coupled to a LiChrospher 100 Diol column, 25 cm×0.4 cm×5 µm in size (Teknokroma, Barcelona, Spain) as reported in the literature (Kramer *et al.*, 1997). Analysis was carried by an isocratic elution mode at 25 °C. A mixture of hexane and 2-propanol (99.4: 0.6, v/v) was used as the mobile phase. The flow rate was kept at 1.5 mL min<sup>-1</sup>. The peaks obtained were detected using an FLD detector kept constant at 25 °C, with excitation and emission wavelengths set to 295 nm and 320 nm.

The tocopherol species' identity was determined by comparing the retention times of the peaks obtained with known tocopherol standards. All standard solutions were freshly prepared and stored in the dark at 0 °C until analysis. In the quantitative determination of tocol homologs, calibration graphs created by taking into account the peak areas of the mixed tocopherol and tocotrienol standards were used.

#### **2.4. Determination of oxidative stability index (OSI) by Rancimat**

For the determination of OSI, 743 Rancimat systems (Methrom AG, Herisau, Switzerland) according to the AOCS Cd 12b-92 method (AOCS, 1998c) was used. Briefly, 3.0 g of the oil sample was weighed in the reaction vessel. Then placed in the heating block at 120 °C temperature and exposed with 20 L h<sup>-1</sup> airflow. During the process, produced volatile compounds were collected in a bottle containing 50 mL of distilled water. Then conductivity of the solution was recorded. The induction period was found out as a variation point in the graph drawn by taking into account the conductivity value of water ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) varying against time (h). All analyses were carried out in triplicate, and the results are reported as the average of the obtained values.

#### **2.5. Determination of free fatty acid (FFA) analyses**

The FFA values of oil samples were evaluated as per AOCS Ca 5a-40 method (AOCS, 1998b). Sodium hydroxide solution (0.1000 N) was utilized as a titrant, while potassium acid phthalate was used in setting the titrant solution as the primary standard substance and phenolphthalein solution (1% PHP) as an indicator in titration. Triplicate analyses were performed for each oil sample.

#### **2.6. Determination of peroxide value (PV)**

The standard AOCS Cd 8b-90 method (AOCS, 1996) was used for the determination of PV of the oil samples. For this purpose, a 10 g oil sample was dissolved in 25 mL of a chloroform / acetic acid mixture (2:3, v/v). After adding 1 mL of potassium iodide solution, it was left in the dark for exactly 3 min for the reaction to occur. Then, 20 mL of distilled water and 1 mL of indicator (1% starch) were added to the solution, and the liberated iodine was titrated with 0.002 N sodium thiosulfate solution. Results achieved through triplicate determinations are given as meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> oil.

#### **2.7. Determination of iodine value (IV)**

The standard AOCS Cd 1-25 method (AOCS, 1998a) was used to determine the IV of the oil samples. As per procedure, a 10 g of oil sample was added to 10 mL of carbon tetrachloride containing 1 mL of Wijs solution (ICl dissolved in glacial acetic acid) and left in the dark for 1 hour for the reaction to occur. After that, saturated potassium iodide (15 mL) and water (100 mL) were added. The iodine released was titrated against sodium thiosulfate solution (0.002 N). Obtained results at the end of triplicate determinations are expressed as the gram iodine number per 100 grams of oil (g I<sub>2</sub> 100 g<sup>-1</sup> oil).

#### **2.8. Analysis of data**

The data obtained from the analyses performed in triplicate (n= 3) are given as mean  $\pm$  SD (standard deviation). For the determination of the differences between the averages, least significant difference tests and analysis of variance were applied. Statistical significance value was taken into account as P <0.05.

### **3. RESULTS AND DISCUSSION**

In this paper, cold-pressed flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed oils were examined for their FFA, PV, IV, FAC, tocols profile, and OSI.

### 3.1. Fatty acid composition (FAC)

The FAC identifies the stability, nutritional values, and physical properties of edible oils. The FAs in naturally sourced glycerol molecules are composed of different percentages of saturated (SFA), monounsaturated (MUFA), and polyunsaturated (PUFA) fatty acids, and the distribution of these fatty acids differ according to the origin of the oilseeds and fruits and climate cultivation (Kris-Etherton *et al.*, 2000). The vegetable oils have diverse sensitivities to oxidative degradation because of the variations in the degree of unsaturation of their FAs. The previous studies reported that the saturated oils are oxidized less quickly than unsaturated oils; the relative auto-oxidation rate of PUFAs, oleic (18:1  $\Delta^9$ c), linoleic (18:2  $\Delta^9$ c, 12c), and linolenic acids (18:3  $\Delta^9$ c, 12c, 15c), are 1:40 to 50:100 on the basis of oxygen uptake, and 1:12:25 on the basis of peroxide formation. Thus, the distribution of FAs in vegetable oils is very important for consumers in terms of diet and health (Orsavova *et al.*, 2015; Özbek *et al.*, 2020). Health professionals recommend diets with low energy, low cholesterol, low SFA, and a good n6/n3 ratio to decrease heart disease and others (Briggs *et al.*, 2017).

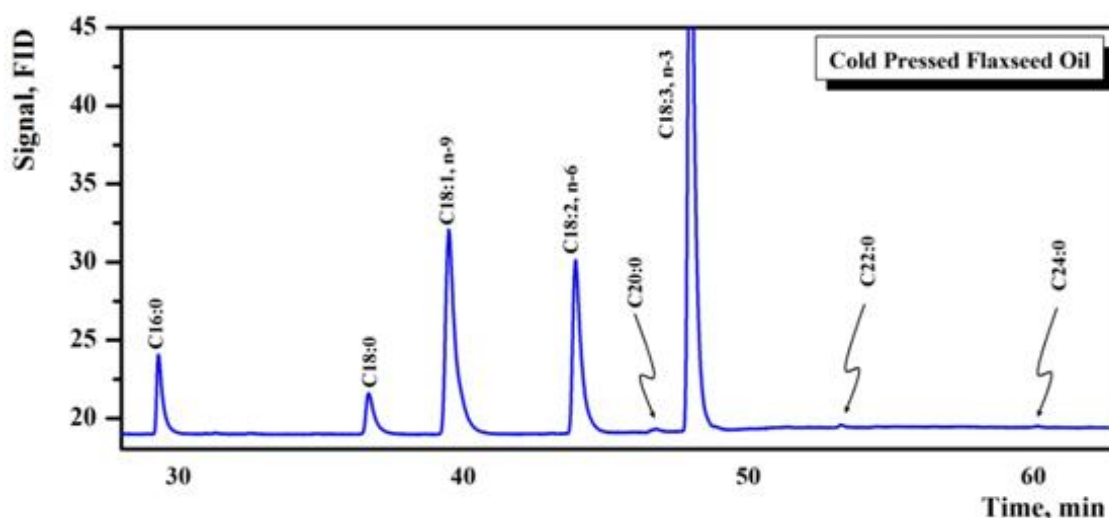
The FAC of examined cold-pressed seed oils is summarized in **Table 1**. Also, the GC-FID chromatogram of FAME isomers for cold-pressed flaxseed oil is shown in **Fig. 1**.

**Table 1.** Fatty acid composition (FAC) of tested cold-pressed seed oils (%)

<i>Fatty Acids</i>	<i>Flaxseed</i>	<i>Black seed</i>	<i>Pumpkin seed</i>	<i>Walnut seed</i>	<i>Poppy seed</i>
14:0	nd	0.31 ± 0.04	0.09 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.05 ± 0.01
16:0	5.40 ± 0.62	12.24 ± 1.02	11.98 ± 0.65	7.04 ± 0.56	9.16 ± 0.56
16:1 <i>trans</i>	nd	nd	0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.01	nd
16:1	0.07 ± 0.02	0.22 ± 0.06	0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.03	0.13 ± 0.01
17:0	0.04 ± 0.01	0.12 ± 0.06	0.07 ± 0.02	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.01
17:1	nd	nd	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02	0.04 ± 0.02
18:0	3.74 ± 0.05	3.53 ± 0.07	5.27 ± 0.12	2.77 ± 0.09	2.40 ± 0.05
18:1 <i>trans</i>	nd	nd	nd	0.02 ± 0.01	nd
18:1 ( $\omega$ 9)	23.15 ± 0.42	24.90 ± 0.36	27.58 ± 0.48	17.64 ± 0.34	15.50 ±
18:2 <i>trans</i>	nd	nd	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.02
18:2 ( $\omega$ 6)	16.75 ± 0.46	54.80 ± 0.62	53.24 ± 0.35	59.69 ± 0.78	71.37 ±
18:3 <i>trans</i>	nd	nd	0.37 ± 0.04	0.08 ± 0.03	0.14 ± 0.07
20:0	0.36 ± 0.10	0.24 ± 0.05	nd	0.07 ± 0.03	nd
18:3 ( $\omega$ 3)	50.14 ± 0.71	0.29 ± 0.07	0.39 ± 0.08	12.22 ± 0.53	0.56 ± 0.10
20:1	nd	0.25 ± 0.08	0.15 ± 0.05	nd	0.12 ± 0.05
20:2	nd	nd	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
21:0	nd	nd	nd	0.01 ±	nd
22:0	0.24 ± 0.09	0.41 ± 0.07	0.11 ± 0.03	0.03 ± 0.01	0.09 ± 0.02
22:1	nd	nd	nd	0.01 0.01	nd
23:0	nd	nd	0.05 ± 0.01	0.01 ± 0.01	nd
24:0	0.13 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.09 ± 0.02	0.01 ± 0.01	nd
$\Sigma$ SFAs	9.14 ± 0.22	15.77 ± 0.23	17.7 ± 0.51	10.01 ± 0.20	11.72 ±
$\Sigma$ MUFAs	23.14 ± 0.34	24.90 ± 0.30	27.92 ± 0.36	17.81 ± 0.24	15.75 ±
$\Sigma$ PUFAs	66.89 ± 0.51	54.80 ± 0.72	54.02 ± 0.49	72.02 ± 0.73	72.01 ±
<i>Trans fatty acids</i>	nd	nd	0.04 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.04 ± 0.02

Data are reported as mean ± SD of three replicate analyses (n= 3)

nd; not detected, PUFA; polyunsaturated fatty acids, MUFA; mono unsaturated fatty acids, SFA; Saturated fatty acids.



**Figure 1.** The GC-FID chromatogram for FAME isomers of tested cold-pressed flaxseed oil

**Table 1** showed that cold-pressed flaxseed, black seed, pumpkin seed, walnut seed, and poppy seed oils are excellent natural sources of essential PUFAs which may act as mediators for the immune and nervous systems by regulating and altering the gene expression, membrane structure, and influencing prostaglandin (Yehuda *et al.*, 2001). Two of the PUFAs types, n-6 and n-3, have more importance than the others. Rather than taking these PUFAs individually, their ratio is important. Namely, the n-6 / n-3 ratio in the diet regulates gene expression, affects neurological controls, and regulates immune function. (Vidrih *et al.*, 2010). The high n-6 / n-3 ratio in dietary fat is believed perilous (Griffin, 2008; Husted and Bouzinova, 2016). The majority of today's diet is made up of n-6 fatty acids, where n-3 fatty acids are almost absent or very little. The studies about the dietary intake show that the n-6 / n-3 ratio in today's diets is around 14:1 to 20:1. Most studies show that the n-6 / n-3 ratio must be among 4: 1 and 10: 1 to reach good health benefits (Wijendran and Hayes, 2004). Cold-pressed edible oils had about 54.02 % to 72.02 % total polyunsaturated fatty acids ( $\Sigma$ PUFAs). Besides, cold-pressed walnut seed oil had the maximum level of PUFAs (72.02 %) and an excellent n-6/n-3 ratio (4.9) because of a high percentage of linolenic acid (18:3 n3). The cold-pressed flaxseed oil with 66.89 % PUFAs content followed the cold-pressed walnut seed oil. The FAC of these oils was in the range of that previously reported in cold-pressed walnut seed and flaxseed oil (Khattab and Zeitoun, 2013; Grajzer *et al.*, 2020).

As shown in **Table 1.**, the cold-pressed oils are also rich in MUFAs and contain low content of total SFAs. A diet rich in MUFA is vital for lowering blood cholesterol levels and modulating immune function (Yaqoob, 1998). Oleic acid (18:1 n9) was the major source of MUFAs for both cold-pressed. SFA contents in analyzed cold-pressed seed oils showed slight differences between 9.14 -17.70 % of total FAs. The major SFA was a palmitic acid (16:0), followed by stearic acid (18:0). Other minor SFAs were also detected, such as 14:0, 20:0, 22:0, and 24:0. Amongst the tested oils, pumpkin cold-pressed seed oil showed maximum SFAs content (17.70 %). These results are comparable to those reported previously, with only a few variations (Vujasinovic *et al.*, 2012; Grajzer *et al.*, 2020).

The total TFAs isomers comprised of the C16:1, C18:1, C18:2, and C18:3 FAs. Even though TFAs are found in cold press vegetable oils, their quantities were extremely low (less than 0.1 % of the total FAs). Trans C18:3 acid was predominant in cold-pressed oils, whereas no TFAs were detected in flaxseed and black seed oils.

### 3.2. Tocopherols (-T) and tocotrienols (-TT) profile

The tocols known as naturally occurring compounds in oils indicate the oil quality, stability, origin, or nutritional values. They may also provide additional consumer health advantages in disease prevention due to their anti-oxidative and vitamin E activity (Delgado *et al.*, 2020). Moreover, these compounds are

used as lipid stabilizers in several food industries. In theory,  $\alpha$ -tocopherol has the most prominent biological activity among all homologs. However, the other tocopherol forms also have high vitamin E activity and antioxidants properties (Traber and Atkinson, 2007; Uluata and Özdemir, 2012).

During the quantitative determination of tocopherol and tocotrienols, which were performed with very little modification of the procedures in the literature, different calibration graphs were created for each cold-pressed oil, taking into account the levels of tocols. Parameter values used for the validation of the method applied; The calibration range ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), regression coefficient ( $R^2$ ), LOD ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), LOQ ( $\text{mg kg}^{-1}$ ), precision (CV%), and recovery (%) are presented in **Table 2**. Exceptional regression coefficient  $R^2$  ( $\geq 0.9935$ ) was observed with excellent LOD ( $\leq 0.76$ ) and LOQ ( $\leq 2.53$ ) for both tocopherol and tocotrienols.

**Table 3** shows the individual attitudes of the  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$  and  $\delta$  homologues in the content of the cold-pressed seed oils studied. All tocols forms were effectively separated by a diol column on the NP-HPLC system using an FLD, taking into account the separation of  $\beta$ -T and  $\gamma$ -T types, complicated to distinguish. (**Fig. 2**).

As can be noticed in **Table 3**, the content of total tocols ranges from 490.24-977.47  $\text{mg kg}^{-1}$  oil for all tested seed oils., The flaxseed oil, among the cold-pressed seed oils was the richest in tocols content, 977.47  $\text{mg kg}^{-1}$  oil containing  $\alpha$ -T (16.19  $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $\beta$ -T (222.88  $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $\gamma$ -T (721.25  $\text{mg kg}^{-1}$ ) and  $\delta$ -T (17.14  $\text{mg kg}^{-1}$ ). In contrast, the black seed oil draws attention with tocotrienol profile as a major tocol homologs containing  $\alpha$ -TT (100.78  $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $\beta$ -TT (295.84  $\text{mg kg}^{-1}$ ), and  $\gamma$ -TT (13.71  $\text{mg kg}^{-1}$ ). Walnut seed and pumpkin seed oils also contained an appreciably greater quantity of  $\gamma$ -TT as 18.71 and 17.20  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectively, predominant over other tocotrienol homologs. The obtained values of tocols differ from the reported values (Grajzer *et al.*, 2020). It may be due to the difference in the variety of oilseeds, environmental conditions, and origin (Szydłowska-Czerniak *et al.*, 2008; Neđeral *et al.*, 2012).

**Table 2.** Validation parameters for identification of tocols in cold-pressed seed oils studied

Parameters	$\alpha$ -T tr= 7.50±0.2 min	$\beta$ -T tr= 16.46±0.2 min	$\gamma$ -T tr= 17.26±0.2 min	$\delta$ -T tr= 27.48±0.2 min	$\alpha$ -TT tr= 12.68±0.2 min	$\beta$ -TT tr= 19.91±0.2 min	$\gamma$ -TT tr= 25.88±0.2 min
<b>Standard linearity</b>							
Range ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	0-100	0-1000	0-1000	0-50	0-100	0-500	0-250
$R^2$	0.9985	0.9976	0.9984	0.9993	0.9959	0.9938	0.9993
Precision (CV %), n= 3	2.0	3.4	2.9	4.5	2.6	3.1	1.2
<b>Accuracy</b>							
Mean Recovery (%)	98.2	99.6	97.9	101.0	99.8	99.9	101.2
<b>Sensitivity</b>							
LOD ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	0.60	0.5	0.22	0.76	0.21	0.16	0.40
LOQ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	2.00	1.7	0.73	2.53	0.71	0.53	1.35

CV: Coefficient of variation; LOD: Limit of Detection; LOQ: Limit of Quantification



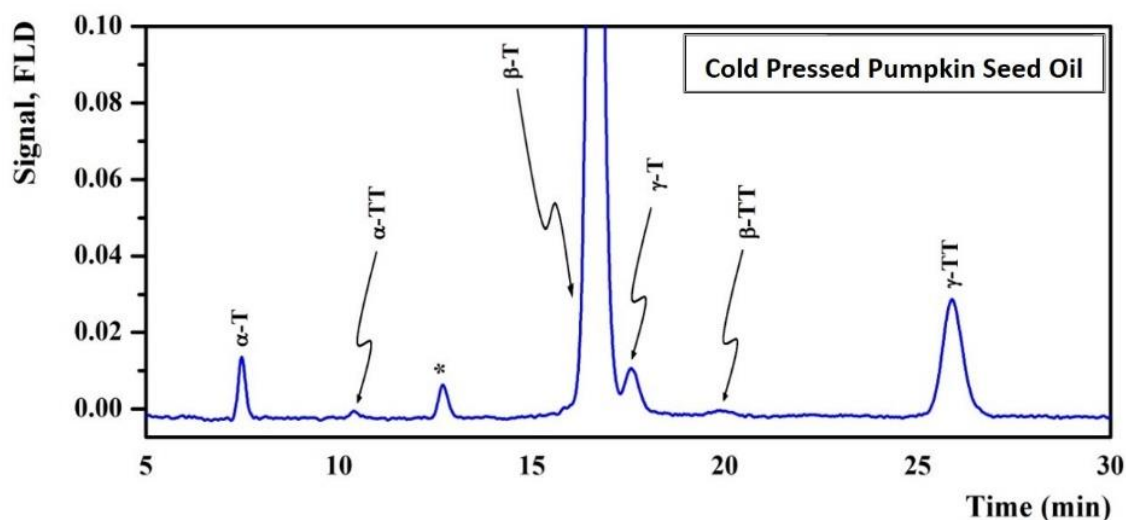
**Table 3.** Tocopherols and tocotrienols (tocols) profile of analyzed cold-pressed seed oils (mg kg<sup>-1</sup>)

Cold pressed oils	Tocopherol and tocotrienol (tocol) composition data. mean $\pm$ SD (mg kg <sup>-1</sup> )							Total Tocol
	$\alpha$ -T	$\beta$ -T	$\gamma$ -T	$\delta$ -T	$\alpha$ -TT	$\beta$ -TT	$\gamma$ -TT	
Pumpkin seed	9.83 $\pm$ 2.29	744.73 $\pm$ 3.32	88.90 $\pm$ 1.90	nd	nd	nd	17.20 $\pm$ 1.21	860.64 $\pm$ 1.71
Walnut seed	21.52 $\pm$ 4.39	nd	718.16 $\pm$ 6.81	39.46 $\pm$ 3.85	5.65 $\pm$ 0.25	nd	18.71 $\pm$ 2.00	803.50 $\pm$ 2.05
Flaxseed	16.19 $\pm$ 4.34	222.88 $\pm$ 1.38	721.25 $\pm$ 7.65	17.14 $\pm$ 0.72	nd	nd	nd	977.47 $\pm$ 5.07
Black seed	12.6 $\pm$ 0.67	28.45 $\pm$ 2.05	38.86 $\pm$ 2.85	nd	100.78 $\pm$ 0.38	295.84 $\pm$ 1.47	13.71 $\pm$ 3.76	490.24 $\pm$ 1.02
Poppy seed	87.18 $\pm$ 3.26	9.18 $\pm$ 1.00	819.23 $\pm$ 7.80	16.23 $\pm$ 3.23	nd	nq	nd	931.82 $\pm$ 7.50

Values are reported as means  $\pm$  SD of three replicate analyses (n= 3)

T; Tocopherol. TT; Tocotrienol

nd; not detected



**Figure 2.** HPLC-FLD chromatogram of tocopherol/tocotrienol isomers for tested cold-pressed pumpkin seed oil

The  $\alpha$ -T content ranged between 9.83-87.18 mg kg<sup>-1</sup> among all tested oils, as shown in **Table 3**. Cold-pressed flaxseed and poppy seed oils exhibited a higher concentration of  $\gamma$ -T compounds (721.25 and 819.23 mg kg<sup>-1</sup>, respectively). On the other hand, the pumpkin seed contains the  $\beta$ -T homolog at the predominant level (744.73 mg kg<sup>-1</sup>). The obtained values of tocols differ from the reported values (Bozan and Temelli, 2008; Neđeral *et al.*, 2012). It may be due to the difference in the variety of oilseeds, environmental conditions, and origin

### 3.3. OSI, FFA, PV, and IV Analyses

In potential food applications, the oxidative stability of oils is an important quality parameter, expressed as the time required for oils to reach the critical oxidation point during processing and storage (Ayyildiz *et al.*, 2015). Many literature studies show that primary and secondary oxidation products are

taken into account in determining the stability of oils (Vidrih *et al.*, 2010). For the estimation of the oxidative stability of cold pressed oils in this study, OSI, FFA, PV, and IV analyses were carried out and the outcomes are presented in **Table 4**.

**Table 4.** OSI, FFA, PV and IV of analyzed cold-pressed seed oils

<i>Cold-pressed oils</i>	<i>OSI at 120 °C (h)</i>	<i>FFA (oleic acid, %)</i>	<i>PV (meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> oil)</i>	<i>IV (g I<sub>2</sub> 100 g<sup>-1</sup> oil)</i>
Pumpkin seed	4.31 ±0.23	0.71 ±0.08	1.83 ±0.09	118.14 ±0.27
Walnut seed	3.98 ±0.42	1.03 ±0.03	2.81 ±0.14	151.56 ±0.31
Flaxseed	4.15 ±0.37	1.82 ±0.07	2.76 ±0.21	182.34 ±0.24
Black seed	3.57 ±0.28	1.60 ±0.04	2.59 ±0.17	118.97 ±0.45
Poppy seed	4.92 ±0.39	1.40 ±0.07	2.43 ±0.08	139.12 ±0.29

Data are described as means ± SD of three replicate analyses (n= 3)

OSI; oxidative stability index, FFA; free fatty acid, PV; peroxide value, IV; iodine value

The OSI is defined as a measure of the resistance of lipid molecules to oxidation, indicating the stability of the oil. The Rancimat method is the most important method in which the resistance of oils against oxidation can be determined easily and precisely by determining the total volatile secondary products that occur by accelerating the oxidation of oils (Pawar *et al.*, 2014). During this oxidation process, the conductivity of water changes as the volatile compounds formed in the oil is absorbed in water, and a point called "induction time (IT)" or "induction period (IP)" is reached (Tarmizi *et al.*, 2016). **Table 4** shows the value of OSI ranged between 3.57- 4.92 h for all tested cold-pressed oils. Cold-pressed poppy seed oil has been found to have the highest oxidative stability among all seed oils tested, with an OSI of 4.92 h at 120°C. OSI of the oil depends mainly on its FAC and tocols profile, and the rancimat results of the present study are almost comparable with already reported values with slight variations (Bozan and Temelli, 2008; Gharby *et al.*, 2014).

FFA content, one of the important indicators of oil quality, occurs due to the hydrolysis of oils in the presence of heat and moisture (Satyarthi *et al.*, 2011). When the chain length of the FA in oils is less than 14 carbons, the formation of an unpleasant taste and odor in the oil is observed (Mattes, 2009). To eliminate or reduce FFA impurities, the oil required to be refined, and the neutralization implementation reduces FFAs to a level of 0.05%. The sodium hydroxide is used during the neutralization step in chemical refining, and the amount varies depending on the % FFA content in oils (Gunstone, 2011). For cold-pressed oils, any physical or chemical implementation is not applied to remove FFAs, and also, in the present study, greater levels of FFA are observed (**Table 4**). For all tested oils, the maximum FFA value was found to be 1.82 for flaxseed oil. As shown in **Table 4**, the FFA content varies from 0.70 to 1.82 % for all analyzed cold-pressed seed oils.

The values obtained for PV, another quality parameter, are given in **Table 4**. PV is used to describe the hydroperoxides responsible for the off-taste in oil and is defined as primary oxidation products and the degree of oxidation of the oil in the early stages (Choe and Min, 2006). For all studied oils, the highest PV value was observed to be 2.76 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> oil and is in accordance with the Codex Alimentarius (Codex Alimentarius, 2001).

The PV ranged from 1.83 to 2.76 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> oil for all tested cold-pressed seed oils. The IV, categorized as a structure index, is related to the double bonds (number) present in the oil sample. IV index allows the correlation of chemical and physical properties with FAC. As shown in **Table 4**, the IV ranged between 118.14 - 182.34 g I<sub>2</sub> 100 g<sup>-1</sup> oil for cold-pressed oils. The IV results obtained in the present study were found to be in good agreement with the FAC data available in the literature.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, the characteristics and stability of five cold-pressed seed oils were investigated. They were found to be of high quality due to their fatty acids, tocopherol distributions and oxidative stability indexes. It has been determined that all cold-pressed seed oils contain a high amount of PUFAs with known beneficial effects on health, and walnut oil has the highest PUFA content (72.02 %) among the oils studied. The seed oils are also rich in MUFAs and contain low content of total SFAs, and amongst the tested oils, pumpkin cold-pressed seed oil showed maximum SFAs content (17.70 %). The oils also have high levels of tocopherol content, a source of natural antioxidants that are important for health and nutrition. The flaxseed oil, among the seed oils, was the richest in tocopherols content, 977.47 mg kg<sup>-1</sup> oil containing  $\alpha$ -T (16.19 mg kg<sup>-1</sup>),  $\beta$ -T (222.88 mg kg<sup>-1</sup>),  $\gamma$ -T (721.25 mg kg<sup>-1</sup>) and  $\delta$ -T (17.14 mg kg<sup>-1</sup>). It was also observed that the cold-pressed oils analyzed contained OSI, FFA, PV and IV under the limits allowed in the regulations. In conclusion, it is thought that the data obtained in this study will contribute to the studies on the standardization of cold-pressed seed oils approved for consumption and, the use of these oils in industries such as cosmetics, pharmaceuticals and food is expected to increase, due to their superior properties.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank Selcuk University for the facilities provided. They also like to thank TUBITAK for providing financial support to one of our research collaborator Professor Dr. S.T.H. Sherazi under TUBITAK 2221 Fellowship for Visiting Scientists and Scientists on Sabbatical Leave program.

#### REFERENCES

- AOCS, 1996, "Method Cd 8b-90", *Official methods and recommended practices of the American Oil Chemist's Society*.
- AOCS, 1998a, "Method Cd 1-25: Iodine value of fats and oils. Wijs Method", *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*.
- AOCS, 1998b, "AOCS official method Ca 5a-40: Free fatty acids. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society".
- AOCS, 1998c, "Method Cd 12b-92", *Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society*.
- Ayyildiz, H. F., Kara, H., & Sherazi, S. T. H., 2011, "A novel approach for determination of free fatty acids in vegetable oils by a flow injection system with manual injection", *Lipids*, 46 (12), 1181-1190.
- Ayyildiz, H. F., Topkafa, M., Kara, H., & Sherazi, S. T. H., 2015, "Evaluation of fatty acid composition, tocopherols profile, and oxidative stability of some fully refined edible oils", *International Journal of Food Properties*, 18 (9), 2064-2076.
- Bozan, B. and Temelli, F., 2008, "Chemical composition and oxidative stability of flax, safflower and poppy seed and seed oils", *Bioresource Technology*, 99 (14), 6354-6359.
- Briggs, M. A., Petersen, K. S., & Kris-Etherton, P. M., 2017, Saturated fatty acids and cardiovascular disease: replacements for saturated fat to reduce cardiovascular risk, *Healthcare*, 29.
- Budilarto, E. S. and Kamal-Eldin, A., 2015, "The supramolecular chemistry of lipid oxidation and antioxidation in bulk oils", *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117 (8), 1095-1137.
- Cakaloglu, B., Ozyurt, V. H., & Otlles, S., 2018, "Cold press in oil extraction. A review", *Ukrainian food journal* (7, Issue 4), 640-654.
- Celenk, V. U., Gumus, Z. P., Argon, Z. U., Buyukhelvacigil, M., & Karasulu, E., 2018, "Analysis of chemical compositions of 15 different cold-pressed oils produced in Turkey: a case study of tocopherol and fatty acid analysis", *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 5 (1), 1-18.
- Choe, E. and Min, D. B., 2006, "Mechanisms and factors for edible oil oxidation", *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 5 (4), 169-186.

- Čmolík, J. and Pokorný, J., 2000, "Physical refining of edible oils", *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102 (7), 472-486.
- Codex Alimentarius, F., 2001, "WHO: Fats, oils and related products", *Codex Standard for Edible Fats and Oils Not Covered by Individual Standards*.(CODEX STAN 210 1999).
- Commission, E. U., 1991, "Regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive pomace and their analytical methods", *Off. J. Euro. Comm. L*, 248, 1-83.
- Delgado, A., Al-Hamimi, S., Ramadan, M. F., Wit, M. D., Durazzo, A., Nyam, K. L., & Issaoui, M., 2020, "Contribution of Tocols to Food Sensorial Properties, Stability, and Overall Quality", *Journal of Food Quality*, 2020.
- Febrianto, N. A. and Yang, T. A., 2011, "Producing high quality edible oil by using eco-friendly technology: a review", *Advance Journal of Food Science and Technology*, 3 (4), 317-326.
- Ferguson, J. J., Stojanovski, E., MacDonald-Wicks, L., & Garg, M. L., 2016, "Fat type in phytosterol products influence their cholesterol-lowering potential: A systematic review and meta-analysis of RCTs", *Progress in lipid research*, 64, 16-29.
- Frančáková, H., Ivanišová, E., Dráb, Š., Krajčovič, T., Tokár, M., Mareček, J., & Musilová, J., 2015, "Composition of fatty acids in selected vegetable oils", *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 9 (1), 538-542.
- Froyen, E. and Burns-Whitmore, B., 2020, "The Effects of Linoleic Acid Consumption on Lipid Risk Markers for Cardiovascular Disease in Healthy Individuals: A Review of Human Intervention Trials", *Nutrients*, 12 (8), 2329.
- Gharby, S., Harhar, H., Boulbaroud, S., Bouzoubaa, Z., El-Madani, N., Chafchaoui, I., & Charrouf, Z., 2014, "The stability of vegetable oils (sunflower, rapeseed and palm) sold on the Moroccan market at high temperature", *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 5, 47-54.
- Grajzer, M., Szmalcel, K., Kuźmiński, Ł., Witkowski, M., Kulma, A., & Prescha, A., 2020, "Characteristics and Antioxidant Potential of Cold-Pressed Oils—Possible Strategies to Improve Oil Stability", *Foods*, 9 (11), 1630.
- Griffin, B. A., 2008, "How relevant is the ratio of dietary n-6 to n-3 polyunsaturated fatty acids to cardiovascular disease risk? Evidence from the OPTILIP study", *Current opinion in lipidology*, 19 (1), 57-62.
- Gunstone, F., 2011, *Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses*, John Wiley & Sons, p.
- Husted, K. S. and Bouzinova, E. V., 2016, "The importance of n-6/n-3 fatty acids ratio in the major depressive disorder", *Medicina*, 52 (3), 139-147.
- Khattab, R. Y. and Zeitoun, M. A., 2013, "Quality evaluation of flaxseed oil obtained by different extraction techniques", *LWT-Food Science and Technology*, 53 (1), 338-345.
- Kramer, J. K., Blais, L., Fouchard, R. C., Melnyk, R. A., & Kallury, K. M., 1997, "A rapid method for the determination of vitamin E forms in tissues and diet by high-performance liquid chromatography using a normal-phase diol column", *Lipids*, 32 (3), 323-330.
- Kris-Etherton, P. M., Taylor, D. S., Yu-Poth, S., Huth, P., Moriarty, K., Fishell, V., ... & Etherton, T. D., 2000, "Polyunsaturated fatty acids in the food chain in the United States", *The American journal of clinical nutrition*, 71 (1), 179S-188S.
- Kyriakidis, N. B. and Katsiloulis, T., 2000, "Calculation of iodine value from measurements of fatty acid methyl esters of some oils: comparison with the relevant American oil chemists society method", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77 (12), 1235-1238.
- Lacoste, F., 2014, "Undesirable substances in vegetable oils: anything to declare?", *Ocl*, 21 (1), A103.
- Mattes, R. D., 2009, "Is there a fatty acid taste?", *Annual review of nutrition*, 29, 305-327.
- Medina-Juárez, L. Á. and Gámez-Meza, N., 2011, "Effect of refining process and use of natural antioxidants on soybean oil", *Soybean-Biochemistry, Chemistry and Physiology. InTech*, 435-460.
- Naz, S., Sherazi, S. T. H., & Talpur, F. N., 2011, "Changes of total tocopherol and tocopherol species during sunflower oil processing", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 88 (1), 127-132.

- Nederal, S., Škevin, D., Kraljić, K., Obranović, M., Papeša, S., & Bataljaku, A., 2012, "Chemical composition and oxidative stability of roasted and cold pressed pumpkin seed oils", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89 (9), 1763-1770.
- Orsavova, J., Misurcova, L., Ambrozova, J. V., Vicha, R., & Mlcek, J., 2015, "Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids", *International journal of molecular sciences*, 16 (6), 12871-12890.
- Özbek, Z. A., Çelik, K., & Ergönül, P. G., 2020, "Consumers Knowledge About Health Effects of Edible Oils and Fats in Turkey: A Questionnaire Study", *Age (years)*, 18 (30), 102.
- Pachua, L., Devi, C. M., Goswami, A., Sahu, S., & Dutta, R. S., 2019, Seed Oils as a Source of Natural Bioactive Compounds, In: *Natural Bio-active Compounds*, Eds: Springer, p. 209-235.
- Pal, U., Patra, R. K., Sahoo, N. R., Bakhara, C. K., & Panda, M. K., 2015, "Effect of refining on quality and composition of sunflower oil", *Journal of food science and technology*, 52 (7), 4613-4618.
- Pawar, N., Purohit, A., Gandhi, K., Arora, S., & Singh, R. R. B., 2014, "Effect of operational parameters on determination of oxidative stability measured by Rancimat method", *International Journal of Food Properties*, 17 (9), 2082-2088.
- Prescha, A., Grajzer, M., Dedyk, M., & Grajeta, H., 2014, "The antioxidant activity and oxidative stability of cold-pressed oils", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91 (8), 1291-1301.
- Ramadan, M. F., 2020, Introduction to cold pressed oils: Green technology, bioactive compounds, functionality, and applications, In: *Cold Pressed Oils*, Eds: Elsevier, p. 1-5.
- Satyarthi, J., Srinivas, D., & Ratnasamy, P., 2011, "Hydrolysis of vegetable oils and fats to fatty acids over solid acid catalysts", *Applied Catalysis A: General*, 391 (1-2), 427-435.
- Szydłowska-Czerniak, A., Karlovits, G., Dianoczki, C., Recseg, K., & Szlyk, E., 2008, "Comparison of two analytical methods for assessing antioxidant capacity of rapeseed and olive oils", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 85 (2), 141-149.
- Tarmizi, A. H. A., Ahmad, K., Sahri, M. M., & May, C. Y., 2016, "Rancimat test for measuring the oxidative stability of cooking oils upon prolonged frying", *Journal of Oil Palm Research*, 28 (4), 531-535.
- Traber, M. G. and Atkinson, J., 2007, "Vitamin E, antioxidant and nothing more", *Free radical biology and medicine*, 43 (1), 4-15.
- Uluata, S. and Özdemir, N., 2012, "Antioxidant activities and oxidative stabilities of some unconventional oilseeds", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89 (4), 551-559.
- Vidrih, R., Vidakovič, S., & Abramovič, H., 2010, "Biochemical parameters and oxidative resistance to thermal treatment of refined and unrefined vegetable edible oils", *Czech Journal of Food Sciences*, 28 (5), 376-384.
- Vujasinovic, V., Djilas, S., Dimic, E., Romanic, R., & Takaci, A., 2010, "Shelf life of cold-pressed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seed oil obtained with a screw press", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87 (12), 1497-1505.
- Vujasinovic, V., Djilas, S., Dimic, E., Basic, Z., & Radocaj, O., 2012, "The effect of roasting on the chemical composition and oxidative stability of pumpkin oil", *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114 (5), 568-574.
- Wardana, I., Widodo, A., & Wijayanti, W., 2018, "Improving vegetable oil properties by transforming fatty acid chain length in jatropha oil and coconut oil blends", *Energies*, 11 (2), 394.
- Wijendran, V. and Hayes, K., 2004, "Dietary n-6 and n-3 fatty acid balance and cardiovascular health", *Annu. Rev. Nutr.*, 24, 597-615.
- Yamauchi, R., 1997, "Vitamin E: mechanism of its antioxidant activity", *Food Science and Technology International, Tokyo*, 3 (4), 301-309.
- Yaqoob, P., 1998, "Monounsaturated fats and immune function", *Proceedings of the Nutrition Society*, 57 (4), 511-520.
- Yehuda, S., Rabinovitz, S., & Mostofsky, D. I., 2001, PUFA: mediators for the nervous, endocrine, and immune systems, In: *Fatty Acids*, Eds: Springer, p. 403-420.

- Ying, Q., Wojciechowska, P., Siger, A., Kaczmarek, A., & Rudzińska, M., 2018, "Phytochemical content, oxidative stability, and nutritional properties of unconventional cold-pressed edible oils", *Journal of Food and Nutrition Research*, 6 (7), 476-485.
- Yusuf, A., 2018, "A review of methods used for seed oil extraction", *Int. J. Sci. Res*, 7 (12), 233-223.
- Žilić, S., Dragišić, J. M., Maksimović, V., Maksimović, M., Basić, Z., Crevar, M., & Stanković, G., 2010, "The content of antioxidants in sunflower seed and kernel", *Helia*, 33 (52), 75-84.



## EEG SİNYALLERİNİ KULLANARAK 2B VE 3B HİBRİT BİR VİDEONUN AYRINTILI KANAL/LOB ANALİZİ

<sup>1</sup>Negin MELEK , <sup>2</sup>Mesut MELEK , <sup>3</sup>Temel KAYIKÇIOĞLU 

<sup>1,3</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Gümüşhane, TÜRKİYE

<sup>1</sup>negin.manshour@ktu.edu.tr, <sup>2</sup>mesutmelek@gumushane.edu.tr, <sup>3</sup>tkayikci@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 24.06.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.09.2021)

**ÖZ:** İnsan gözünün yapısına göre 2 Boyutlu (2B) ve 3B parçalardan oluşan video analizinde ani geçiş ve sabit durumların değerlendirilmesi önemlidir. Bu çalışmada, insan beyin sinyallerinin güç spektrum yoğunluğu (GSY), 2B ve 3B hibrit video izleme sonucunda analiz için dikkate alınmıştır. İnsanların yorulunca derinlik algısının kaybettiğini daha önceki çalışmalarımızda iddia etmiştik. Bu çalışmada, rastgele 2B ve 3B parçalardan oluşan, tek akışlı bir anaglif video sağlanmıştır. 2B ve 3B hibrit video çalışmasında, beyin sinyal analizinde kısa zamanlı Fourier dönüşümüne (KZFD) dayalı GSY ve spektrogram adı verilen görsel temsil kullanılmıştır. Tüm EEG frekans bantları test edildikten sonra, spektrogram çizelgesindeki 2B ve 3B parçaların karşılaştırılmasında GSY farkı dikkate alınarak, delta bandı baskın bant olarak seçilmiştir. Bu banttan çıkarılan öznitelikler iki popüler sınıflandırıcı tarafından sınıflandırılmıştır. Bunlar destek vektör makinesi (DVM) ve doğrusal ayırma analizi (DAA) algoritmalarıdır. Sonuç olarak, frontal ve temporal loblar, 2B ve 3B geçişlerin sınıflandırılmasında diğer loblara göre daha iyi sonuçlar göstermektedir. Öznitelik çıkarma yöntemi olarak kullanılan istatistiksel fonksiyonlar ve Hjorth parametreleri sonucunda DVM ve DAA algoritmaları için sınıflandırma başarıları sırasıyla %68 ve %79 olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** 2B ve 3B, EEG, Kararlı-durum, Öznitelik çıkarma, Sınıflandırma

### Detailed Channel/Lob Analysis of a 2D and 3D Hybrid Video Using EEG Signal

**ABSTRACT:** It is important to evaluate sudden transition and steady-states in video analysis consisting of 2 dimensional (2D) and 3D tracks, regarding the human eye structure. In this study, the power spectrum density (PSD) of the human brain signals was taken into consideration for analysis as a result of a 2D and 3D hybrid video watching. We claimed in our previous studies that people lose their depth perception when they get tired. In this study, a single stream anaglyph video consisting of random 2D and 3D tracks is provided. In 2D and 3D hybrid video study, PSD based on short-time Fourier transform (STFT) and visual representation called spectrogram were used in brain signal analysis. After all EEG frequency bands have been tested, the delta band has been chosen as the dominant band, taking into account the difference of PSD in the comparison of 2D and 3D parts in the spectrogram chart. Extracted features from this band were classified by two popular classifiers. These are support vector machine (SVM) and Linear discriminant analysis (LDA) algorithms. Consequently, the frontal and temporal lobes show better results in the classification of 2D and 3D transitions than other lobes. As a result of statistical functions and Hjorth parameters used as feature extraction methods, classification success for SVM and LDA algorithms was computed as 68 % and 79 %, respectively.

**Key Words:** EEG, 2D and 3D, Steady-state, Classification, Feature extraction

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beyin iki simetrik yarım küreden oluşmaktadır. Yarım kürelerin her biri dört loba bölünmüştür: Ön lob ve ya frontal, parietal, temporal, ve oksipital. Frontal lob, bilişsel işlevler, hareket veya istemli aktivitenin kontrolü için önemlidir. Parietal lob ısı, tat, dokunma ve hareketle ilgili bilgileri işlemektedir. Temporal lob anıları işleyerek duyu organlarıyla bütünleştirmeye çalışır, ve son olarak oksipital lob görmeden sorumludur.

Bilindiği gibi, beyin nöron adı verilen milyarlarca haberciden oluşur. Bu hücreler, kimyasal sinyaller yayarak diğer nöronlara bağlanır; bu ölçülebilir sinyaller beyin aktivitesinin değerlendirilmesine yardımcı olur. Beyin nöronlarının iyonik voltaj dalgalanmaları insanın tüm fonksiyonlarında anahtar rolü oynar. Bu voltajlardaki dalgalanmalar, akım ve son olarak elektrik alanının oluşumuyla sonuçlanır. Beyin nöronlarındaki bu dalgalanmaların ölçümü elektroensefalografi (EEG) olarak adlandırılır (Teplan, 2002). Aslında, bu sinyal kortikal sinir hücresi inhibitörü ve uyarıcı postsinaptik potansiyellerin sonucudur (Subha ve diğ., 2010). EEG'nin zayıf mekânsal duyarlılığına rağmen, taşınabilirlik, kolaylık, yüksek hassasiyetli zaman ölçümleri ve başka özellikleri dahil olmak üzere büyük potansiyeli nedeniyle bir çok araştırmada kullanılmaktadır. Bu sinyal, kafa derisinin farklı kısımlarına elektrotlar yerleştirilerek ölçülür. 0.1 ila 100 Hz arasındaki EEG sinyallerinin frekans aralıklarına göre beş alt bölüme ayrılır: delta ( $\delta$ , 0.1-4), teta ( $\theta$ , 4-8), alfa ( $\alpha$ , 8-13), beta ( $\beta$ , 13-30) ve gama ( $\gamma$ , > 30). İnvaziv olmayan EEG sinyalinin genliği yaklaşık 100  $\mu$ V 'dir (Voiculescu ve diğ., 2015), (Ahmed ve Abbas, 2015).

EEG sinyallerinin örüntülerinden elde edilen bilgiler, hastalık teşhisi hakkında ön görüş sağlar. Alzheimer hastalığı (Houmani ve diğ., 2018), (Jeong, 2004), epilepsi (Smith, 2005), (Rémi, 2009) tümörler (Preuß ve diğ., 2015), (Salai Selvam ve Shenbaga Devi, 2015) demans (Al-Qazzaz ve diğ., 2014), beyin hasarı (Lianyang Li ve diğ., 2015) ve diğer birçok nörolojik hastalık teşhisini kolaylaştırır ve hızlandırır. Uygun bir sinyal işleme yöntemi uygulayarak ve etkili bir sınıflandırıcı seçimi sayesinde, EEG anormal sinyalleri normal sinyallerden kolayca ayırt edilmesi mümkündür.

EEG tıbbi uygulamalarına ek olarak, nöro oyun, nöro oyuncaklar, sanal gerçeklik gibi nöro eğlence alanları için ör. beyin sinyali üzerinde 2B ve 3B oyun etkisi (Khairuddin ve diğ., 2013) ve 3B TV'nin görsel yorgunluğunun araştırılması (Jeong ve diğ., 2015) kullanılabilir. Sanal dünya deneyimi VR kulaklıkları ve EEG sinyalleri aracılığıyla yaygın hale gelmiştir. Bu sinyaller müzik üretimi gibi işlemlerde de kullanılmaktadır (Lenc ve diğ., 2018).

EEG aracılığıyla 2B ve 3B teknolojisinin incelenmesinde gözün çalışma prensibi hakkında bilgi edinmek önemlidir. Bu arada göz ve beyin nasıl çalıştığını öğrenmek de yararlı olacaktır. İnsanlar çevrelerini yaklaşık 6 cm mesafede olan ve iki yöne bakan iki gözle görüyorlar (Nityananda ve Read, 2017). Göz ve beyin, çalışma sırasında gelişen "görsel sistem" adı verilen bir birim oluştururlar. İnsan görüşü kavramında, sağ ve sol gözlerin görebildiği alanlar bir dereceye kadar üst üste bindirilir. Görme alanının çoğu iki gözle, yani binoküler şekilde görülür (Zhu ve diğ.), (Forrester ve diğ., 2016). Sağlıklı binoküler görmenin stereo vizyon adlı çok ilginç bir özelliği vardır. Aslında bu özellik, hafif bir açı değişikliği ile iki gözün gördüğü görüntülerin birleşimidir. İki gözün görünümü arasındaki büyük benzerliğe rağmen, her göz özel görsel bilgileri yakalar. Bu bilgi işlenmek üzere beyne gönderilir. Benzerlikleri eşleştirerek ve küçük farkları ekleyerek, son görüntüde büyük bir fark elde edilir. Bu görüntü üç boyutlu görüntüdür. Binoküler görmenin bu kadar önemli olmasının nedenlerinden biri, nesnelerin derinliğini ve ilişkilerini algılamasına izin vermesidir. Görme ve beyin fonksiyonu arasındaki ilişki birçok çalışmanın konusu olmuştur (Patterson, 2007), (Fischmeister ve Bauer, 2006), (Zwezdockhina ve Antipov, 2018), (Ramadan ve diğ., 2017).

Literatür taraması sonucunda 2B, 3B ve EEG uygulamaları üzerine yapılan bir çok çalışmaya rastlamaktayız. Bu çalışmalar 2B ve 3B teknolojisinin EEG ile incelenmesinde göz yorgunluğu tespiti (Han ve diğ., 2017), (Chen ve diğ., 2013), 2B ve 3B oyun analizi (Khairuddin ve diğ., 2013), (Minchev, 2013) beyin dalgalarındaki güç spektrumu farklılıklarının tespiti (Manshourri ve Kayikcioglu, 2019) ve stereoskopik eşitsizliğin olaya ilişkin potansiyeller üzerindeki etkilerinin araştırılması olarak sınıflandırılabilir.



EEG tabanlı 2B ve 3B konsantrasyon oyunları kullanılarak, tıbbi alanlarda etkili olabilecek bir nörofeedback sistemi geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2010). Bu çalışmada oksipital lobdan sadece bir EEG kanalı, gerçek zamanlı uygulamaların hızlı olması ve kanal sayısının az olması açısından seçilmiştir. 2011 yılına kadar, 2B ve 3B görselleştirme sistemlerinin kantitatif yararları üzerine çok az çalışma yapılmıştır. Oddball paradigmasındaki P300 yanıtının hedef tespit kullanımı için 2B ve 3B uyaranlarda değişimi çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır (Ting ve diğ., 2011). Başka bir 2B ve 3B teknolojisi çalışmasında (Kober ve diğ., 2012), 29 gönüllüde sanal mekânsal navigasyon denemesi gerçekleştirilmiştir. 2B ve 3B eğlence oyunları analizi açısından farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların amacı, oyun sırasında 2B ve 3B oyun konsollarını kullanırken göz yorgunluğunun derecesini araştırmaktır (Chen ve diğ., 2013). Beyin sinyallerinin düzenliliği ve bu iki durumun beyin sinyallerinde nasıl bir fark yarattığı farklı çalışmalarda araştırılmıştır (Minchev, 2013), (Mumtaz ve diğ., 2013), (Khairuddin ve diğ., 2013). 2B ve 3B teknolojisinin oyunlarda ve göz yorgunluğunda bir etkisi olup olmadığı da incelenmiştir (Chen ve diğ., 2013), (Chen ve diğ., 2014), (Zou ve diğ., 2015). Chen ve diğerleri tarafından, uzun süreli 3B TV izlemeden sonra, alfa ritminin prefrontal ve frontal bölgelerde önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, prefrontal, frontal, parietal, ve temporal bölgelerde beta aktivitesinde önemli bir azalma tespit edilmiştir ve teta ritmindeki bağıl enerjinin ortalama değerinde anlamlı bir değişiklik görünmemiştir. İnsan beyin bantlarındaki yorgunluk faktörlerinin analizinde farklı sonuçlar çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir (Belyavin ve Wright, 1987), (Subasi, 2005), (Jap ve diğ., 2009).

Bu çalışmanın temel amacı, rastgele 2B ve 3B parçalardan oluşan tek bir hibrit videoda geçiş anının kapsamlı EEG analizidir. 3B insan görme yeteneğine dayanarak, bu geçiş anının analizi insan yorgunluğu durumunda bir hipoteze yol açabilir. İnsanlar yorgunken, derinlik algılarının boyut kaybedeceğini iddia ediyoruz. Böyle bir koşul altında, 3B'den 2B'ye (3B\_2B) ani bir geçiş olabilir. Mevcut çalışmanın hipotezini test etmek için, kritik geçişi devre dışı bırakarak kararlı-durum koşullarını içeren epoklar rastgele 2B ve 3B geçişleri olan videoda dikkate alınmıştır. KZFD'ye dayanarak EEG davranışı, spektrogram grafiğine göre farklı beyin loblarını temsil eden kanallarda analiz edilmiştir. Bu zaman-frekans görsel sunum ve GSY farkını kullanarak, EEG'nin önemli frekans bantları ve baskın zaman aralıkları hakkında fikir sahibi olacağız.

## YÖNTEMLER VE TEST PROTOKOLÜ (METHODS AND TEST PROTOCOL)

### Gönüllüler (Volunteers)

Nörofizyolojik bozukluğu olmayan dokuz gönüllü (4 kadın ve 5 erkek) deneylere katıldı. Gönüllülerin yaş ortalaması ve standart sapması (SS) sırasıyla 34.12 ve 2.072'dir. Gönüllü bireylere testin tüm aşamaları ayrıntılı olarak açıklandı ve gereksiz göz kırpması ve vücut hareketlerini en aza indirmeleri istendi.

### Hibrit Video Hazırlama (Hybrid Video Creation)

TV özelliklerine istinaden (Manshourri ve Kayikcioglu, 2019), hibrit videoyu tek akışlı bir şekilde sunmak için anaglif gözlüğün bu senaryoda uygun olması görülmüştür. Çünkü bu gözlük çalışma prensibine göre (Kim ve diğ., 2011) her hangi bir görüntüleme sistemine bağlı değildir. Saw videonun (3DN3D, 2019) 3B versiyonu "Xilisoft 3D Video Converter" (Xilisoft, 2019) ile 2B'ye dönüştürüldü ve "IQ mango 3D Converter" programı aracılığıyla 3B anaglif formuna getirildi (IQmango, 2019). Bir sonraki adımda, 8 saniyelik kısa parçalar "Idoo video editor pro" (Idoo, 2019) ile birleştirildi. Son olarak, 135 saniyelik 2B ve 3B rastgele sekiz saniyelik parçalardan oluşan tek bir anaglif video elde edildi.

### EEG Kaydı ve Veri Kümesi (EEG Recording and Dataset)

Önerilen çalışma için, Karadeniz Teknik Üniversitesinin tıp fakültesinde 14.12.2018 tarihinde Bilimsel Araştırmalar Etik Kurul Başkanlığı tarafından 2018/286 sayılı ve 24 237 859-806 nolu etik kurul kararı alınmıştır. EEG kayıtları Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi'nin EEG laboratuvarında alınmıştır. Tüm elektrotlar, uluslararası 10-20 sistemine göre kafa derisine yerleştirilmiştir. EEG sinyalleri 21 kanallı bir kep "Brain Quick EEG Sistemi (Micromed, İtalya)" ile elde edilmiştir. Kanallar Fp1, Fpz, Fp2, F3, F4, F7, F8, C3, C4, Fz, P3, P4, Pz, O1, O2, T3, T4, T5, T6, Oz ve Cz (referans elektrodu) dır. EEG verileri 512 Hz'de örneklendi ve cilt empedansı 10 K $\Omega$  altında tutuldu. Tüm deneklerden TV standından yaklaşık 85 cm uzakta rahat bir sandalyede oturmaları ve gereksiz hareketlerden, baş sallama ve vücut hareketlerinden kaçınmaları istendi. Her kayıt 135 saniye sürdü ve 5 kez tekrarlandı. EEG cihazında, 0.1-120 Hz arası için bir bant geçiren ve şebeke gürültüsünden kurtulmak için 50 Hz'lik bir çentik filtre uygulanmıştır.

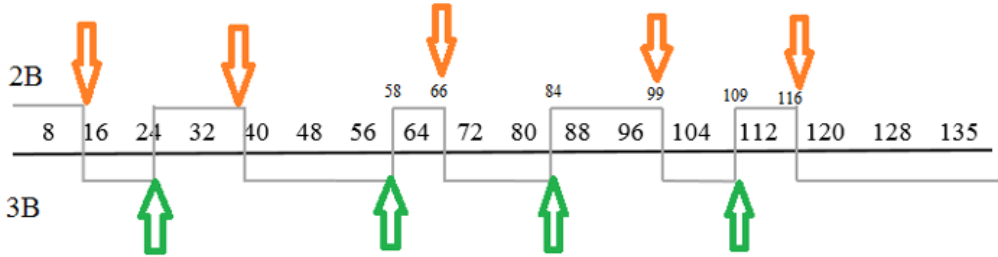
### Senaryo (Scenario)

Analizde toplam 10 kararlı-durum bölgesi vardır. Epok kategorisinde Çizelge 1'de görüldüğü gibi 4 saniyelik pencere uzunluğu dikkate alınmıştır. Daha önce söylendiği gibi, her kayıt 5 kez tekrarlanmıştır. Bu nedenle, 4 saniyelik pencere uzunluğu ve 10 kararlı bölgenin mevcut olması nedeniyle, toplam 50 epok analize dahil edildi. 8 saniyelik 2B ve 3B rastgele parçalardan oluşan video sekansının bir EEG kayıt örneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu parça uzunlukları rastgele olarak seçilmiştir. Şekil 1'de, turuncu renkli oklar 2B den 3B geçişlerini (2B\_3B) ve yeşil oklar 3B\_2B geçişlerini temsil etmektedir.

**Çizelge 1.** Kararlı-durumu kapsayan pencerelerin epok uzunluğu saniye cinsinden

*Table 1. Epoch length of windows covering steady state in seconds*

2B	3B
9-13	17.5-21.5
33-37	51-55
60.5-64.5	77-81
92-96	102-106
110.5-114.5	122-126



**Şekil 1.** Hibrit video detayları

*Figure 1. Hybrid video details*

### Veri İşleme (Data Processing)

#### EEG Veri Ön İşleme (EEG Data Preprocessing)

EEG sinyallerinin küçük genliği nedeniyle, 100  $\mu V$ 'den büyük değerler artefaktlar olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, gürültü ve artefaktın ham EEG verileri üzerindeki etkilerini en aza indirmek için, 20 kanaldan oluşan analizde her bir birey için 15 denemenin ortalaması hesaplanmıştır. Daha sonra,

EEG sinyalleri çentik filtre (50 Hz) ve üçüncü dereceden bant geçiren Butterworth filtresinden (1-55 Hz) geçirilmiştir. Filtre derecesi deneme yanılma yöntemi ile üç olarak seçilmiştir.

## EEG Sinyalinin Ön Analizi (Preliminary Analysis of The EEG Signal)

### Zaman-Frekans Analizi ve Bant Seçimi (Time-Frequency Analysis And Band Selection)

İşlenmiş veriler hakkında daha etkili bir fikir elde etmek için zaman-frekans analizi uygulanmıştır. Böylece, 2B ve 3B geçiş analizinde, GSY'nin maksimum farkını ve yoğun frekans aralığını temsil eden zaman aralıkları dikkate alınmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için KZFD'e (Harris, 1987) dayanan spektrogram yöntemi kullanılmıştır. KZFD sinyalin yerel frekans içeriğini kayan pencerelerle analiz eden bir tekniktir (Hlawatsch ve Boudreaux-Bartels, 1992). Bu pencerenin genişliğini ayarlayarak öngörülemez EEG sinyalleri hakkında değerli bilgiler elde edilebilir. EEG sinyallerinin bilinmeyen doğası nedeniyle, bu çalışmada yumuşak davranışlı Hanning penceresi seçilmiştir. Bu pencerenin uygun özellikleri arasında, dar yan loblarından farklı olarak geniş bir zirveye sahip olmasıdır. Bu nedenle, bu çalışmada istenen frekans aralığı dikkate alınarak, ilgili zaman ve frekans çözünürlüğünü yakalamak için 512 örnek uzunluğu, pencere boyutu olarak kabul edilmiştir. Pencerenin üst üste binmesi "pencere boyutu -1" olarak dikkate alınmıştır (Manshouri ve diğ., 2020).

Her bir alt veri setindeki 9 gönüllüye ait tüm epokların ortalama EEG güç spektrogramı 20 kanal için ayrı ayrı elde edilmiştir. Sonuç olarak, etkili zaman pencereleri için ortalama EEG güç spektrogramları incelendiğinde, baskın frekans ve kanallar üzerindeki 2B ve 3B kararlı-durum bölgelerinin ortalama güç spektrogramları arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Bir sonraki adımda, bu bölümden elde edilen baskın bant ve zaman aralıkları göz önünde bulundurularak 4 saniyelik epoklar için, 2, 3 ve 4 Hz frekanslarda 1-1.5 ve 1.5-3 saniye zaman aralıklarını seçerek, öznelik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir.

### Öznelik Çıkarma (Feature Extraction)

KZFD tabanlı spektrogram grafiği değerlendirildiğinde, baskın bant ve zaman aralıklarında iki farklı öznelik çıkarma yöntemi kullanılmıştır. Bunlardan biri istatistiksel fonksiyonlardan standart sapma (SS) ve maximum (max), diğeri ise Hjorth parametreleri (Oh ve diğ.) dir.

### Sınıflandırma Teknikleri ve Performans Değerlendirmesi (Classification Techniques and Performance Evaluation)

Bu makalede, destek vektör makinesi (DVM) ve doğrusal ayırma analizi (DAA) içeren sınıflandırma algoritmaları 2B ve 3B hibrit video izleme tanısında birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Örüntü tanımada, araştırmancının kabul edilebilir bir performansın elde edilmesinde sınıflandırma etkinliğinin büyük önem taşıdığı bilinmektedir. Genel olarak, DVM sınıflandırma algoritması yüksek boyutlu, doğrusal olmayan ve küçük veri setlerinde problem çözmede iyi sonuçlar verdiği öne sürülmektedir (Ramos-Aguilar ve diğ.). DVM algoritmasının temel prensibi giriş verileri üzerindeki öğrenme adımlarını tekrarlayarak sınıflar arasında maksimum marj ile optimum hiperplanlar bulmaktır (Lin ve diğ., 2008). Doğrusal olmayan çekirdek fonksiyonu, veri analizinin çok boyutlu özellik alanına aktarılmasına izin verir (Li ve diğ., 2014). Çekirdek fonksiyonunun farklı çeşitleri nedeniyle uygun bir fonksiyon seçmek önemlidir. Bu çalışmada radyal temel fonksiyonu (RTF) kullanılmıştır. İlgili çekirdek fonksiyonu (Manshouri ve diğ., 2020) 'te tanımlanmıştır.

DAA, herhangi bir veri setinde sınıflar arası varyansın sınıf içi varyansa oranını en üst düzeye çıkarır, böylece maksimum ayrıla bilirliği garanti eder (Coyle ve diğ., 2005), (Neto ve diğ., 2016). DAA, iki veya daha fazla sınıfı ayırarak ve yüksek boyutlu bir alandaki özellikleri daha düşük boyutlu bir alana yansıtarak gruplar arasındaki farklılıkları modelleyen bir algoritmadır.

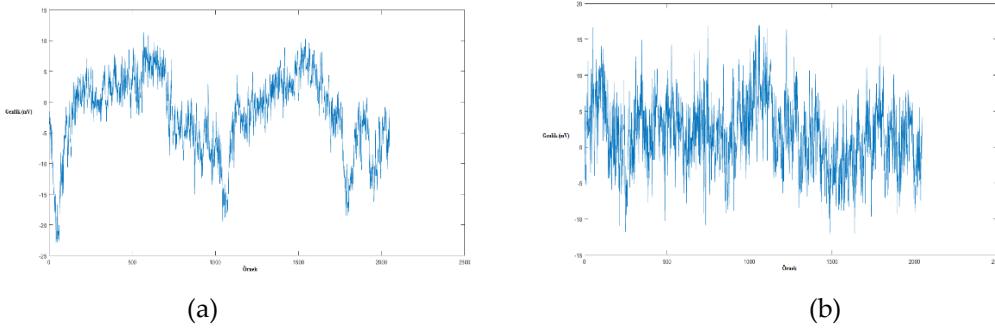
Bu çalışmada, veri seti eğitim ve test olarak ikiye ayrılmıştır. Şanssız bölünmeyi önlemek için sınıflandırma işlemi 20 kez tekrarlanmıştır. Eğitim verisinde 10-kat çapraz doğrulama metodu

kullanılarak, sınıflandırıcıların optimum parametreleri belirlenmiştir. 2B epokları pozitif ve 3B epokları negatif sınıfı oluşturmaktadır.

## BULGULAR (RESULTS)

EEG verilerinin zaman-frekans analizinde, ortalama epoklar için ortalama güç spektrumlarının farkı 20 kanal için gösterilmiştir. Böylece bu geçiş sınıflandırmasında baskın zaman aralıkları ve etkin frekans bandı belirlenmiştir. Sonuç olarak, delta bandı, 1-1.5 ve 1.5-3 saniye zaman aralıkları güç farkını temsil eden en iyi kriterler olarak dikkate alınmıştır. Her kanaldaki 9 kişinin DVM sınıflandırma sonuçları standart sapma (SS), maximum (max) ve Hjorth öznitelik çıkarma yöntemleri için sırasıyla Çizelge 2 ve 3'te gösterilmiştir. Benzer şekilde, DAA sınıflandırma sonuçları sırasıyla Çizelge 4 ve 5'te sunulmuştur. Bu tablolarda F harfiyle başlayan kanallar (Fp1, Fpz, Fp2, F3, F4, F7, F8, Fz) frontal lobunu, T harfiyle başlayan kanallar (T3, T4, T5, T6) temporal lobunu temsil etmektedir. Benzer şekilde oksipital lobu kanalları (O1, O2, Oz), parietal ve merkezi lobların kanalları sırasıyla (P3, P4, Pz) ve (C3, C4) ile gösterilmektedir. Kıyaslamak amaçlı, oksipital ve frontal loblarına ait denemelerin ortalaması Şekil 2'de gösterilmiştir.

20 kanaldaki 9 gönüllünün sınıflandırma sonuçlarına bakıldığında, DAA ve Hjorth yöntemlerinin daha başarılı olduğu göz ardı edilemez. Genel bir bakış açısıyla, frontal, temporal ve kısmen parietal loblar oldukça başarılı görünmektedir. DAA sınıflandırma algoritmasında genel ortalama sınıflandırma sonucu göz önüne alındığında, F8 ve Oz sırasıyla % 63.42 ve % 66.67 başarı ile SS, max ve Hjorth yöntemlerinde en iyi sonuçları veren kanallar olarak seçilmiştir. Çalışmadaki sınıflandırma problemi ikili olduğuna rağmen, hesaplanan değerler düşüktür. Bunun için, farklı yöntemler kullanılarak sonuçların artırılması gerekmektedir.



Şekil 2. Oksipital ve frontal loblarına ait kanal karşılaştırması, (a) Frontal, (b) Oksipital  
Figure 2. Channel comparison of occipital and frontal lobes, (a) Frontal, (b) Occipital

## Oylama İşlemini Kullanarak Temporal ve Frontal Lob Aktivitesi (Temporal and Frontal Lobe Activity Using The Voting Process)

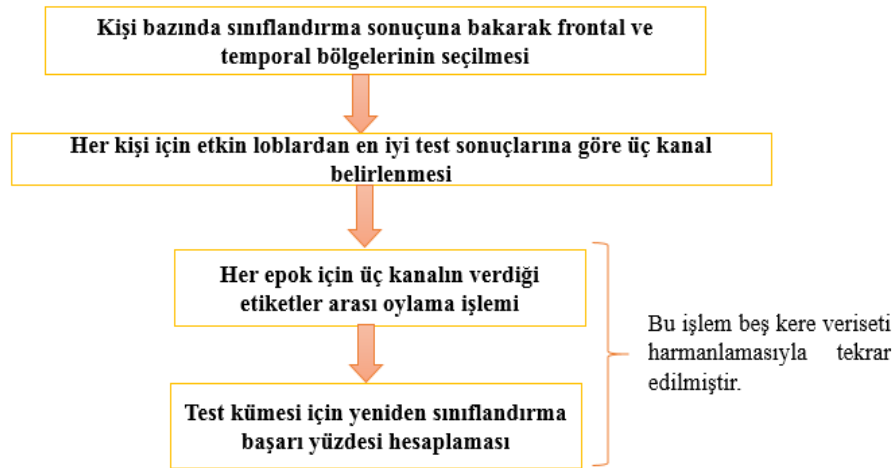
En yüksek doğruluk oranına sahip üç kanal, her bir sınıflandırıcı için Çizelge 6'da listelenmiştir. Önceki bölümde sunulan sonuç çizelgeleri dikkate alındığında, temporal ve frontal loblardan kanalların etkili ve baskın olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle, bu bölgelerin 2B ve 3B video izlemesinde daha önem taşıdığını ifade edebiliriz. Sınıflandırma sonuçlarını iyileştirmek için, her kişide en iyi doğruluğa sahip frontal ve temporal loblardan üç kanal Çizelge 7'de tanımlanmıştır. Böylece Çizelge 6'da parietal, oksipital ve merkezi loblara ait kanallar, frontal ve temporal loblardan en iyi kanallarla yer değiştirmişlerdir.

Sınıflandırma süreci sonucunda en iyi üç kanal kombinasyonu seçildikten sonra, sonuç iyileştirme analizi etiketler arası oylama ile yapılmıştır (Kayıkcioğlu ve diğ., 2015). Çizelge 8'de özetlenmiş olan bu karar mekanizmasında, her bir epok için karar verme şekli açıklanmıştır. Bu karar mekanizması Tahmini

epok etiketi 1 veya "2B" olarak değerlendirilmek için iki (veya üç kanal) etiketi 1 olmalıdır. Diğer taraftan, iki veya üç kanalın tahmini epok etiketi 2 olursa o epok "3B" olarak sınıflandırılır.

Bu nedenle, önerilen hipotezde, her iki öznitelik çıkarma yönteminde, delta bandından sadece 2, 3 ve 4 Hz ve beyin bölgelerinden tempoaral ve frontal loblar 2B ve 3B kararlı-durum analizini sınıflandırmak için kullanılmıştır. Bu arada oylama akış şeması Şekil 3'te gösterilmiştir. Oylama süreci kullanılarak 9 gönüllünün 2B ve 3B kararlı-durum sınıflandırma sonuçları Çizelge 9'da sunulmuştur.

Dokuz gönüllü arasında en yüksek ortalama test performansı, Hjorth öznitelik çıkarma yöntemi ve DAA sınıflandırıcısı ile K3'te %90 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 7'de, bu başarı F8, F7 ve F4 kanalları arasında oylama ile elde edilmiştir. Genel olarak, Çizelge 9'a bakıldığında, en iyi ortalama test performansı, Hjorth öznitelik çıkarma yöntemi için DAA sınıflandırmasında %79 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Temporal ve frontal lob etkinliğinin oylama akış şeması  
Figure 3. Voting flowchart of temporal and frontal lobe activity

Çizelge 2. DVM sınıflandırıcısının sonuçları (SS, max)

Table 2. Results of the DVM classifier (SS, max)

Kanal	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Ortalama
Fp1	50	58.33	62.5	54.17	54.17	41.67	66.67	50	54.17	54.63
Fpz	50	62.5	54.17	54.17	54.17	50	62.5	45.83	50	53.7
Fp2	58.33	54.17	54.17	54.17	54.17	54.17	62.5	45.83	50	54.16
F3	75	66.67	54.17	70.83	66.67	41.67	62.5	54.17	54.17	60.65
F4	58.33	62.5	58.33	62.5	70.83	66.67	70.83	29.17	58.33	59.72
F7	54.17	41.67	54.17	70.83	45.83	41.67	54.17	66.67	66.67	55.09
F8	54.17	66.67	58.33	58.33	54.17	62.5	58.33	54.17	50	57.4
C4	45.83	58.33	62.5	70.83	54.17	50	66.67	54.17	50	56.94
C3	62.5	54.17	58.33	50	50	50	75	41.67	50	54.63
Fz	58.33	58.33	62.5	58.33	50	62.5	66.67	58.33	62.5	59.72
P3	50	66.67	62.5	41.67	62.5	62.5	62.5	66.67	54.17	58.79
P4	58.33	50	58.33	58.33	41.67	54.17	58.33	54.17	50	53.7
Pz	50	66.67	50	45.83	50	37.5	58.33	58.33	58.33	52.77
O1	50	45.83	54.17	50	50	50	54.17	70.83	54.17	53.24
O2	50	58.33	50	62.5	29.17	45.83	62.5	70.83	66.67	55.09
T3	58.33	50	50	45.83	62.5	50	58.33	62.5	54.17	54.62
T4	70.83	58.33	62.5	62.5	70.83	58.33	54.17	58.33	58.33	61.57
T5	50	58.33	54.17	41.67	45.83	58.33	58.33	45.83	58.33	52.31
T6	54.17	62.5	54.17	62.5	50	59.33	50	58.33	54.17	56.13
Oz	54.17	54.17	62.5	58.33	41.67	58.33	62.5	70.83	54.17	57.4

Çizelge 3. DVM sınıflandırıcının sonuçları (Hjorth)

Table 3. Results of the DVM classifier (Hjorth)

Kanal	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Ortalama
Fp1	54.17	50	62.5	62.5	54.17	54.17	70.83	54.17	62.5	58.33
Fpz	58.33	50	50	62.5	54.17	37.5	79.17	54.17	62.5	56.48
Fp2	66.67	50	50	66.67	58.33	45.83	66.67	50	70.83	58.33
F3	45.83	66.67	50	79.17	50	54.17	54.17	50	58.33	56.48
F4	58.33	75	50	62.5	41.67	75	45.83	66.67	41.67	57.41
F7	54.17	66.67	50	66.67	50	37.5	54.17	58.33	58.33	55.09
F8	58.33	58.33	66.67	54.17	50	70.83	37.5	41.67	54.17	54.63
C4	50	58.33	54.17	45.83	50	45.83	50	50	62.5	51.85
C3	58.33	62.5	54.17	62.5	45.83	54.17	70.83	75	62.5	60.65
Fz	54.17	62.5	58.33	62.5	45.83	70.83	45.83	70.83	62.5	59.26
P3	50	66.67	62.5	54.17	54.17	75	50	62.5	58.33	59.26
P4	45.83	54.17	62.5	50	58.33	41.67	62.5	50	58.33	53.7
Pz	41.67	58.33	54.17	54.17	62.5	66.67	66.67	62.5	66.67	59.26
O1	66.67	54.17	62.5	66.67	45.83	58.33	45.83	75	50	58.33
O2	66.67	58.33	54.17	62.5	37.5	54.17	50	75	62.5	57.87
T3	58.33	62.5	62.5	58.33	54.17	45.83	41.67	50	54.17	54.17
T4	58.33	62.5	45.83	50	50	70.83	62.5	58.33	50	56.48
T5	54.17	58.33	66.67	45.83	45.83	75	62.5	41.67	66.67	57.41
T6	70.83	62.5	50	66.67	37.5	75	54.17	58.33	62.5	59.72
Oz	54.17	58.33	62.5	83.33	45.83	70.33	45.83	87.5	50	62.04

Çizelge 4. DAA sınıflandırıcının sonuçları (SS, max)

Table 4. Results of LDA classifier (SS, max)

Kanal	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Ortalama
Fp1	62.5	50	66.67	66.67	54.17	62.5	70.83	70.83	58.33	62.5
Fpz	58.33	45.83	75	66.67	54.17	62.5	75	62.5	45.83	60.64
Fp2	58.33	45.83	75	66.67	58.33	62.5	79.17	70.83	54.17	63.42
F3	58.33	58.33	58.33	70.83	50	45.83	66.67	50	62.5	57.86
F4	58.33	54.17	75	62.5	62.5	66.67	66.67	58.33	54.17	62.03
F7	58.33	54.17	33.33	66.67	54.17	50	58.33	58.33	70.83	56.01
F8	62.5	54.17	75	66.67	58.33	70.83	58.33	62.5	45.83	61.53
C4	54.17	54.17	75	66.67	58.33	50	62.5	70.83	58.33	61.11
C3	58.33	50	79.17	58.33	66.67	54.17	50	66.67	45.83	58.79
Fz	50	66.67	54.17	37.5	58.33	66.67	58.33	70.83	54.17	57.4
P3	66.67	75	75	50	50	70.83	58.33	62.5	58.33	62.96
P4	45.83	58.33	66.67	58.33	50	50	58.33	54.17	70.83	56.94
Pz	54.17	70.83	66.67	62.5	58.33	58.33	54.17	58.33	58.33	60.18
O1	45.83	54.17	66.67	62.5	54.17	66.67	54.17	70.83	54.17	58.79
O2	50	54.17	66.67	58.33	54.17	62.5	58.33	70.83	62.5	59.72
T3	54.17	37.5	58.33	58.33	58.33	62.5	58.33	66.67	50	56.01
T4	75	58.33	54.17	50	66.67	54.17	58.33	54.17	58.33	58.79
T5	37.5	58.33	75	75	58.33	62.5	54.17	66.67	58.33	60.64
T6	54.17	45.83	62.5	58.33	58.33	62.5	45.83	54.17	66.67	56.48
Oz	66.67	50	66.67	58.33	50	58.33	62.5	62.5	70.83	60.64

**Çizelge 5.** DAA sınıflandırıcının sonuçları (Hjorth)*Table 5. Results of the LDA classifier (Hjorth)*

Kanal	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	Ortalama
Fp1	58.33	62.5	62.5	66.67	50	75	62.5	58.33	58.33	61.57
Fpz	58.33	50	62.5	75	41.67	70.83	66.67	50	45.83	57.87
Fp2	62.5	50	58.33	62.5	50	70.83	66.67	41.67	37.5	55.56
F3	50	75	62.5	79.17	41.67	62.5	54.17	50	45.83	57.87
F4	66.67	75	66.67	62.5	70.83	79.17	58.33	54.17	58.33	65.74
F7	54.17	66.67	70.83	62.5	66.67	62.5	54.17	70.83	62.5	63.43
F8	62.5	50	79.17	75	70.83	66.67	75	58.33	62.5	66.67
C4	62.5	66.67	58.33	75	54.17	62.5	62.5	58.33	37.5	59.72
C3	45.83	50	62.5	58.33	54.17	62.5	62.5	79.17	58.33	59.26
Fz	58.33	79.17	66.67	62.5	62.5	70.83	50	50	75	63.89
P3	45.83	66.67	66.67	54.17	66.67	62.5	62.5	50	58.33	59.26
P4	62.5	70.83	70.83	50	62.5	50	58.33	58.33	58.33	60.19
Pz	70.83	62.5	41.67	66.67	83.33	75	54.17	50	62.5	62.96
O1	62.5	54.17	58.33	75	54.17	70.83	54.17	70.83	45.83	60.65
O2	70.83	58.33	50	70.83	62.5	62.5	58.33	66.67	62.5	62.5
T3	66.67	33.33	41.67	50	45.83	62.5	66.67	41.67	54.17	51.39
T4	54.17	75	58.33	37.5	50	58.33	66.67	70.83	66.67	59.72
T5	66.67	70.83	62.5	79.17	41.67	70.83	62.5	58.33	75	62.28
T6	66.67	66.67	54.17	83.33	66.67	75	54.17	50	79.17	66.2
Oz	62.5	58.33	45.83	62.5	50	83.33	54.17	87.5	62.5	62.96

**Çizelge 6.** 9 gönüllüde en iyi başarıyı yakalayan üç kanal*Table 6. Three channels with the best success in 9 volunteers*

	DVM		DAA	
	SS ve max	Hjorth	SS ve max	Hjorth
K1	F3, T4, C3	T6, Fp2, O1	T4, F8, P3	Pz, O2, T3
K2	F3, F8, P3	F4, F3, F7	P3, Pz, Fz	F3, F4, T4
K3	T4, Fz, Fp1	F8, T5, Fz	C3, T5, Fpz	F8, F7, P4
K4	F3, F7, C4	Oz, F3, T6	T5, F3, Fp1	T6, T5, F3
K5	F4, F8, Fz	Pz, P4, Fp2	F8, P3, O1	Pz, F4, T6
K6	F4, T4, F3	T5, T6, P3	T4, C3, Fp2	F4, T6, Pz
K7	C3, F4, Fp1	Fpz, C3, Fp1	Fp2, Fpz, Fp1	F8, Fpz, Fp2
K8	Oz, O1, O2	Oz, O1, O2	Fp2, Fp1, Fz	Oz, C3, F7
K9	F7, O2, Fz	Fp2, T5, Pz	F7, Oz, P4	T6, T5, Fz

**Çizelge 7.** Seçilen en iyi üç kanal (sadece Frontal ve temporal loblar dikkate alınarak)*Table 7. The three best selected channels (only considering the Frontal and temporal lobes)*

	DVM		DAA	
	SS ve max	Hjorth	SS ve max	Hjorth
<b>K1</b>	F3, T4, T3	T6, Fp2, T3	T4, F8, Fp1	T3, T5, T6
<b>K2</b>	F3, F8, Fpz	F4, F3, F7	Fz, F3, T5	F3, F4, T4
<b>K3</b>	T4, Fz, Fp1	F8, T5, Fz	T5, Fpz, Fp2	F8, F7, F4
<b>K4</b>	F3, F7, F4	F3, T6, F7	T5, F3, Fp1	T6, T5, F3
<b>K5</b>	F4, F8, Fz	Fp2, Fp1, Fpz	F8, Fp1, Fpz	F4, T6, F7
<b>K6</b>	F4, T4, F3	T5, T6, F8	T4, Fp1, T3	F4, T6, Fpz
<b>K7</b>	F4, Fp1, Fz	Fpz, Fp1, Fp2	Fp2, Fpz, Fp1	F8, Fpz, Fp2
<b>K8</b>	F7, Fz, T4	F4, T6, F7	Fp2, Fp1, Fz	F7, T4, T5
<b>K9</b>	F7, Fz, T4	Fp2, T5, T6	F7, T6, F3	T6, T5, Fz

**Çizelge 8.** Oylamaya göre belirlenen tahmini etiket*Table 8. Estimated label determined by voting*

Kanal 1	Kanal 2	Kanal 3	Tahmini etiket
1	1	1	1
1	1	2	1
1	2	1	1
1	2	2	2
2	1	1	1
2	1	2	2
2	2	1	2
2	2	2	2



**Çizelge 9.** Oylama işleminden sonra 2B ve 3B kararlı-durumu sınıflandırma sonuçları*Table 9. 2D and 3D steady-state classification results after voting*

		DVM		DAA	
		SS, max	Hjorth	SS, max	Hjorth
<b>K1</b>	Doğruluk	70	70	55	80
	Duyarlılık	75	80	77.78	83.33
	Özgüllük	100	60	54.55	75
<b>K2</b>	Doğruluk	70	70	65	85
	Duyarlılık	86	80	85.71	100
	Özgüllük	58.65	60	53.85	88.89
<b>K3</b>	Doğruluk	54	70	75	90
	Duyarlılık	69.42	70	81.82	100
	Özgüllük	55.4	50	66.67	66.67
<b>K4</b>	Doğruluk	70	70	65	80
	Duyarlılık	90	83.33	85.71	90
	Özgüllük	70	75	53.85	70
<b>K5</b>	Doğruluk	65	60	70	70
	Duyarlılık	73.33	75	83.33	78.57
	Özgüllük	80	50	75	83.33
<b>K6</b>	Doğruluk	65	75	70	75
	Duyarlılık	69.23	100	71.43	84.62
	Özgüllük	57.14	72.73	66.67	85.71
<b>K7</b>	Doğruluk	70	65	85	80
	Duyarlılık	80	69.23	90.91	91.67
	Özgüllük	60	57.14	77.78	87.5
<b>K8</b>	Doğruluk	50	60	80	70
	Duyarlılık	66.67	80	91.67	83.33
	Özgüllük	50	60	87.5	75
<b>K9</b>	Doğruluk	75	70	70	80
	Duyarlılık	73.33	90	83.33	91.67
	Özgüllük	80	70	75	87.5
<b>Ortalama</b>	Doğruluk	65.44	68	71.66	79
	Duyarlılık	75.88	80.84	82.63	89.24
	Özgüllük	67.91	61.65	67.94	79.96

**TARTIŞMA (DISCUSSION)**

Senaryo bulguları açısından, hibrit anaglif videonun 2B ve 3B kararlı- durum analizinde kapsamlı bir nitel sınıflandırma çalışması elde edilmiştir. Tek akışlı 2B\_3B ve 3B\_2B rastgele geçişlerden oluşan bir videoda, EEG frekans bantlarındaki tüm beyin loblarının davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. 2B ve 3B alanında literatür incelemesi sonucunda, analiz sadece bazı beyin loblarının veya frekans bantlarının etkinliğini dikkate alarak ve temel bilgilere dayanılarak başlatılmıştır (Zvezdochkina ve Antipov, 2018), (Hostovecký ve B, 2017), (Ramadan ve diğ., 2017). Ancak, önerilen çalışmada, baskın EEG bandı, beyin lobları (Manshourri ve diğ., 2020) analiz edilerek seçilmiştir. Literatür tarama aşamasında, uykuya geçiş anını yakalamak için 2B\_3B ve 3B\_2B geçiş ve kararlı-durum sınıflandırma hipotezle çalışmasına rastlanmamıştır. Bu alandaki çalışmalar, 3B televizyonlar tarafından oluşturulan göz yorgunluğuna, 2B ve 3B oyun konsollarının yüzeysel ve kalitatif beyin sinyal analizine dayanmaktadır (Jeong ve diğ., 2015), (Chen ve diğ., 2013), (Chen ve diğ., 2014), (Malik ve diğ., 2015). Nörofizyolojik ve bilişsel yanıtlar açısından 2B ve 3B modlarında TV izlemenin beyin dinamikleri üzerinde büyük etkileri olmadığı öne

sürülmüş olsa da, daha sonraki çalışmalarda bu sonucun derin analizde değiştiği gösterilmiştir (Manshouri ve diğ., 2017), (Kim ve Kim, 2012).

Gönüllüler arası sınıflandırma sonuçları dikkate alındığında, frontal ve temporal loblardan kanalların varlığı, bu kanalların etkin kanallar olduğunu göstermektedir. Genel ortalama sonuçlarına dayanarak, parietal ve oksipital lobların 2B ve 3B kararlı-durum koşulları sınıflandırmasında kısmen önemli olduğunu gösterir. Temporal lobdan kanalların varlığı, görsel hafızadaki önemli rolü nedeniyle açıklanabilir. Frontal lobun var olma nedeni ise, bu lobun ilgi odağında önemli bir role sahip olması olabilir. Parietal lobun işlevi, beyin farklı bölgelerindeki duyuşal bilgileri yorumlamaktır. Korteksin arka kısmını veya oksipital lobunu temsil eden kanalların olması, ilginç görsel bilgilerdeki yetenekleri nedeniyle açıklanabilmektedir. KZFD'ye dayalı GSY spektrogram grafikleri göz önüne alındığında, delta bandından 2, 3 ve 4 Hz frekansları baskın bant olarak seçilmiştir. Bu sınıflandırma çalışmasında, kararlı-durum analizinin önemi insan göz yapısına dayanmaktadır. İnsan gözü doğası gereği 3B görür. Uykulu ve yorgun bir durumda görebilme yeteneğinin boyut kaybedeceğini iddia ederek bu çalışmaya odaklandık.

## SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede, rastgele 2B ve 3B parçalardan oluşan videoyu izlemenin korteksin nöral aktivitesini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu çalışmanın özelliklerinden biri, tek akışlı anaglif video kullanarak kararlı-durum analiz sınıflandırmasını yapmaktır. Öte yandan, bu geçişlerde özellikle baskın zaman aralıkları göz önüne alındığında, farklı frekans bantları ve beyin lobları için beyin aktivitesi analiz edilmiştir. Spektrogram grafikleri yorumlanarak, kararlı-durum analizinde beyin sinyallerinin GSY'si delta bandında belirgin olduğu görülmüştür. Seçilen banttın sınıflandırma algoritmalarının performansını artırmak için uygun öznitelikler çıkarılarak hedefe ulaşılması amaçlanmıştır. Hjorth parametreleri ve DAA sınıflandırma tekniğinin genel olarak temporal ve frontal loblarda umut verici sonuçlar verdiği dikkate değerdir.

Bu çalışma, yorgun bireylerde kapsamlı olarak yapıldığında, uykuya dalma anının erken teşhisinde ışık tutacağı umulmaktadır. Farklı öznitelik çıkarma ve sınıflandırma tekniklerini kullanarak geçiş anı profesyonel videolarda analiz edilebilir. 2B\_3B ve 3B\_2B geçiş analizinin sınıflandırma sonuçları derin öğrenme algoritmaları kullanılarak geliştirilebilir.

## Etik Beyanı (Ethics Statement)

Bu çalışma 24.09.2019 tarihinde kabul edilmiş olan Negin MANSOURI'nin (Negin MELEK) İki ve Üç Boyutlu Videoları İzlerken Kaydedilen EEG Sinyallerinin Karşılaştırılması ve Sınıflandırılması başlıklı Doktora tezinden üretilmiştir. Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmed, S.M., and Abbas, S.N., 2015, "A New EEG Acquisition Protocol for Biometric Identification Using Eye Blinking Signals", *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, Sayı 7, ss. 48.
- Al-Qazzaz, N.K., Ali, S.H.B.M., Ahmad, S.A., Chellappan, K., Islam, M.S., and Escudero, J., 2014, "Role of EEG as biomarker in the early detection and classification of dementia", *TheScientificWorldJournal*, Sayı 2014, ss. 906038.
- Belyavin, A., and Wright, N.A., 1987, "Changes in electrical activity of the brain with vigilance" *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Sayı 66, ss. 137-144.

- Chen, C., Li, K., Wu, Q., Wang, H., Qian, Z., and Sudlow, G., 2013, "EEG-based detection and evaluation of fatigue caused by watching 3DTV", *Displays*, Sayı 34, ss. 81–88.
- Chen, C., Wang, J., Li, K., Wu, Q., Wang, H., Qian, Z., and Gu, N., 2014, "Assessment visual fatigue of watching 3DTV using EEG power spectral parameters", *Displays*, Sayı 35, ss. 266–272.
- Coyle, D., Prasad, G., and McGinnity, T.M., 2005, "A Time-Frequency Approach to Feature Extraction for a Brain-Computer Interface with a Comparative Analysis of Performance Measures", 3141–3151 ss.
- Fischmeister, F.P.S., and Bauer, H., 2006, "Neural correlates of monocular and binocular depth cues based on natural images", *A LORETA analysis: Vision Research*, Sayı 46, ss. 3373–3380.
- Forrester, J. V., Dick, A.D., McMennamin, P.G., Roberts, F., Pearlman, E., Forrester, J. V., Dick, A.D., McMennamin, P.G., Roberts, F., and Pearlman, E., 2016, "Physiology of vision and the visual system," *The Eye*, ss. 269-337.e2.
- Han, Y., Lin, H.Y., and Chen, C., 2017, "SP-3 Visual Fatigue for Laser-Projection Light-Field 3D Display in Contrast with 2D Display", 2017 24th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD), ss. 9–12.
- Harris, F.J. (1987). Multirate FIR Filters for Interpolating and Desampling. In *Handbook of Digital Signal Processing*, (Elsevier), ss. 173–287.
- Hlawatsch, F., and Boudreaux-Bartels, G.F., 1992, "Linear and quadratic time-frequency signal representations", *IEEE Signal Processing Magazine*, Sayı 9, ss. 21–67.
- Hostovecký, M., and B, B., 2017, "Brain activity: beta wave analysis of 2D and 3D serious games using EEG", *JAMSI*, Sayı 13.
- Houmani, N., Vialatte, F., Gallego-Jutglà, E., Dreyfus, G., Nguyen-Michel, V.-H., Mariani, J., and Kinugawa, K., 2018, "Diagnosis of Alzheimer's disease with Electroencephalography in a differential framework", *PLOS ONE*, Sayı 13, ss. e0193607.
- Idoo, (2019, December 30). Easiest Video Editing Software Free Download, (n.d.). <http://www.idooeditor.com/>
- IQmango, (2019, December 30). Download Free 3D Video Converter - Convert 2D to 3D | IQmango Free Software, (n.d.). [http://iqmango.com/3DVideo\\_Converter.html](http://iqmango.com/3DVideo_Converter.html)
- Jap, B.T., Lal, S., Fischer, P., and Bekiaris, E., 2009, "Using EEG spectral components to assess algorithms for detecting fatigue", *Expert Systems with Applications*, Sayı 36, ss. 2352–2359.
- Jeong, H.-G., Ko, Y.-H., Han, C., Oh, S.-Y., Park, K.W., Kim, T., and Ko, D., 2015, "The impact of 3D and 2D TV watching on neurophysiological responses and cognitive functioning in adults", *The European Journal of Public Health*, Sayı 25, ss. 1047–1052.
- Jeong, J., 2004, "EEG dynamics in patients with Alzheimer's disease", *Clinical Neurophysiology*, Sayı 115, ss. 1490–1505.
- Kayikcioglu, T., Maleki, M., and Eroglu, K., 2015, "Fast and accurate PLS-based classification of EEG sleep using single channel data", *Expert Systems with Applications*, Sayı 42, ss. 7825–7830.
- Khairuddin, H.R., Malik, A.S., Member, S., Mumtaz, W., Kamel, N., Member, S., and Member, L.X., 2013, "Analysis of EEG Signals Regularity in Adults during Video Game Play in 2D and 3D", 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), ss. 2064–2067.
- Kim, J., Kim, Y., Hong, J., Park, G., Hong, K., Min, S.-W., and Lee, B., 2011, "A full-color anaglyph three-dimensional display system using active color filter glasses", *Journal of Information Display*, Sayı 12, ss. 37–41.
- Kim, S., and Kim, D., 2012, In press, Differences in the Brain Waves of 3D and 2 . 5D Motion Picture Viewers: ArXiv Preprint ArXiv:1210.2147,.
- Kober, S.E., Kurzmann, J., and Neuper, C., 2012, "Cortical correlate of spatial presence in 2D and 3D interactive virtual reality: An EEG", study: *International Journal of Psychophysiology*, Sayı 83, ss. 365–374.

- Lenc, T., Keller, P.E., Varlet, M., and Nozaradan, S., 2018, "Neural tracking of the musical beat is enhanced by low-frequency sounds", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Sayı 115, ss. 8221–8226.
- Li, X., Chen, X., Yan, Y., Wei, W., Wang, Z., Li, X., Chen, X., Yan, Y., Wei, W., and Wang, Z.J., 2014, "Classification of EEG Signals Using a Multiple Kernel Learning Support Vector Machine", *Sensors*, Sayı 14, ss. 12784–12802.
- Lianyang Li, Pagnotta, M.F., Arakaki, X., Tran, T., Strickland, D., Harrington, M., Zouridakis, G., Li, L., Pagnotta, M.F., Arakaki, X., Tran, T., Strickland, D., Harrington, M., Zouridakis, G., Member, S., and Subjects, A., 2015, "Brain Activation Profiles in mTBI: Evidence from Combined Resting-State EEG and MEG Activity", *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, ss. 6963–6966.
- Lin, Y.-P.P., Wang, C.-H.H., Wu, T.-L.L., Jeng, S.-K.K., and Chen, J.-H.H., 2008, "Support vector machine for EEG signal classification during listening to emotional music", ss. 127–130.
- Malik, A.S., Khairuddin, R.N.H.R., Amin, H.U., Smith, M.L., Kamel, N., Abdullah, J.M., Fawzy, S.M., and Shim, S., 2015, "EEG based evaluation of stereoscopic 3D displays for viewer discomfort", *BioMedical Engineering OnLine*, Sayı 14, ss. 21.
- Manshouri, N., and Kayikcioglu, T., 2019, "A Comprehensive Analysis of 2D&3D Video Watching of EEG Signals by Increasing PLSR and SVM Classification Results", *The Computer Journal*.
- Manshouri, N., Maleki, M., and Kayıkçıoğlu, T., 2017, "Classification of Human Vision Discrepancy during Watching 2D and 3D Movies Based on EEG Signals", *International Journal of Computer Science and Information Security*, Sayı 15, ss. 430–436.
- Manshouri, N., Maleki, M., and Kayikcioglu, T., 2020, "An EEG-based stereoscopic research of the PSD differences in pre and post 2D&3D movies watching", *Biomedical Signal Processing and Control*, Sayı 55.
- Minchev, Z., 2013, "2D vs 3D Visualization and Social Networks Entertainment Games: A Human Factor Response Case Study", ss. 107–113. In Springer, Berlin, Heidelberg.
- Mumtaz, W., Xia, L., Malik, A.S., Member, S., Azhar, M., and Yasin, M., 2013, "EEG Classification of Physiological Conditions in 2D / 3D Environments Using Neural Network", *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Sayı 1, ss. 4235–4238.
- Neto, E., Biessmann, F., Aurlien, H., Nordby, H., and Eichele, T., 2016, Regularized linear discriminant analysis of EEG features in dementia patients: *Frontiers in Aging Neuroscience*, Sayı 8.
- Nityananda, V., and Read, J.C.A., 2017, "Stereopsis in animals: evolution, function and mechanisms.", *The Journal of Experimental Biology*, Sayı 220, ss. 2502–2512.
- Oh, S.-H., Lee, Y.-R., and Kim, H.-N., Forthcoming, 2014, "A Novel EEG Feature Extraction Method Using Hjorth Parameter", Sayı 2, ss. 106–110.
- Patterson, R., 2007, "Human factors of 3-D displays", *Journal of the Society for Information Display*, Sayı 15, ss. 861.
- Preuß, M., Preiss, S., Syrbe, S., Nestler, U., Fischer, L., Merckenschlager, A., Bertsche, A., Christiansen, H., and Bernhard, M.K., 2015, "Signs and symptoms of pediatric brain tumors and diagnostic value of preoperative EEG", *Child's Nervous System*, Sayı 31, ss. 2051–2054.
- Ramadan, M.Z., Alhaag, M.H., Abidi, M.H., Ramadan, M.Z., Alhaag, M.H., Abidi, M.H., and Haider Abidi, M., 2017, "Effects of Viewing Displays from Different Distances on Human Visual System", *Applied Sciences*, Sayı 7, ss. 1153.
- Ramos-Aguilar, R., Olvera-López, J.A., and Olmos-Pineda, I., 2017, "Analysis of EEG Signal Processing Techniques Based on Spectrograms", *Research in Computing Science*, Sayı 145.
- Rémi, J., 2009, "The role of EEG in epilepsy: A critical review", *Epilepsy & Behavior*, Sayı 15, ss. 22–33.
- Salai Selvam, V., and Shenbaga Devi, S., 2015, "Analysis of Spectral Features of EEG signal in Brain Tumor Condition", *MEASUREMENT SCIENCE REVIEW*, Sayı 15.

- Smith, S.J.M., 2005, EEG in the diagnosis, "classification, and management of patients with epilepsy", *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, Sayı 76 Suppl 2, ss. ii2-7.
- Subasi, A., 2005, "Automatic recognition of alertness level from EEG by using neural network and wavelet coefficients", *Expert Systems with Applications*, Sayı 28, ss. 701-711.
- Subha, D.P., Joseph, P.K., Acharya U, R., and Lim, C.M., 2010, "EEG Signal Analysis: A Survey", *Journal of Medical Systems*, Sayı 34, ss. 195-212.
- Teplan, 2002, {Fundamentals of EEG measurement}: *Measurement Science Review*, Sayı 2.
- Ting, S., Tan, T., West, G., Squelch, A., and Foster, J., 2011, "Quantitative assessment of 2D versus 3D visualisation modalities", *2011 Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, ss. 1-4.
- Voiculescu, M., Segarceanu, A., Negutu, M., Ghita, I., Fulga, I., and Oa, C., 2015, "The effect of caffeine on cerebral asymmetry in rats", *Journal of Medicine and Life*, Sayı 8, ss. 476-482.
- Wang, Q., Sourina, O., and Nguyen, M.K., 2010, "EEG-Based 'Serious' Games Design for Medical Applications", *2010 International Conference on Cyberworlds*, ss. 270-276.
- Xilisoft (2019, December 30). Xilisoft 3D Video Converter - 3D converter, convert to 3D video, (n.d.). <http://www.xilisoft.com/3d-video-converter.html>
- Zhu, J., Zhang, E., and Rio-Tsonis, K. Del, Forthcoming, Eye Anatomy:
- Zou, B., Liu, Y., Guo, M., and Wang, Y., 2015, "EEG-Based Assessment of Stereoscopic 3D Visual Fatigue Caused by Vergence-Accommodation Conflict", *Journal of Display Technology*, Sayı 11, ss. 1076-1083.
- Zwezdockhina, N., and Antipov, V., 2018, "The EEG Activity during Binocular Depth Perception of 2D Images", *Computational Intelligence and Neuroscience*, Sayı 2018, ss. 1-7.
- 3DN3D, (2019, March 6) 3D Video Chain Saw! - YouTube, n.d. <https://www.youtube.com/watch?v=foQNrtUsEjw>



## TAŞIT TAMPONLARINDA KULLANILAN POLİMER MALZEMELERİN FARKLI HIZLARDA ABSORBE EDİLEN ENERJİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Ercan ŞİMŞİR , <sup>2</sup>İbrahim YAVUZ , <sup>3</sup>Mustafa Çağdaş ERİK 

<sup>1,2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü. Afyon, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, TÜRKİYE

<sup>1</sup>esimsir@aku.edu.tr, <sup>2</sup>iyavuz@aku.edu.tr, <sup>3</sup>mustafacagdas18@gmail.com

(Geliş/Received: 04.05.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.09.2021)

**ÖZ:** Günümüzde otomotiv alanındaki gelişmeler, taşıt sayısının artışı ile birlikte taşıt güvenliğini ön plana çıkarmıştır. Otomotiv sektörü daha çok yüksek güvenlik düzeylerine sahip, yakıtı az tüketen otomobillerin geliştirilmesi ve maliyeti düşük üretim yöntemlerine odaklanmaktadır. Bu durumların gerçekleştirilebilmesi için uygun tasarım, hafif ve darbe sönümleme özelliği iyi olan malzemelerin kullanımı ile oluşturulacaktır. Taşıtta polimer malzemelerin kullanımı her bölgede olduğu gibi araç ön tamponunda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada iki farklı aracın ön tamponlarında kullanılan polimer malzemelerin farklı hızlardaki darbe absorbeleri araştırılmıştır. Araçlara ait ön tampon malzemeleri ASTM-D-7136 standardına uygun test edilmiş ve verileri değerlendirilmiştir. Araç ön tampon darbe testleri 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile absorbe edilen enerji-uzama, gerilme-yer değiştirme ve hız-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda; H aracına ait ön tampon malzemesinin farklı hızlardaki darbe sönümleme kabiliyetinin F aracına ait ön tampon malzemesinden daha iyi olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Ön tampon, polimer malzeme, darbe test, enerji absorbe

### Comparison of Energies Absorbed at Different Speeds of Polymer Materials Used in Vehicle Bumpers

**ABSTRACT:** Today, developments in the automotive field have brought vehicle safety to the fore with the increase in the number of vehicles. The automotive sector focuses on the development of cars with high safety levels, low fuel consumption and low cost production methods. In order to realize these situations, the appropriate design will be created by the use of materials that are lightweight and have good impact absorption. The use of polymer materials in the vehicle is widely used in the front bumper of the vehicle, as in every region. In this study, the impact absorption rates of the polymer materials used in two different front bumpers were investigated. Samples from the front bumpers belonging to the vehicles in accordance with the ASTM-D-7136 standard were tested and their data were evaluated. Vehicle front bumper tests were conducted at speeds of 3 m / sec, 5 m / sec and 10 m / sec. Energy-strain, stress-displacement and velocity-time graphs were created with the data obtained. In the tests, it was seen that the front bumper material of the H vehicle has better impact absorption ability at different speeds than the front bumper material of the F vehicle.

**Key Words:** Front bumper, polymer material, impact test, energy absorption

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde son zamanlarda sanayinin gelişmesiyle ve artan nüfusla beraber motorlu taşıtların kullanım oranında hızla artmaktadır. Taşıtların kullanımının artması Dünya’da son zamanlarda çevresel problemleri ön plana çıkarmaktadır. Taşıtlardan kaynaklanan çevresel problemler egzoz emisyon salınım oranlarıdır. Taşıtların yakıt tüketiminin dünya politikasının en önemli konularından biri olması, yakıt ihtiyacının artması, doğal gaz ve petrol gibi yakıtların fiyatının artması, yakıt tüketiminin çevreye verdiği zararların artması ile birlikte otomotiv sanayisi taşıtların ağırlığının azaltılmasına yönelmektedir. Kurumsal ortalama yakıt ekonomisine (CAFE) göre otomobil ağırlığının %10 oranında azalmasıyla yakıt tüketiminde yaklaşık olarak %6-8 oranında tasarruftan avantaj sağlanmaktadır (Dönmez ve Boran 2016; Özen ve diğ. 2012). Otomobil ağırlıkları azaltılabilirse yakıt verimliliği artar ve karbondioksit emisyon değeri azaltılarak çevresel etkiler de azaltılır. Taşıtların ağırlıklarının 100 kg azalması ile, 100 km’ de 0,35 litre yakıt ve 8,4 g/km CO<sub>2</sub> oranında tasarruf sağlanarak çevre ve ekonomik olarak kazanç sağlanmış olur (Goede ve diğ. 2009).

Taşıtlarda yakıt ekonomisi ve emisyon önemli konu olmasına karşın güvenlikten ödün vermeden taşıtlarda hafifletmeye izin verilmektedir. Çünkü tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de her yıl çok sayıda insan trafik kazalarında hayatını kaybetmektedir. Otomobil sayılarının artması ile birlikte kaza sonucunda ölüm ve yaralanmalar bu doğrultuda artmaktadır.

Dünya’da motorlu taşıtların sayısı 2010 yılında 939 milyon adet iken 2020 yılında 316 milyon artarak 1 milyar 255 milyon adede yükselmiştir. Ülkemizde ise motorlu taşıtların kullanımı (TÜİK 2010) verilerine göre 15 milyon 95 bin 603 adet iken bu sayı 6 milyon 116 bin 98 adet artış ile günümüzde 21 milyon 211 bin 701 sayısına ulaşmıştır. Trafikte en çok karşılaşılan kaza türlerinden biri önden çarpışma kazalarıdır. Bu kazalar iki aracın birbiriyle önden çarpışması şeklinde olabileceği gibi, duran bir cisme çarpması şeklinde de gerçekleşmektedir. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ve Emniyet Genel Müdürlüğü’nün (EGM) ortak yaptığı çalışmada 2020 Temmuz verilerine göre Türkiye’de meydana gelen toplam trafik kaza sayısı 195765 olup, karşılıklı çarpışmada meydana gelen kaza sayısı 4727, arkadan çarpışmada meydana gelen 8543, duran araca ve park etmiş araca çarpışma sonucu meydana gelen kaza sayısı ise 1723’dür. Aynı çalışmadaki verilere göre, çarpışmalı kaza durumlarında toplam 986 kişi hayatını kaybetmiş ve 77567 kişi de yaralanmıştır (EGM 2020). Dolayısıyla taşıtların sayılarının artması ile birlikte taşıtların güvenliği de daha çok ön plana çıkmaktadır. Bu güvenlik sistemleri pasif ve aktif olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Aktif güvenlik sistemi, sürücünün kazadan uzaklaşması için taşıtların frenleme ve kontrol kabiliyetlerini artıracak şekilde bilgi sistemleri ve kaza olasılığını hissedip aracı bu durumdan çıkaracak bir şekilde devreye giren algoritmalar içerir. Pasif güvenlik sistemleri ise, kaza ile karşılaşılması durumunda, meydana gelecek olumsuz etkileri azaltmak amacıyla araç üzerindeki malzeme değişikliği ve iyileştirmeler gibi tasarım önlemleridir (Öztürk ve diğ. 2014). Otomobil parçalarının ağırlığının azaltılması, yapının optimizasyonu, bileşenlerin işlevselliğinin iyileştirilmesi ve hafif malzeme kullanılmasıyla sağlanabilir (Bai ve diğ. 2017; Liu ve diğ. 2013; Hou ve diğ. 2018).

Plastik (Polimer) malzemeler dünyada milyonlarca ton, ülkemizde ise bir milyon ton civarında tüketimleri ile önemli malzemeler arasında yer alır. Plastik (polimer) işleme sektörü üretilen ürün farklılığı ve günlük hayatımızda karşılaştığımız ürünler ile ekonomik ve teknik düzeyde önemli sektör haline gelmiştir (Şen ve diğ. 2020). Otomotiv sektöründe bulunan firmaların, taşıtların absorbe enerji verimliliği, hafifletilmesi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması konularına ağırlık vermeleriyle birlikte otomotiv sektöründe polimer malzeme kullanımı artmaktadır. Polimer malzeme kullanımı ile taşıtların ön tamponun daha hafif olması ve darbe sönümleme kabiliyetinin gelişmesi sağlanacaktır.

Otomotiv sektöründe güvenlik en önde gelen özelliklerdendir. Bunun yanı sıra yakıt, performans, dayanım ve maliyet gibi özellikler de üretimden pazarlamaya kadar geçen sürede her zaman dikkat edilen kriterdir. Tüm unsurlar göz önünde alındığında otomotiv sektöründe günümüz teknolojisi için polimer malzemelerin kullanımı giderek hız kazanarak yaygınlaşmaya devam etmektedir (Gülmez 2018).

Polimerler kolay şekil almaları, düşük üretim maliyetleri ve amaca uygun üretilebilmeleri dolayısıyla her alanda yaygınlaşmıştır. Gelişmekte ve gelişmiş olan ülkelerde polimer malzeme

teknolojisinin büyüme hızı %10' dan fazladır. Önümüzdeki yıllarda dünyada yıllık polimer malzeme üretimi 300-400 milyon ton olması ve birçok uygulamalarda diğer malzemelerinin yerine alternatif olarak kullanılması beklenmektedir (Gülmez 2018).

Polimerlerin mekanik özellikleri farklı katkı oranları ile değiştirilebilmektedir. Erem ve Gökkurt, EPDM (etilen-propilen-dien monomer), çekirdeklenme ajanları ve antioksidanların kullanımı ile elde edilen harmanların, mekanik, termal ve morfolojik özelliklerini incelenmiş ve detaylı şekilde irdeleyerek orijinal hammadde yerine kullanım uygunluğunu araştırmışlardır. Çalışmaları sonunda, kullanılan katkı maddeleri ile mekanik özelliklerin değiştiğini gözlemlemişlerdir (Erem ve Gökkurt 2021).

Otomotiv sanayisinde kullanılan polimer oranı kütle bakımından araç başına yaklaşık olarak %12' dir. Yani araçta bulunan polimer miktarı 114 kg'dır (Hamamcı ve diğ. 2018). Otomotiv sanayisinde ve diğer alanlarda kullanılan plastik malzemeler herhangi bir şekilde, cismin dışarıdan müdahalesi sonucu darbeye maruz kalabilir. Herhangi bir araç karayolunda giderken yola aniden çıkan hayvan, yaya vb. engele çarpması sonucunda ön tamponlarda hasar oluşabilir (Erik 2019).

Malzemenin yüzeyine gelen darbenin şiddetini ölçen birçok darbe test cihazı ve yöntemi vardır. Yapı veya malzeme yüzeyine gelen darbeler başlıca yüksek hızlı veya düşük hızlı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Düşük hızlı darbede darbe hızı 1 ile 10 m/s arasında değişmektedir (Mili ve Necib 2001). Bazen düşük hızda darbeler düşük enerjili darbe olarak da adlandırılmaktadır. Yüksek hızlı darbe ise 10 m/s ve üzeri bir hıza sahiptir. Yüksek hızlı darbeler balistik limitte olan darbelerdir. Deneysel olarak yüksek darbe hızı ortalama 74,1 m/s'ye kadar hız olarak belirlenmiştir (Jeng ve Mo 1996). Bir uçağın havaalanına inmesi veya havalanması sırasında, uçak gövdesine taş parçasının çarpmasını yüksek hızlı darbeye örnek verebiliriz. Agrawal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, fiber ile güçlendirilmiş polimer matrisli kompozit bir malzemede darbe kuvvetinin oluşturduğu etkinin geniş bir alandaki davranışını incelemişlerdir (Agrawal ve diğ. 2014). Benzer bir çalışmada ise bazı polimer kompozit malzemelerin balistik darbe verimliliği deneysel olarak incelemişlerdir (Fındık ve Tarım 2003).

Yapılan bu çalışmada, düşük hızlarda darbe testleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı aracın pasif güvenlik sistemlerinden tamponlarından alınan numuneler üzerinde düşük hızlarda (3, 5, 10 m/sn) darbe testleri yapılarak, polimer tampon malzemesinin darbe absorbesine etkisi araştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Yapılan çalışmada iki farklı aracın ön tamponundan 100 x 100 mm ölçülerinde kare kesit alınarak numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin boyutları ASTM 3763-02 standardına göre hazırlanmıştır. Çalışmada serbest ağırlık düşürme prensibine göre çalışan Şekil 1' de gösterilen Instron-Dynatup 9250 HV darbe cihazı kullanılmıştır. Test cihazının vurucu ucu çelik yarım küre şeklinde olup 12,7 mm çapına sahiptir. Testte kullanılan vurucu uç ağırlığı 6,32 kilogramdır. Testler oda sıcaklığında (25 °C) gerçekleştirilmiştir. Darbe test cihazı ile ek ağırlık konulmadan yay desteği ile 2,6 J-826 J arasında, ek ağırlık ilave edilerek 1603 J değerlerine kadar darbe testi yapılabilir. Darbe sonrasında vurucu ucun sıçrayıp tekrar numuneye düşmesini engellemek için cihaz frenleme sistemi özelliğine sahiptir. Cihaz içerisinde pnömatik düzenek ile testler ankastre sınır şartlarında darbe testlerinin yapılması sağlanmıştır (Sayer 2009).

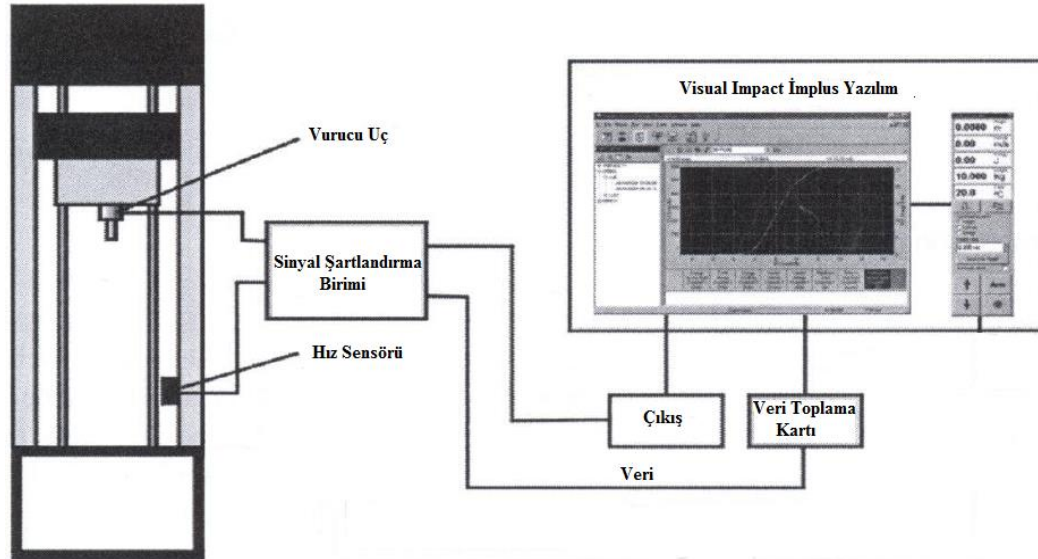




Şekil 1. Instron-Dynatup 9250 HV darbe dayanım test cihazı.

Figure 1. Instron-Dynatup 9250 HV impact strength tester.

Test cihazı, serbest ağırlık düşürme prensibine göre çalışan sistem kontrollü ve yüksek hızlı bir darbe cihazıdır. İmpuls sinyal koşullandırma birimine, impuls veri toplama kartına Visual Impact yazılım ile sistem kontrol özelliği sağlamaktadır. Darbe sonrasında vurucu tarafından üretilen yük sinyalleri, sinyal koşullandırma ile yük verilerini veri toplama kartına iletilir. Bu verileri yazılıma aktararak darbe sonuçlarını düzenleyerek ayrı ayrı veya toplu tablo ve grafik olarak elde edilmesini ve hesap yapılabilmesini sağlar. Sistem blok diyagramı Şekil 2' de görüldüğü gibidir (Sayer 2009).



Şekil 2. Darbe test cihazı sistem blok diyagramı (Sayer 2009).

Figure 2. Impact tester system block diagram (Sayer 2009)

#### Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

Testlerde kullanılan malzemeler ile kalınlıkları Çizelge 1' de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.** Malzemelerin kalınlık gösterimi*Table 1. Thickness representation of materials*

Deney Numunesi	F Araç Tamponu	H Araç Tamponu
Kalınlık (mm)	3 mm	3 mm

Darbe testlerinde kullanılacak olan malzemeler 100 x 100 mm boyutlarında kıl testere yardımı ile kesilerek hazırlanmıştır. İki araç tipinden 3 farklı hızda ve her hız için 3 numuneden elde edilen verilerin ortalaması alınarak deney verileri düzenlenmiştir. Araçların tampon malzemesinin EPDM (Etilen propilen) ve PP (Polipropilen) olduğu tamponların etiket üzerindeki bulunan kısaltmalardan tespit edilmiştir. Tampon malzemelerinin özellikleri Çizelge 2' de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Deneyde kullanılan ön tampon malzemelerinin özellikleri*Table 2. Properties of the front bumper materials used in the test.*

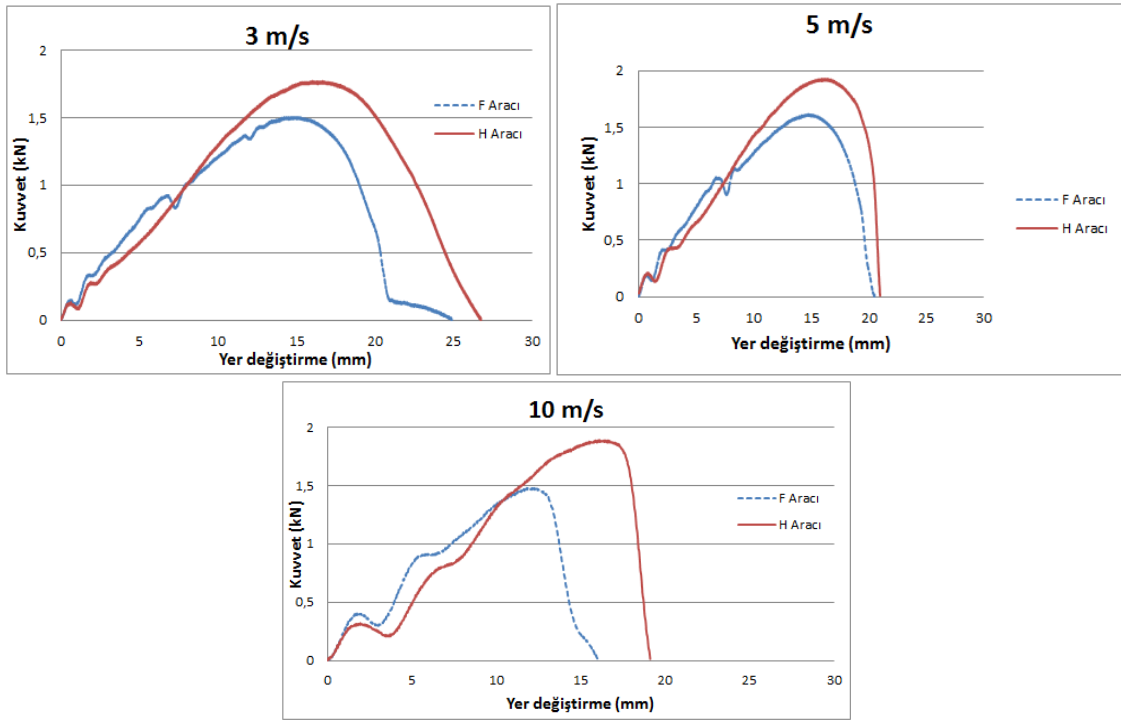
Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (MPa)	Sertlik A	Kopma Mukavemeti (MPa)
PP	0,9	6	1325	70	34
EPDM	1,4	300	1210	60	5

## BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

İki farklı araca ait ön tampon polimer malzemelerin darbe testleri; 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn olmak üzere üç farklı hız için yapılmıştır. Bu hızlardaki absorbe edilen enerji-uzama, kuvvet-yer değiştirme ve hız-zaman grafikleri incelenmiştir. Yapılan testlerin tamamı 25°C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

### Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiklerinin İncelenmesi (Analysis of Force-Displacement Plots)

Yapılan darbe testlerinde genellikle numunelerde delinme, saplanma ve geri sekme olmak üzere üç tip hasar oluşmaktadır. Darbe kuvvetinin artmasıyla birlikte eğriler açık tip ve kapalı tip eğri olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 3' de gösterilen ölçümlerde vurucu uç malzemeye temas ettiği andaki kuvvetler dikkate alınmıştır. Darbe enerjisinin oluşturduğu kuvveti sönmüleyerek uzayan deney numuneleri H ve F tipi taşıtlardır.



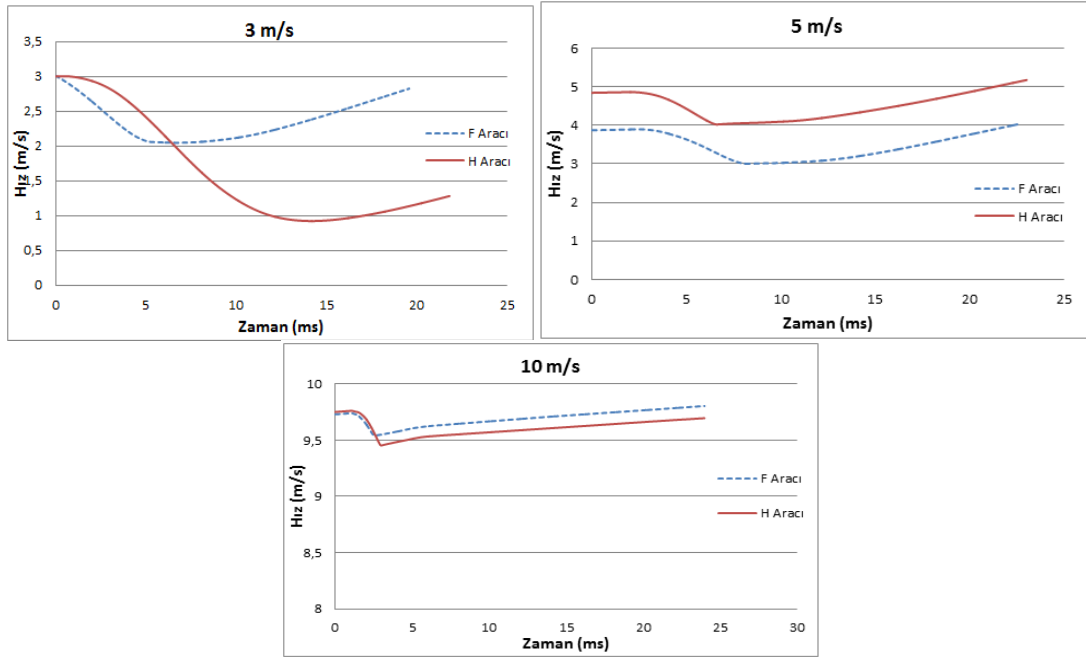
**Şekil 3.** Teste tabi tutulan F ve H taşıtların farklı hızlardaki kuvvet/yer değiştirme grafikleri.

*Figure 3.* Force-displacement graphs of the tested F and H vehicles at different speeds.

Her iki ön tampon için yapılan test sonucunda, 3 m/sn, 5 m/sn, 10 m/sn hızlarda ön tampon polimer malzemesinde vurucu uç malzemeyi delip geçmesinden dolayı açık tip eğri oluşmuştur. Yapılan testlere göre H aracına ait ön tampon polimer malzemesinin darbe direncinin F aracına ait ön tampon polimer malzemesine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yer değiştirme değerleri ise sırayla H tipi araçta 26,73 mm ve F tipi araçta ise 20,47 mm'dir. Kuvvet-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde, grafiğin altında kalan alan sönmölen enerjiyi vereceğinden en iyi malzeme tipi H taşıta ait olan malzeme olarak değerlendirilebilir. Aynı zaman da H taşıtta kullanılan ön tampon polimer malzemenin F taşıtta kullanılan polimer malzemeye göre daha fazla absorbe yeteneğinin olduğu da görölmektedir.

#### **Taşıtlara ait Hız-Zaman Grafiklerinin İncelenmesi (Investigation of Speed-Time Graphics for Vehicles)**

Polimer içrikli ön tampon kompozit malzemelere uygulanacak darbeye karşı dayanımını görmek için yapılan darbe testinde iki farklı H ve F tipi araçların ön tamponları farklı hızlarda test edilmiştir. 3 m/sn, 5 m/sn, 10 m/sn hızlar için elde edilen hız-zaman grafikleri Şekil 4' de gösterilmiştir.



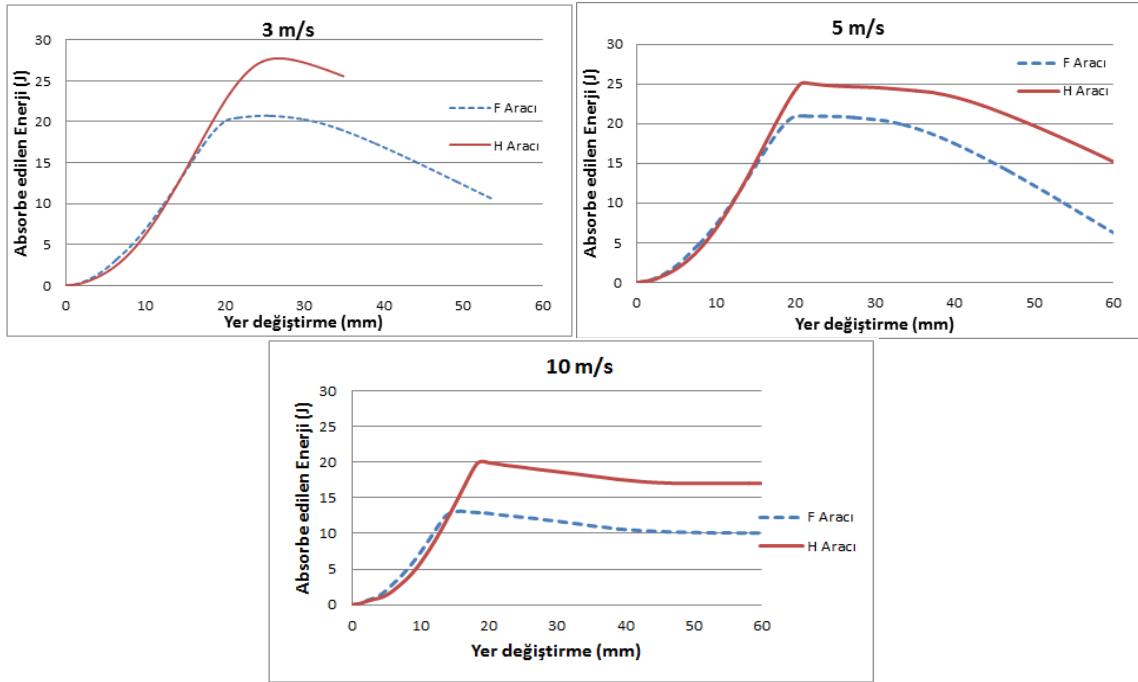
Şekil 4. Teste tabi tutulan F ve H taşıtların farklı hızlardaki hız/zaman grafikleri.

Figure 4. The velocity-time graphs of the tested F and H vehicles at different speeds.

Uygulanan darbe enerjisi altında iki farklı malzeme özelliklerine sahip ön tamponların 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlarında her iki araçta da delip geçme davranışı görülerek vurucu uç polimer malzemeye saplanmıştır. Sürtünmeden dolayı ön tampon malzemesinin kalınlığı boyunca hız yavaşlamıştır. Bunların sonucunda geri sekme davranışı meydana gelmediği için Şekil 4' de gösterildiği gibi H ve F tipi araçların eğrileri pozitif bölgededir. H taşıta ait ön tampon polimer malzemesi 3 m/s' lik hızı 1 m/s' hıza, 5 m/s' lik hızı 4 m/s' hıza, 10 m/s' lik hızı ise 9,5 m/s' hıza kadar düşürmüştür. F taşıta ait ön tampon polimer malzemesi ise 3 m/s' lik hızı 2 m/s' hıza, 5 m/s' lik hızı 3 m/s' hıza, 10 m/s' lik hızı ise 9,6 m/s' hıza kadar düşürmüştür. Dolayısıyla H taşıta kullanılan ön tampon polimer malzemesinin F taşıttan daha iyi olduğu görülmüştür.

#### Absorbe Edilen Enerji-Yer değiştirme Grafiklerinin İncelenmesi (Analysis of Absorbed Energy-Displacement Plots)

Şekil 5' de F ve H taşıtların ön tampon malzemelerinde 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlarında delinme meydana geldiği görülmektedir. H aracının 3 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı 27,75 J, 5 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı 25,16 J ve 10 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı ise 20,12 J' dür. F aracının 3 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı 20,94 J, 5 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı 20,74 J ve 10 m/sn hızda absorbe ettiği enerji miktarı ise 13,12 J' dür. Üç farklı hızda yapılan testler sonucunda H taşıta kullanılan ön tampon polimer malzemenin F taşıttan daha sünek bir malzeme olduğu ve darbe enerjisini daha fazla absorbe ettiği görülmektedir. Dolayısıyla EPDM ve PP malzeme karışım oranları arttıkça taşıtların ön tampon malzemelerindeki enerji absorbe etme kabiliyetlerinde artışı söylenebilir. Her iki taşıtların 3 m/sn ve 5 m/sn hızlardaki deneylerinde vurucu ucun malzemeye saplanması görülmüştür bu durum absorbe ettiği enerji miktarlarından da görülmektedir. 10 m/sn hızda ise malzeme dayanamayıp delindiği ve daha az enerji absorbe ettiği görülmektedir.

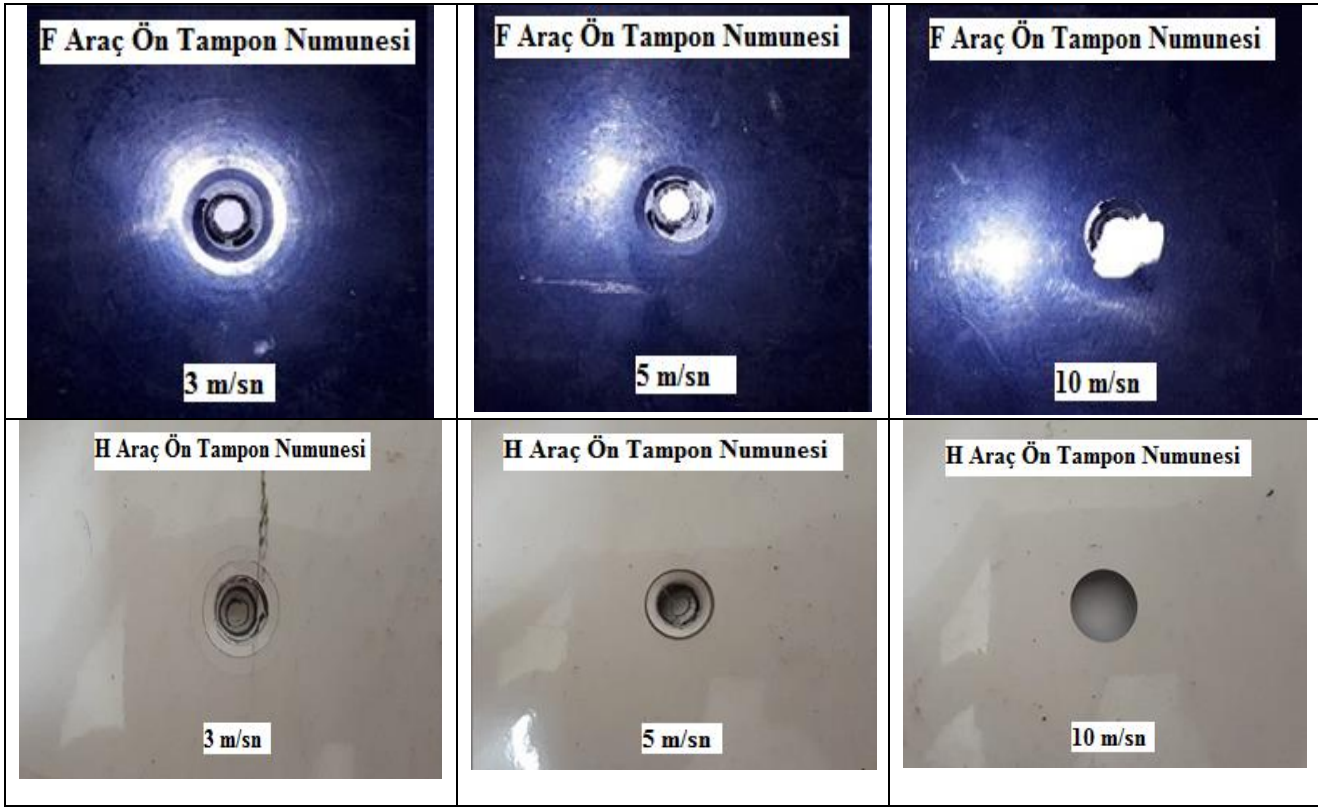


**Şekil 5.** Teste tabi tutulan F ve H taşıtların farklı hızlardaki absorbe edilen enerji/yer değiştirme grafiği.

*Figure 5. The energy-displacement graph of the F and H vehicles subjected to the test at different speeds.*

Yapılan çalışma sonunda Özkurt'un yapmış olduğu çalışmaya benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Özkurt çalışmasında; Absorbe edilen enerji- yer değiştirme eğrileri için vurucu ucun malzeme yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucu ucun sahip olduğu enerjinin tamamı malzeme tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen enerjisi de vurucu ucun malzeme yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucu ucun malzemeye saplanması durumunda, vurucu ucun sahip olduğu darbe enerjisinin tamamı malzeme tarafından absorbe edilir. Vurucu ucun malzemeyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu uç ile malzeme arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanında program tarafından hesaplanan sönümlenen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarıya doğru yönlendiği görülür (Özkurt 2003).

F ve H tipi taşıtlarda kullanılan ön tampon polimer malzemelerine 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlarında yapılan testler sonucunda ön tampon malzemelerinde oluşan darbe hasarları Şekil 6' da gösterilmiştir. F aracın, 3 m/sn ve 5 m/sn hızda darbe yüzeyinde ezilme, çatlama ve malzeme hasarı görülürken, hız 10 m/sn çıktığında yüzeyde ayrılma ve kırılma meydana gelmiştir. H aracında ise, aynı hızlarda F taşıta göre benzer hasarlar olduğu görülmüştür. Şekil 6'daki hasar resimleri incelendiğinde H aracından alınan numunelerin yüzey hasarı daha az olarak görülmektedir.



Şekil 6. F ve H Araçların polimer ön tampon numunelerinde 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlarında oluşan darbe hasarları

Figure 6. Impact damage in polymer front bumper samples of F and H vehicles at 3 m / sec, 5 m / sec and 10 m / sec velocities.

## SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Otomobillerin ön tamponları pasif güvenlik sistemleri içerisinde önemli parçalardan biridir. Yapılan çalışmada polimer ön tampon malzemesine gelen darbe enerjilerinin absorbe kabiliyetleri incelenmiştir. Çalışmada 3 farklı darbe hızda ve 2 farklı otomobilin ön tampon malzemeleri kullanarak testler yapılmıştır. Testler 25°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda;

- Farklı hızlarda yapılan darbe testleri sonucunda H taşıtın kuvvet ve absorbe ettiği enerji kabiliyeti diğer F taşıtına göre daha iyi ön tampon malzemesinin olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise ön tampon malzemenin üretiminde kullanılan Etilen Propilen ve Polipropilen yoğunluk oranıdır. Türkmen ve Köksal yaptıkları çalışmada bunu doğrulamaktadır, malzemelerin yoğunluğunun artışı ile beraber absorbe ettiği enerji değeri lineer artış göstermekte ve absorbe edilen enerji değerinin de artmakta olduğunu belirtmişlerdir (Türkmen ve Köksal 2013).
- Ön tampon malzemesinin üretiminde kullanılan Etilen Propilen ve Polipropilen malzemelerin yoğunluk oranları tampon malzemesinin testlerde gevrek ve sünek kırılmasını etkilemiştir. Yapılan testler neticesinde elde edilen verilere göre, F taşıtında kullanılan ön tampon malzemesinin H taşıtına göre daha gevrek bir malzeme olduğu görülmüştür.
- Farklı hızlar altında her iki araç ön tampon malzemesinde delinme meydana gelerek açık tip eğri oluşmuştur. Testler sonucunda, Polimer malzemelerin tabaka kalınlığı arttıkça çökme değerinin azaldığı görülmektedir.
- Farklı ön tampon polimer malzemelerine sahip olan H ve F taşıtlarda 3 m/sn, 5 m/sn ve 10 m/sn hızlardaki darbe enerjisi F taşıt ön tampon malzemesinde meydana gelen çökme ve deformasyonun, H taşıtına göre fazla olduğu gözlenmiştir.
- H ve F taşıtlarında kullanılan ön tampon malzemesinin artan hızlarla darbe hasarları artmıştır.

- Yapılan testler esnasında vurucu ucun hızının en aza düşmesine sebep olan numune yine H taşıta ait olan ön tampon malzemedir. Böylelikle H taşıta ait tamponun herhangi bir kaza sırasında ön tampon malzemesine gelecek olan darbeleri absorbe iyi sönümleme kabiliyetine sahip olan polimer malzeme olduğu anlaşılmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agrawal, S., Singh, K. K., Sarkar, PK., 2014, "Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite", *Journal of Composite Materials*, Cilt 48 Sayı 1, ss. 317-332.
- Bai, J., Li, Y., Zuo, W., 2017, "Cross-sectional shape optimisation for thin-walled beam crashworthiness with stamping constraints using genetic algorithm" *Int J Vehicle Design*, Cilt 73, Sayı 1-3, ss. 76-95.
- Dönmez, Ç. A., Boran, S., 2016, "Doğal liflerin otomotiv sanayinde kullanımı", *Orman Fakültesi Dergisi*, Cilt 16 Sayı 1, ss.253-263.
- Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Başkanlığı <http://trafik.gov.tr/kurumlar/trafik.gov.tr/04-Istatistik/Aylik/temmuz20.pdf> (Erişim Tarihi: 12.03.2020).
- Erem, E., Gökkurt T., 2021, "Çekirdeklendirici Ajanlar, Uyumlaştırıcılar Ve Antioksidanların Geri Dönüştürülmüş Polipropilen Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 8,14, 1-22.
- Erik, N. Ç., 2019, "Otomotiv gövde imalatında kullanılan polimer malzemelerin enerji sönümleme yeteneklerinin incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Findik, F., Tarım, N., 2003, "Ballistic impact efficiency of polymer composites", *Composite Structures*, Cilt 61, Sayı 1, ss. 187-192.
- Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L., Kopp, G., Beeh, E., 2009, "Super light car – lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration", *Eur. Transp. Res. Rev.*
- Gülmez, S., 2018, "Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler", *Yüksek Lisans Projesi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Hamamcı, B., Çiftçi, M., Aktaş, T., 2018, "Yeşil kompozitlerde biyo polimerlerin kullanımının önemi", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, The Black Sea Journal of Sciences ISSN (Online): 2564-7377, Cilt 8, Sayı 1, ss. 12-24.
- Hou, W., Xu, X., Wang, H. L., 2018, "Tong Bending behavior of single hat-shaped composite T-joints under out-of-plane loading for lightweight automobile structures" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Cilt 37, Sayı12,ss. 808-823.
- Jenq, S T, Mo J J., 1996, "Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Cilt 34, Sayı 2, ss. 375-384.
- Liu, Q., Lin, Y., Zong, Z., G., Sun, Li, Q., 2013, "Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle" *Compos Struct*, Cilt 97, Sayı 1, ss. 231-238.
- Mili, F, Necib, B., 2001, "Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities", *Composite Structures*, Cilt 51, Sayı 3, ss. 237-244.
- Öztürk, İ., Kaya, N., Öztürk, F., 2014 "Otomobil ön tampon çarpışma simülasyonu ve optimizasyonu" 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, OTEKON 2014, Bursa, Turkey, 26-27 Mayıs 2014.
- Özen, E., Kızıldaş, A., Kızıldaş, E.E., Gardner, D.J., 2012 "Natural fiber blends filled engineering thermoplastic composites for automobile industry", *Proceedings of SPE Automotive Composites Conference & Exhibition (ACCE)*, (September 11-13), Troy, MI.
- Özkurt, Ş., 2003, "Hafif ticari araç tamponlarının bilgisayar destekli tasarımı", *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sayer, M., 2009, "Hibrit kompozitlerin darbe davranışının incelenmesi", *Doktora tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

- Şen, N., Őengöl, Ö., Uygur, İ., 2020, "Geri dönüşümü yapılmış PP ve ABS prototip malzemelerin bazı mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 8, Sayı 1, ss. 246-257.
- Türkmen, İ., Köksal, N.S., 2013, "Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde (ctp) elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi", C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, ISSN 1305-1385, Cilt 8, Sayı 2, ss.17-30.





## OFDM SİSTEMLERİNDE KANAL KESTİRİMİ İÇİN YENİ BİR UYARLAMALI PİLOT YERLEŞİM ALGORİTMASI

<sup>1</sup>Fatih AYVENLİ<sup>ID</sup>, <sup>2</sup>Çetin KURNAZ<sup>ID</sup>

<sup>1,2</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

<sup>1</sup>fatih.ayvenli@omu.edu.tr, <sup>2</sup>ckurnaz@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 21.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.09.2021)

**ÖZ:** Çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinden biri olan dikgen frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) sistemi, bant genişliğini etkin kullanarak yüksek hızlı veri haberleşmesine olanak sağlaması ve yankı gecikmelerine karşı dayanıklılığı nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. OFDM sisteminde gezgin iletim kanalının bozucu etkileri alıcıda kanal kestirimi yapılarak azaltılabilir. Bu çalışmada OFDM sistemi için kanalın yapısına göre uyarlamalı olarak değişebilen yeni bir pilot yerleşimli kanal kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma kanalın derin sönümlenmelerinin olduğu bölgelere daha sık pilot yerleştirilmesi temeline dayanmaktadır. Benzetim sonuçlarından, önerilen uyarlamalı kanal kestirim algoritmasının klasik kanal kestirim algoritmalarına göre daha iyi sonuç verdiği ve bit hata oranı (BHO) başarımında 11.6 dB'e varan bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Ayrıca literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada frekans düzleminde pilot sıklığının artırılacağı bölgelerin eşik seviyesini belirlemek için yeni bir matematiksel ifade önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** OFDM, Kanal kestirimi, Düzensiz pilot yerleşimi, Gezgin iletim kanalı.

### A Novel Adaptive Pilot Placement Algorithm for Channel Estimation in OFDM Based Systems

**ABSTRACT:** The orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system, which is one of the multi-carrier communication systems, has been widely used due to its ability to provide high-speed data communication using bandwidth effectively and its resistance to echo delays. In OFDM system, the disturbing effects of the wireless communication channel can be reduced by estimating the channel in the receiver. In this study, a novel channel estimation method with a pilot placement algorithm which can adaptively change according to the structure of the channel is proposed for the OFDM system. The proposed algorithm is based on placing the pilot signals more frequently in the regions with deep fading of the channel. From the simulation results, it is seen that the proposed adaptive channel estimation algorithm gives better results than the classical channel estimation algorithms, and provides an improvement of up to 11.6 dB in bit error rate (BHO) performance. In addition, unlike the studies in the literature, a new mathematical expression is proposed in the last part of the study to determine the threshold level of the regions where the pilot frequency will be increased in the frequency domain of channel.

**Key Words:** OFDM, Channel estimation, Irregular pilot placement, Mobile radio channel

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerinden biri olan dikgen frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) sistemi bant genişliğini etkin kullanması yüksek hızlı veri

haberleşmesine olanak sağlaması ve yankı gecikmelerine karşı dayanıklılığundan dolayı pek çok kablosuz haberleşme sisteminde kullanılmaktadır. OFDM sisteminde, yüksek bit hızlı veri daha düşük hızlı veriye dönüştürülerek sembol süresi uzatılır. Paralel veriye dönüştürülen her bir veri/sembol farklı bir alt taşıyıcı kullanılarak iletim kanalına iletilir. Alt taşıyıcı sayısı arttıkça sembol süresi en yüksek yankı gecikmesinden daha büyük olacağından semboller arası girişim (inter symbol interference, ISI) azaltılmış olur (Nee ve Prasad, 2000). Gezgin iletim kanalı zaman ve frekansta seçicilikli olduğundan kanaldan geçen veri alıcıya bozulmuş olarak ulaşır (Tang ve dig., 2007). Kanalin zaman ve frekans karakteristikleri bilindiğinde kanalın bozucu etkisi alıcıda düzeltilip verinin hatalı algılanma olasılığı azaltılır (Nee ve Prasad, 2000). OFDM sistemlerinde bit hata oranını (BHO) düşürmek için alıcıda demodülasyon aşamasından önce kanal kestirimini gerçekleştirilir. OFDM sisteminde kanal kestirim yöntemleri temel olarak üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; pilot tabanlı, kör ve yarı-kör kanal kestirim yöntemleridir. Pilot tabanlı kanal kestirim yöntemlerinde değeri bilinen bitler (pilot işaretler) iletilen sinyalin içine belirli aralıklarla yerleştirilir ve alıcıda bilinen değerleri ile karşılaştırılarak kanalın frekans karakteristiği elde edilir. Vericiden gezgin iletim kanalına gönderilen sinyal kanaldan geçerken pilot ve veri işaretlerini taşıyan bazı alt taşıyıcılar derin sönümlenmeye maruz kalırlar. Bu durumda derin sönümlenme aralıkları iyi kestirilemez ve bitlerin hatalı algılanma olasılığı yani BHO artar. Kanal kestirim doğruluğunu artırmak için pilot sembollere (bitlere) karşılık gelen alt taşıyıcılar yeterli sıklıkta konumlandırılır. Diğer bir ifadeyle, pilot sembol sıklığı, iletim bandını etkin kullanacak ve aynı zamanda hatalı kanal kestiriminden kaynaklı BHO artışını en aza indirecek şekilde seçilir. Pilot tabanlı yöntemlerde bant genişliğinin belirli bir kısmı pilot işaretlere ayrıldığı için tayfsal verimlilikte azalma olmaktadır. Bu azalmanın önüne geçebilmek adına yalnızca alınan veri sembollerinden yararlanılarak kanal tahmini yapabilen kör kanal kestirim yöntemleri geliştirilmiştir (Leus ve Van der Veen, 2005). Tayfsal verimliliği artırmasına karşın kör kanal kestiriminde kestirim doğruluğu pilot tabanlı yöntemlerden daha düşüktür. Ayrıca, kör kanal kestiriminde pilot yöntemlere göre işlem yükü daha fazladır (Petropulu ve dig., 2004). Kör kanal kestiriminde kestirim yapılabilmesi için birkaç veri bloğunun alıcıya ulaşmış olması da gerekmektedir (Shin ve dig., 2007). Yarı-kör kanal kestiriminde, sadece pilot dizileri kullanmak yerine, bilinmeyen veri sembollerindeki bilgi de kullanılır. Bu yaklaşımla, kanal kestirim doğruluğunu artırma ya da kestirimi aynı doğrulukla elde etmek için daha az sayıda pilot işaret kullanma olanağı vardır. Bunun yanında az sayıda eğitim dizisi kullanmak kanal kestirim kalitesini kör kanal kestirim yöntemine göre artırmaktadır.

Literatürde OFDM sistemleri için kanal kestirimi üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir: (Song ve Lim, 2003)'de OFDM sistemlerinde hızlı değişen bir kanal durumu için kanal ara değerlendirmesini kullanan yeni bir pilot tabanlı tahmin şeması önerilmiştir. (Simeone ve dig., 2004)'de OFDM sistemi için hızlı sönümlenmeli kanallar için alt boşluğa dayalı (subspace-based) yeni bir kanal tahmin yöntemi önerilmiştir. (Raghavendra ve dig., 2007)'de OFDM sistemleri için düzensiz yerleştirilmiş pilotlara uygulanabilen parametrik bir kanal kestirim yöntemi önerilmiştir. (Zhao ve dig., 2008)'de OFDM sistemlerinin yukarı hat (uplink) kanalı için düzensiz pilot yerleşimi kullanarak parametrik kanal kestirimi yapılmıştır. (Panah ve dig., 2008)'de kapalı döngü OFDM sistemleri için düzensiz pilot tabanlı, geri beslemeli kanal kestirim yöntemi önerilmiştir. (Panah ve dig., 2008)'de önerilen yöntem ile kanal kazancının alıcıda bilinmesi gerekmez, pilot sembollerin konumları optimize edilmiştir. (Han ve dig., 2010)'da OFDM sistemlerinde kanal tahmini için Doppler frekans kayması tahminine dayalı uyarlamalı olarak pilot sinyalleri gönderen düşük karmaşıklığa sahip uyarlanabilir bir pilot sistem yapısı önerilmiştir. (Fertl ve Matz, 2010)'de düzensiz pilot yerleşiminin kanal kestirim başarımına etkisini incelemek amacıyla düşük hesaplama karmaşıklığına sahip eşlenik gradyan yinelemeli kanal kestirimcisi önerilmiştir. (Vithanage ve dig. 2010)'da OFDM sistemlerinde iletimden önce pilot yerleştirme için modifiyeli ayrık stokastik yaklaşım kullanılmıştır. (Sung ve dig, 2010)'da OFDM AF (amplify and forward, güçlendir ve ilet) röle bağlantıları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde her pilot sembolü ile en kötü veri sembolü arasında yinelemeli değişim yapılmıştır. (Sung ve dig, 2011)'de (Sung ve dig, 2010)'daki çalışmaya ek olarak alt taşıyıcı eşlemesi yapılmıştır. (Wu ve dig, 2011)'de iki yönlü OFDM röle bağlantıları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Yinelemeli pilot yerleştirme ile pilot sembollerle en kötü veri alt taşıyıcıları arasında

değişim yapılmıştır. (Kurnaz ve diğ., 2012)'de tarak tipi kanal kestiriminde pilot sembol yerleşiminin OFDM sistem başarımına etkisi incelenmiş ve pilot alt taşıyıcılar arasındaki mesafe ile kanalın frekans seçiciliği ilişkilendirilmiştir. (Sung ve diğ., 2012)'de OFDM AF röle kanalları için geri beslemeli pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. Pilot alt taşıyıcılarının, minimum efektif sinyal gürültü oranına (signal to noise ratio) sahip veri alt taşıyıcılarıyla değiştirilme esasına dayanan IterPR yöntemi önerilmiştir. (Cheng ve diğ., 2013)'de en iyi pilot yerleşimini belirlemek için çapraz entropi optimizasyonu önerilmiştir. (Engiz ve diğ., 2013)'de OFDM sistemlerinde farklı zaman ve frekans seçicilikli kanallar için kanal kestirim ortalama karesel hatasını en küçük yapan en uygun pilot aralığı belirlenmiştir. (Steendam, 2013)'de düşük MSE'ye (mean squared error) sahip pilot yerleşiminin bulunması için iki adet sezgisel algoritma önerilmiştir. (Jency ve Gladwin, 2014)'de pilot yerleşiminin kanal kestirimi üzerindeki etkisini incelenmiştir. Tırmanma algoritması kullanılarak optimize edilmiş pilot yerleşim yöntemi önerilmiştir. (Engiz ve diğ., 2015)'de OFDM sistemlerinde kanal kestirim kalitesini ve bant genişliği etkinliğini artırmak amacıyla uyarlamalı (adaptif) pilot yerleşimi ve optimum pilot aralığı için matematiksel bir ifade önerilmiştir. (Nan ve diğ., 2015)'de optimum pilot yerleşimine ulaşmak için blok bağdaşımı tabanlı iki yöntem önerilmiştir. (Kurnaz ve diğ., 2017)'de OFDM sistemlerinde düzensiz pilot yerleşiminin kanal kestirimi başarımına etkisini BHO cinsinden incelenmiştir. (Lee ve diğ., 2018)'de derin sinir ağları tabanlı kapalı döngü düzensiz pilot yerleştirme yöntemi önerilmiştir. (Li ve diğ., 2018)'de tayfsal verimliliği artırmak amacıyla pilot pozisyonlarının ekstra bilgi işaretlerine göre seçildiği bir yöntem önerilmiştir. (Gu ve diğ., 2019)'da sanal alt taşıyıcılar düşünülerek ayrık Fourier dönüşümü yumuşatma filtrelemesinin kullanıldığı OFDM sistemlerinde kullanılacak evrensel bir kanal tahmin algoritması önerilmiştir. (Cho ve Ko, 2020)'de sualtı akustik iletişimi OFDM sistemleri için uyarlamalı gürültü azaltmaya dayalı yeni bir kanal tahmincisi önerilmiştir.

Literatürdeki bu çalışmaların büyük bir kısmı ortalama kare hatasını (mean square error, MSE) hatasını en aza indirmeyi amaçlamıştır. Kanal tahmininin ortalama kare hatasını (OKH) düşük olması BHO'nun azaltılması için her zaman yeterli olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada OKH'ye bakılmaksızın BHO iyileştirilmeye çalışılmış ve üç tür kanal kestirim algoritması üzerinde durulmuştur. Birinci algoritma pilot semboller frekans bandında eşit aralıklarla yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır (düzenli pilot yerleşimi). İkinci algoritma pilotların frekans bandına düzensiz olarak yerleştirilmesidir. Bu yöntemde pilotlar kanalın frekans yanıtındaki yerel maksimum ve minimum noktalarına yerleştirilmektedir (düzensiz pilot yerleşimi). Üçüncü ve bu çalışmada önerilen algoritma ise geri beslemeli uyarlamalı bir yapı kullanılarak kanalın derin sönümlemeye uğradığı kısımlarda pilot sıklığının artırılmasıdır. Kanalın yüksek kazançlı alt taşıyıcılarının olduğu noktalar mümkün olduğunca veri işaretlerine ayrılarak iletim kanalının etkin bir şekilde kullanılması ve derin sönümlenmelerin olduğu noktalara daha sık pilot semboller yerleştirilerek veri işaretlerinin hatalı algılanma olasılığının azaltılması amaçlanmıştır.

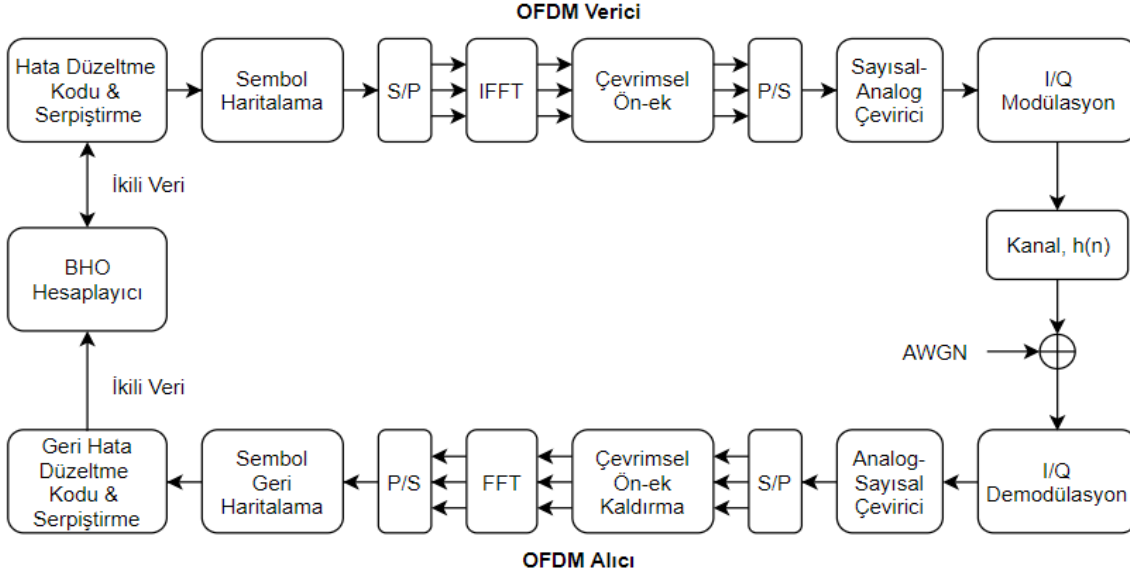
## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada önerilen geri beslemeli uyarlamalı kanal kestirim algoritması ile düzenli ve düzensiz pilot tabanlı algoritmaların sistem başarımlarını incelemek için MATLAB programlama dili kullanılarak bir OFDM benzetimcisi oluşturulmuştur. OFDM sistem modeli, pilot tabanlı kanal kestirim algoritmaları, önerilen OFDM sistem modeli, pilot konumlarının belirlenmesi, benzetimlerde kullanılan kanal profilleri ve benzetim parametrelerine ait ayrıntılı açıklamalar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

### OFDM Sistem Modeli (OFDM System Model)

Benzetimlerde kullanılan OFDM sistem modeli Şekil 1'de verilmiştir. Sistemin çalışması kısaca şu şekildedir: ilk adımda ikili giriş verisine hata kodlaması ve serpiştirme uygulanarak sistemin hatalara karşı dayanıklılığı artırılır. Daha sonra veri bitleri BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) vb. modülasyon şemalarına göre sembolere haritalanır. Seri paralel dönüşümü (S/P) yapılan veriye Ters Fourier Dönüşümü (IFFT)

uygulanarak her bir sembol bir alt taşıyıcı üzerine modüle edilir. Semboller arası girişimi azaltmak amacıyla sinyale tampon zamanı (guard interval) süresince çevrimsel ön-ek (cyclic prefix) eklenir. Sayısal-analog çevrimi yapılan sinyal kanala gönderilmek üzere yüksek frekansa modüle edilir. Verici kısmında yapılan bütün işlemlerin alıcıda tersi yapılarak ikili veri tekrardan elde edilir. Verici kısmında iletilen veri ile alıcıda alınan veri karşılaştırılarak BHO değeri hesaplanır.



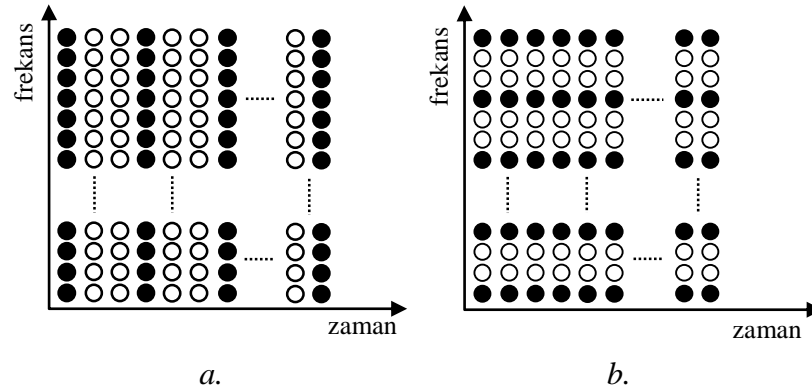
Şekil 1. OFDM sistem modeli

Figure 1. OFDM system model

### OFDM Sisteminde Pilot Tabanlı Kanal Kestirimi (Pilot Based Channel Estimation in OFDM System)

Pilot tabanlı kanal kestirimi, pilot işaretlerin tüm alt taşıyıcılara belirli bir aralık (periyot) ile (blok tip, block type) veya her bir OFDM sembolüne yerleştirilmesiyle (tarak tip, comb type) gerçekleştirilir. Alternatif bir yöntem olarak (dikdörtgensel, rectangular) pilot işaretler hem zamanda hem de frekans düzleminde belirli aralıklarla yerleştirilebilir. Blok-tip ve tarak-tip pilot yerleşimine örnek Şekil 2'de verilmiştir. Blok tip kanal kestirimi daha çok yüksek frekans seçicilikli kanallarda kullanılırken, tarak tip kanal kestirimi ise daha çok zamanda hızlı sönmülmeli kanal durumlarında kullanılır. Bu kestirim yöntemlerinde pilot ve veri alt taşıyıcılarındaki değerinin kestirilmesi gerekir.  $N_p$  pilot sinyalleri  $[X_p(m), m=0, 1, \dots, N_p-1]$   $X(k)$ 'nin içine düzenli bir biçimde yerleştirilir (Hsieh ve dig., 1998). Bu işlemle  $N$  alt taşıyıcı her biri ardışık  $L=N/N_p$  tane alt taşıyıcı içeren  $N_p$  tane gruba bölünür. Her bir grupta ilk alt taşıyıcı pilot sinyali iletmek için kullanılır. OFDM sinyalinin  $k$ . alt taşıyıcıdaki değeri (1) eşitliğindeki gibi tanımlanır [2].

$$X(k) = X(mL + \ell) = \begin{cases} X_p(m), & \ell = 0 \\ X_v(m), & \ell = 1, 2, \dots, L-1 \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 2. (a) Blok tip, (b) Tarak tip pilot yerleşimi (● pilot, ○ veri)  
Figure 2. (a) Block, (b) Comb type pilot placement (● pilot, ○ data)

Her bir alt kanal (taşıyıcı) veri işaretlerini veya pilot işaretleri iletir.  $H_p$  pilot alt kanalı,  $H_v$  veri alt kanalı olmak üzere kanalın tepkisi (2) eşitliğindeki gibi yazılır.

$$H(k) = H(mL + \ell) = \begin{cases} H_p(m), & \ell = 0 \\ H_v(m), & \ell = 1, 2, \dots, L - 1 \end{cases} \quad (2)$$

Bu durumda alınan pilot işaretler ile veri işaretleri sırasıyla (3) ve (4) eşitliklerindeki gibidir.

$$Y_p(m) = H_p(m) X_p(m) + W(m) \quad (3)$$

$$Y_v(mL + \ell) = H_v(mL + \ell) X_v(mL + \ell) + U(mL + \ell) \quad (4)$$

Burada  $W(m)$  ve  $U(mL + \ell)$ , sırasıyla pilot ve veri alt taşıyıcılardaki Gauss gürültüsünü göstermektedir.

Pilot tabanlı kanal kestiriminde pilot alt taşıyıcılardaki değerler en küçük kareler (least squares, LS) veya en düşük ortalama kare (minimum mean square, MMSE) algoritmaları ile belirlenebilir. LS kanal kestirim tekniği, uygulamadaki basitliği ve kanalın herhangi bir istatistiksel bilgisine ihtiyaç duymaması nedeniyle sıklıkla kullanılır. MMSE kanal kestirim algoritması, kanal istatistikleri ile gürültü varyansı hakkında önceden bilgiye ihtiyaç duymasına ve LS kanal tahmin tekniğinden daha karmaşık olmasına rağmen, özellikle düşük SGO değerleri için BHO ve OKH başarımları açısından LS kanal tahmin algoritmasından çok daha iyidir (Patil ve Jadhav, 2014; Singh ve Bansal, 2016; Souleymane ve dig., 2016; Ami Munshi ve Unnikrishnan, 2021).

Kanalın pilot frekanslardaki değeri LS algoritmasıyla (5) eşitliğindeki gibi hesaplanır (Hsieh ve dig., 1998).

$$\hat{H}_p^{LS}(m) = \frac{Y_p(m)}{X_p(m)}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, (N_p - 1) \quad (5)$$

Burada  $X_p$  iletilen pilot işaretleri,  $Y_p$  alınan pilot işaretleri,  $N_p$  pilot işaret sayısını,  $m$  pilot alt taşıyıcının indisini göstermektedir.

OFDM sisteminde alıcı kısmında tampon zamanı kaldırıldıktan sonra alınan sinyal matris formunda aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir.

$$Y = XFh + W \quad (6)$$

Burada,

$$X = \text{diag}\{X(0), X(1), \dots, X(N-1)\}$$

$$Y = [Y(0) Y(1) \dots Y(N-1)]^T$$

$$W = [W(0) W(1) \dots W(N-1)]^T$$

$$H = [H(0) H(1) \dots H(N-1)]^T = \text{DFT}_N\{h\}$$

$$F = \begin{bmatrix} W_N^{00} & \dots & W_N^{0(N-1)} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ W_N^{(N-1)0} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}$$

$$W_N^{nk} = \frac{1}{N} e^{-j2\pi \frac{nk}{N}}$$

Eğer zaman düzlemi kanal vektörü ( $h$ ) Gaussian ve kanal gürültüsü ( $W$ ) ile ilişkisiz ise MMSE kanal kestirim ifadesi aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir (Edfors ve dig., 1998).

$$\hat{H}_{\text{MMSE}} = FR_{hY}R_{yy}^{-1}Y \quad (7)$$

$$R_{hY} = E\{hY\} = R_{hh}F^HX^H \quad (8)$$

$$R_{YY} = E\{YY\} = XFR_{hh}F^HX^H + \sigma^2I_N \quad (9)$$

Burada,  $R_{hY}$   $h$  ve  $Y$  arasındaki çapraz kovaryans matrisi,  $R_{YY}$   $Y$ 'nin oto-kovaryans matrisi,  $R_{hh}$   $h$ 'nin oto-kovaryans matrisi,  $\sigma^2$  gürültünün varyansını ( $E\{|W(k)|^2\}$ ) göstermektedir.

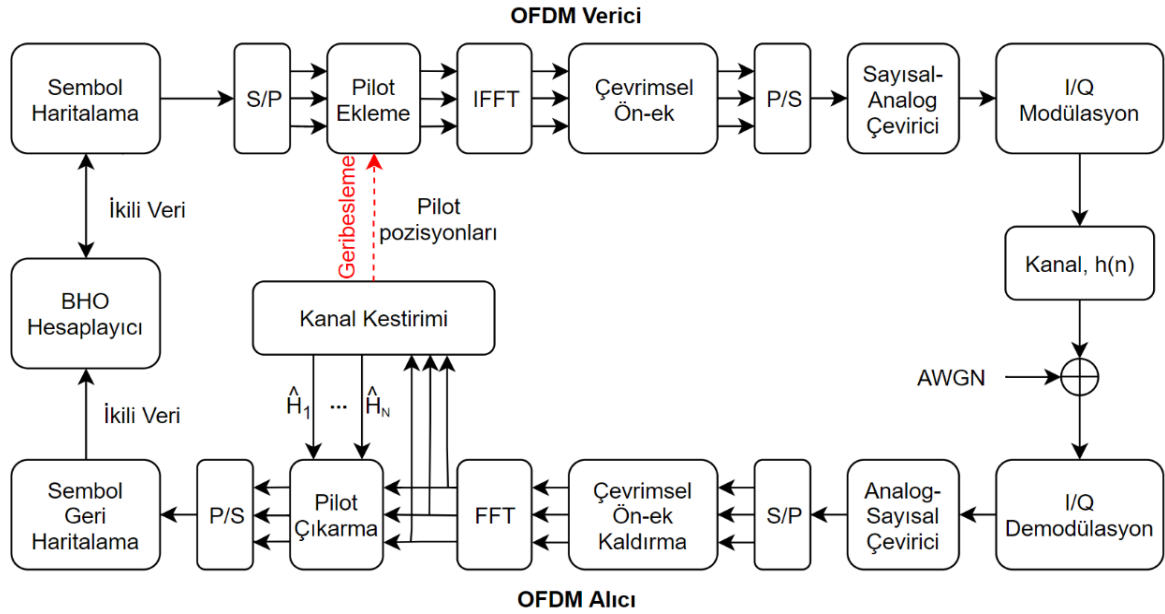
Kanalın veri alt taşıyıcılarındaki değerini kestirmek için lineer, spline, kübik, alçak geçiren gibi pek çok farklı ara değerlendirme algoritmaları kullanılabilir (Coleri ve dig., 2002). Literatürde OFDM sisteminde ara değerlendirme algoritması başarımını artırmak için geliştirilmiş birçok çalışma da bulunmaktadır (Acar ve dig., 2016; Acar ve dig., 2017; Acar ve dig., 2019).

### Önerilen OFDM Sistem Modeli (Proposed OFDM System Model)

OFDM sistemlerinde BHO'nu en aza indirmek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Örneğin; güç yükleme tekniği ile kanal hakkında önceden bilgi sahibi olduğu durumda, derin sönümlenmelere karşı iletilen sembollere ön eşitleme uygulanabilir (Petrovlu ve dig., 2004). Bu, basitçe derin sönümlenmelere uğrayan sembollerin belirli oranlarda güçlendirilerek kanala yollanmasıdır. Diğer bir yöntem ise derin sönümlenmelere uğrayan alt taşıyıcı noktalarına daha sık pilot yerleştirmektir. Böylece yüksek kazançla sahip alt taşıyıcılardan çoğunlukla veri iletilerek frekans spektrumunu etkin bir şekilde kullanılmış olur. Hatalı bitler ağırlıklı olarak derin sönümlenmelere uğrayan alt taşıyıcılarda meydana geleceği için bu noktaları pilot işaret olarak atamak BHO'yu düşürecektir.

Bu çalışmada önerilen geri beslemeli düzensiz pilot tabanlı kanal kestirim yönteminin blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir. Başlangıçta ikili veri BPSK vb. modülasyon şemalarıyla sembollere haritalanır. İlk zaman anında alıcıda, pilot işaret konumları bilinmediğinden pilotlar düzenli aralıklarla yerleştirilir. Daha sonra pilot eklenmiş verinin ters FFT'si alınarak tampon zamanı süresince çevrimsel ön-ek eklenir. Paralel-seri dönüşümü (P/S) yapılan sinyal analog sinyale çevrilip yüksek frekansa modüle edilerek kablosuz kanala iletilir. Alıcıda bu işlemlerin tersi yapılarak FFT aşamasından sonra kanal kestirimi yapılır. Alıcı kendisine gelen sinyale göre en fazla sönümlenmeye uğrayan alt taşıyıcıları tespit ederek bir sonraki zaman anındaki pilot konumlarını belirler ve geri besleme hattıyla bu konumları vericiye iletir. Bir sonraki zaman anında verici, alıcının belirlediği pilot konumlarına pilot semboller yerleştirir ve aynı işlem adımlarından geçen sinyal alıcıya ulaşır. Alıcı, pilot konumlarını bildiğinden pilot noktalarında

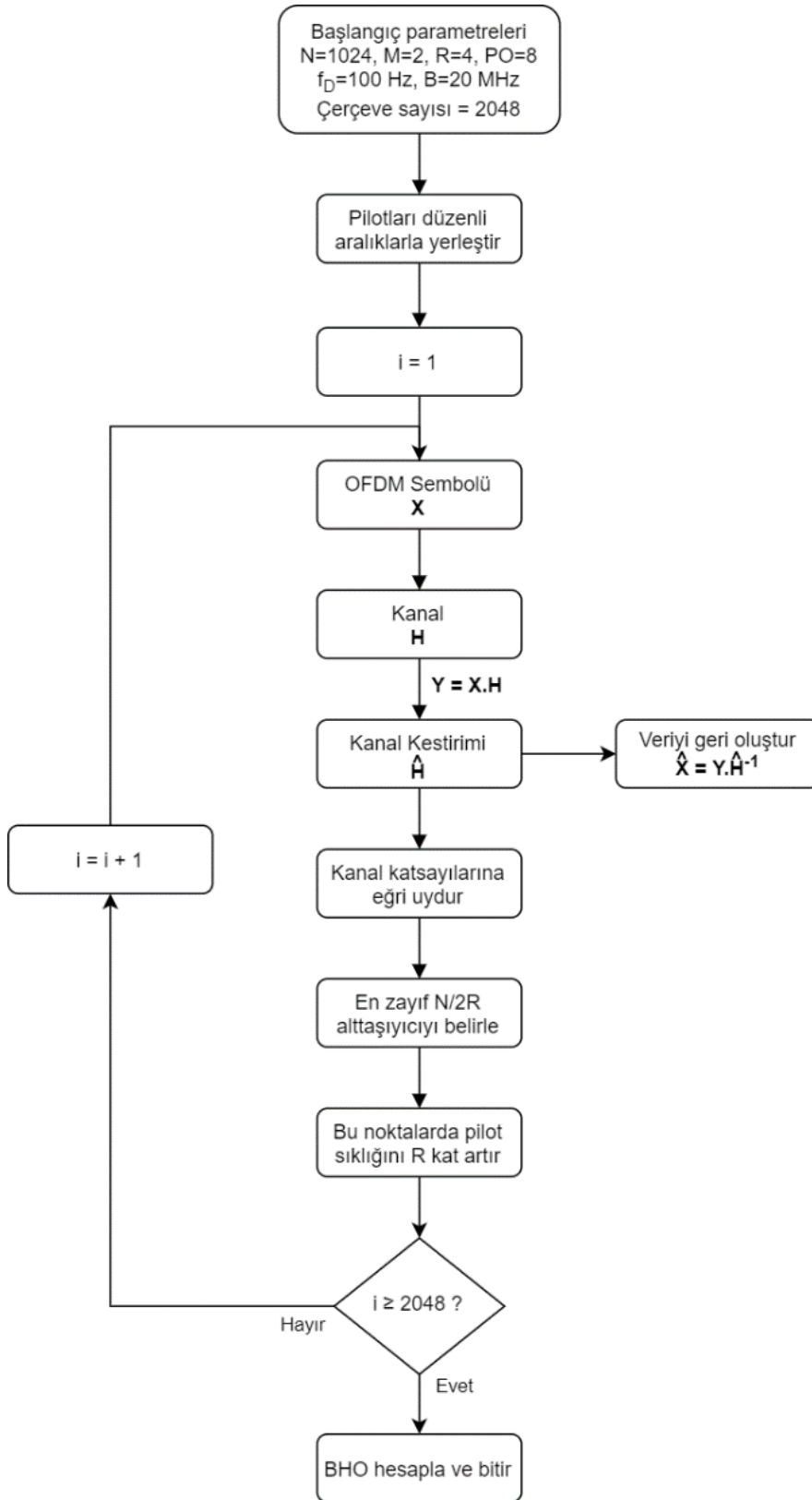
kanal kestirimini yaparak veriyi geri oluşturur. Veri noktalarında kanalın kazanç değerinin bulunması amacıyla pilot noktalarındaki değerlere doğrusal ara değerlendirme yöntemi uygulanır.



Şekil 3. Geri beslemeli OFDM sistem modeli

Figure 3. OFDM system model with feedback

Şekil 4'te önerilen uyarlamalı pilot yerleşim algoritmasının akış şeması verilmiştir. Başlangıç parametreleri olarak alt taşıyıcı sayısı  $N=1024$ , BPSK modülasyonu ( $M=2$ ), pilot sıkıştırma oranı  $R=4$ , pilot oranı (PO) 8, Doppler frekansı  $f_D=100$  Hz, bant genişliği  $B=20$  MHz ve çerçeve sayısı 2048 seçilmiştir. Şekil 4'den de görüldüğü gibi önerilen uyarlamalı kanal kestirim algoritmasında başlangıçta kanalın frekans karakteristiği bilinmediğinden pilotlar düzenli aralıklarla yerleştirilir. OFDM sembolü kanala gönderildikten sonra mevcut pilotların yardımıyla kanal kestirimi yapılır ve veri geri oluşturulur. Daha sonra kanal katsayılarına eğri uydurulur. Kanalın en zayıf  $N/2R$  alt taşıyıcısı belirlenir ve bu noktalarda pilot sıklığı  $R$  (pilot sıkıştırma oranı) kat artırılır. Bu işlemler çerçeve sayısı (2048) kadar tekrarlanır ve son olarak BHO hesaplanır.



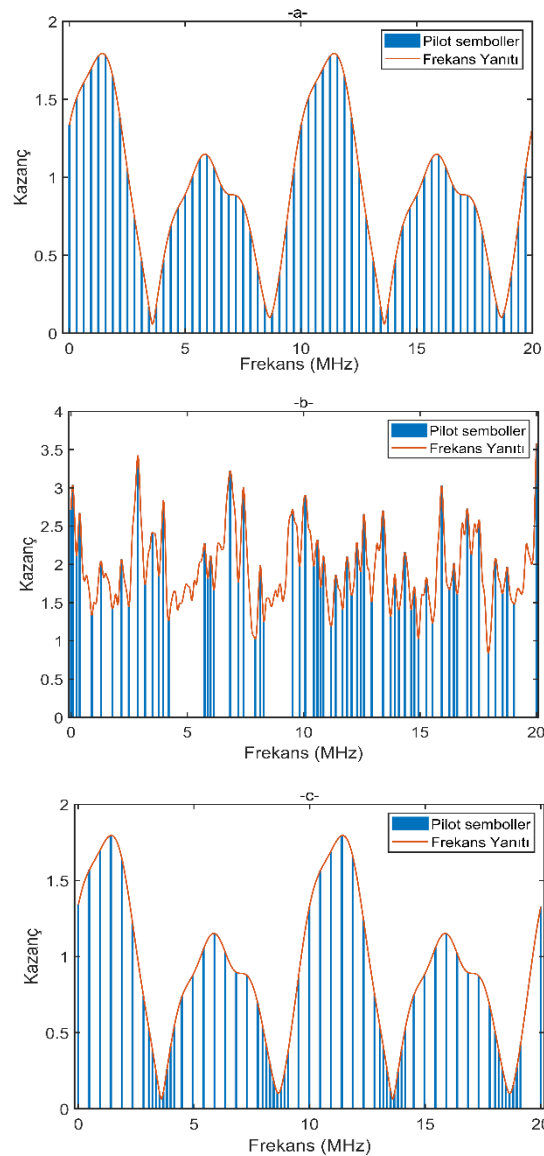
Şekil 4. Uyarlamalı kanal kestirim algoritma akış şeması

Figure 4. Flowchart of adaptive channel estimation algorithm



### Pilot Konumlarının Belirlenmesi (Determination of Pilot Locations)

Şekil 5'te benzetimlerde kullanılan düzenli, düzensiz ve önerilen olmak üzere üç pilot yerleşim algoritmasının frekans düzlemindeki yerleşimleri gösterilmiştir. Düzenli pilot yerleşiminde pilotlar arası mesafe (frekans aralığı) eşittir. Bir OFDM kanalında toplam alt taşıyıcı sayısının, pilot alt taşıyıcı sayısına oranı, pilot oranı ile ifade edilir. Örneğin 8 pilot oranı pilot sembollerin frekans düzleminde her 8 alt taşıyıcıda bir yerleşeceğini ifade etmektedir. Düzensiz pilot yerleşiminde pilot semboller kanalın frekans düzlemindeki kazanç ifadesinin yerel maksimum ve minimum noktalara yerleştirilir. Önerilen pilot yerleşiminde ise pilot semboller kanal kazancının minimum olduğu bölgelerde daha sık yerleştirilerek pilot sıklığı artırılır. Geri kalan bölgelerdeki pilot sıklığı, toplam pilot sayısı sabit kalacak şekilde yerleştirilir.



Şekil 5. (a) Düzenli, (b) Düzensiz, (c) Önerilen pilot sembol yerleşimi

Figure 5. (a) Regular, (b) Irregular, (c) Proposed pilot symbol placement

Düzensiz ve önerilen pilot yerleşiminde pilot konumları belirlenirken ilk önce alıcıya gelen sinyalin mutlak değeri alınır. Derin sönmülemeye uğramamış olan alt taşıyıcılardaki semboller, üzerine binen gürültü nedeniyle alıcıya düşük güçlü olarak ulaşmış olabileceğinden, bu alt taşıyıcılara pilot atamamak için sinyale "smoothing spline" yöntemiyle eğri uydurulur. Bu yöntemle yumuşatma parametresine bağlı

olarak sinyal yumuşak geçişlere sahip olur. Yumuşatma parametresi 0 ile 1 arasında değişmektedir. Yumuşatma parametresi 1 iken eğri sinyali takip eder. Yumuşatma parametresi azaldıkça sinyal daha yumuşak geçişlere sahip olur. Yumuşatma parametresinin değeri kanaldan kanala değişkenlik göstermektedir.

### ITU Kanal Profilleri (ITU Channel Profiles)

Bu çalışmada kullanılan frekans seçicilikleri birbirinden farklı beş ITU kanallarına ait yankı gecikme ve ortalama güç değerleri Çizelge 1’de, kanallara ait etkin yankı gecikme değerleri ise Çizelge 2’de verilmiştir (Kurnaz ve Gökçalp, 2008). Ayrıca çalışmada kullanılan kanallara ait 20 MHz’lik spektral güç yoğunlukları (power spectral density, PSD) Şekil 6’da verilmiştir.

**Çizelge 1.** ITU kanal profilleri için gecikme yayılımları (Jain, 2007)

*Table 1. Delay spreads for ITU channel profiles*

Yankı	Indoor Office-A		Indoor Office-B	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0	0	0
2	50	-3,0	100	-3,6
3	110	-10,0	200	-7,2
4	170	-18,0	300	-10,8
5	290	-26,0	500	-18,0
6	310	-32,0	700	-25,2

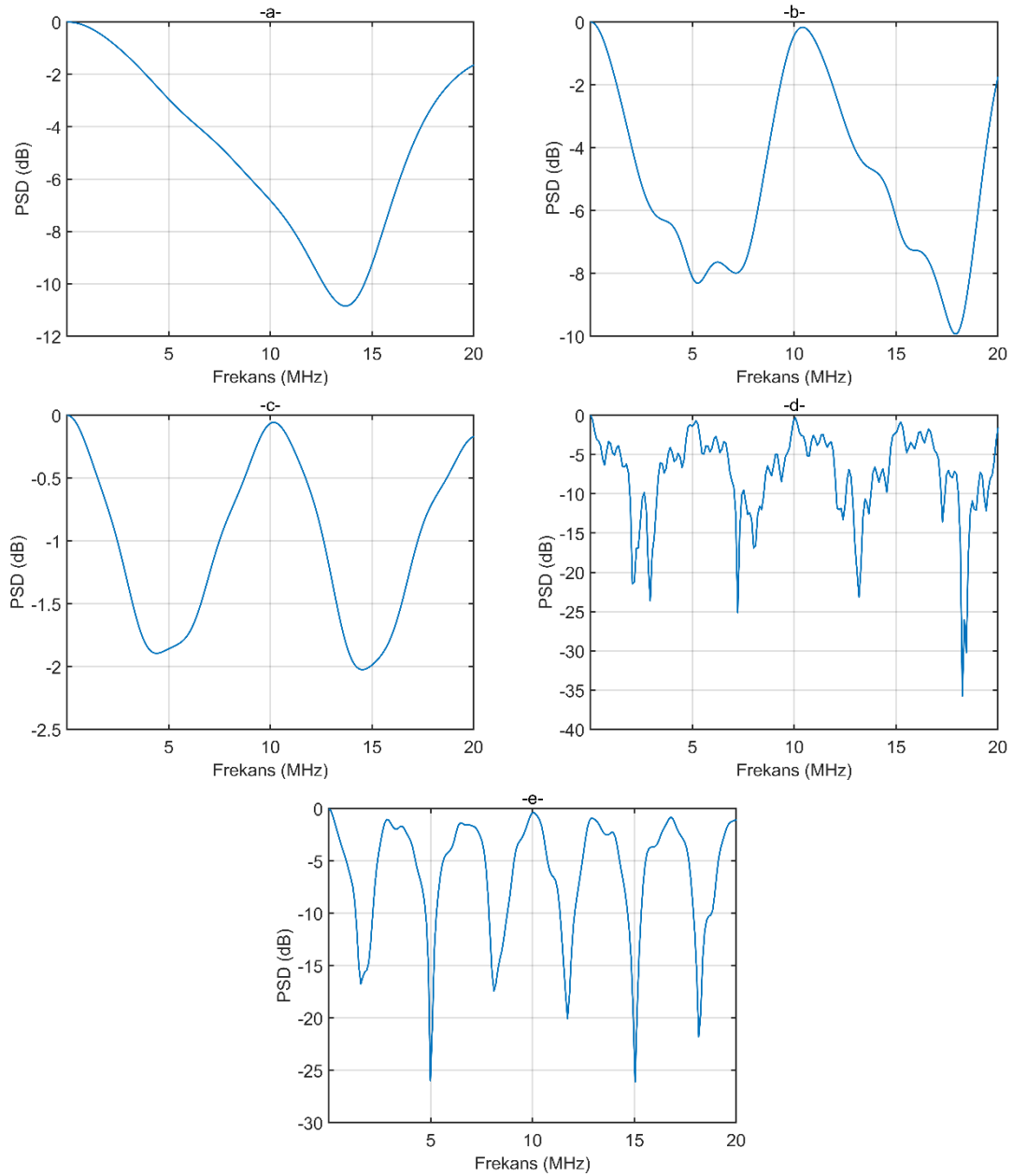
Yankı	Indoor Pedestrian-A		Indoor Pedestrian-B	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0	0	0
2	110	-9,7	200	-0,9
3	190	-19,2	800	-4,9
4	410	-22,8	1200	-8,0
5	-	-	2300	-7,8
6	-	-	3700	-23,9

Yankı	Vehicular-A	
	Gecikme (ns)	Ortalama Güç (dB)
1	0	0
2	310	-1,0
3	710	-9,0
4	1090	-10,0
5	1730	-15,0
6	2510	-20,0

**Çizelge 2.** Kanallara ait etkin yankı gecikme değerleri

*Table 2. RMS delay spread of channels*

Kanal modeli	Indoor Office A	Indoor Office B	Indoor Pedestrian A	Indoor Pedestrian B	Vehicular A
Etkin yankı gecikmesi, $\tau_{\text{etkin}}$ , $\mu\text{s}$	0.0370	0.0992	0.0460	0.633	0.370



**Şekil 6. a)** ITU Indoor Office-A, **b)** ITU Indoor Office-B, **c)** ITU Indoor Pedestrian-A, **d)** ITU Indoor Pedestrian-B, **e)** ITU Vehicular-A kanalı için PSD değeri

*Figure 6. PSD value of a) ITU Indoor Office-A, b) ITU Indoor Office-B, c) ITU Indoor Pedestrian-A, d) ITU Indoor Pedestrian-B, e) ITU Vehicular-A channel*

### Benzetim Parametreleri (Simulation Parameters)

Bu çalışmada MATLAB programlama dili kullanılarak detayları Şekil 3'deki gibi verilen bir OFDM sistem benzetimcisi oluşturularak düzenli, düzensiz ve çalışmada önerilen pilot sembol yerleşim algoritmalarının sistem başarımlarına etkisi incelenmiştir. Benzetimcide kanalın pilot alt taşıyıcılardaki değeri en küçük kareler (least square, LS), veri alt taşıyıcılardaki değeri ise doğrusal ara değerlendirme algoritmasıyla (MATLAB'da interp1 fonksiyonu) elde edilmiştir. Kablosuz iletim kanalı olarak farklı frekans seçiciliğe sahip olan ITU'nun beş adet kanalı kullanılmıştır. Kanalın zamanla değişimi ise Rayleigh sönümlenme modeli ile ifade edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan parametreler Çizelge 3'de verilmiştir. Benzetimlerde her bir yöntem (düzenli, düzensiz, önerilen pilot yerleşimi) için 4, 8 ve 16 pilot oranı, 10 Hz

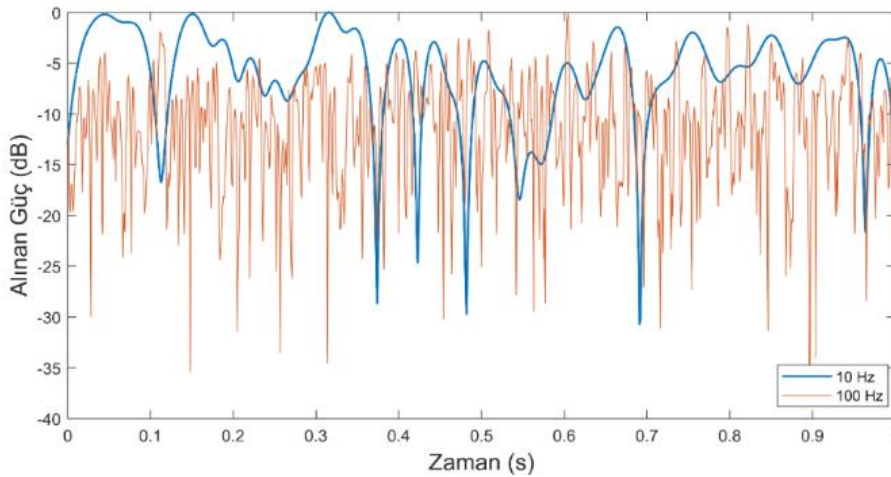
ve 100 Hz Doppler frekansı kullanılmıştır. Benzetimlerde 20 MHz'lik iletim bant genişliği, sembol süresi 51.2  $\mu$ s olan 1024 alt taşıyıcı, 256 çevrimsel ön-ek ilaveli tampon zamanı (12.8  $\mu$ s), toplam 2048 OFDM sembolü (çerçevesi), temel bant BPSK modülasyonu (her bir veri ve pilot için) kullanılmıştır. Benzetimlerde kanalın bir OFDM sembolü boyunca değişmediği, mükemmel eş zamanlama yapıldığı ve doğrusal güç yükseltmesi (kanala iletilen veri ve pilot sembol güçleri eşittir) olduğu varsayılmıştır. Benzetimlerde 0-30 dB aralığındaki sinyal gürültü oranı (SGO) değerleri için BHO grafikleri elde edilmiştir. BHO, 2048 çerçeve boyunca hatalı algılanan bit sayısının toplam alınan bit sayısına oranı hesaplanarak bulunmuştur.

**Çizelge 3.** Benzetim parametreleri

*Table 3. Simulation parameters*

Kullanıcı sayısı	Tek kullanıcı
Aşağı/yukarı hat	Aşağı hat
Çerçeve sayısı	2048
Modülasyon (veri ve pilot için)	BPSK
İletim bant genişliği	20 MHz
Alt taşıyıcı sayısı	1024, (51.2 $\mu$ s)
Tampon zamanı	256, (12.8 $\mu$ s)
Doppler frekansı	10 Hz, 100 Hz
Pilot oranları	4, 8, 16
Ara değerlendirme komutu	MATLAB interp1
Pilot işaretlerin tahmini	Least Square (LS)
Sinyal gürültü oranı (SGO)	0-30 dB

Kanalın zaman düzlemindeki sönümlenme düzeyi, alıcının veya vericinin hareket hızına bağlıdır. Alıcı/vericinin hareket etmesi alıcıdaki sinyal bileşenlerinde Doppler kaymasına neden olur. Şekil 7'de 10 Hz ve 100 Hz'lik Doppler frekanslı Rayleigh kanalından geçen sabit bir sinyalin 1 saniyelik güç değişimi gösterilmiştir. Bu çalışmada 10 Hz'lik Doppler frekansı 6 km/h'lik hareket hızına denk gelirken, 100 Hz'lik Doppler frekansı ise 60 km/h'lik hareket hızına denk gelmektedir. Şekil 7'den de görüldüğü gibi aratan Doppler frekansına bağlı olarak alınan sinyal gücündeki değişimler daha sık ve daha derin olmaktadır.

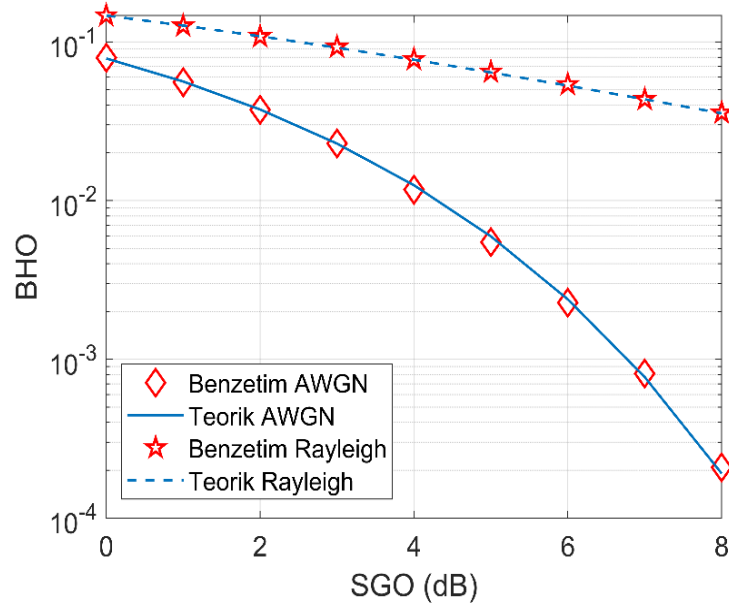


**Şekil 7.** 10 Hz ve 100 Hz'lik Rayleigh sönümlenme zarfı

*Figure 7. Rayleigh envelope for 10 Hz and 100 Hz*

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

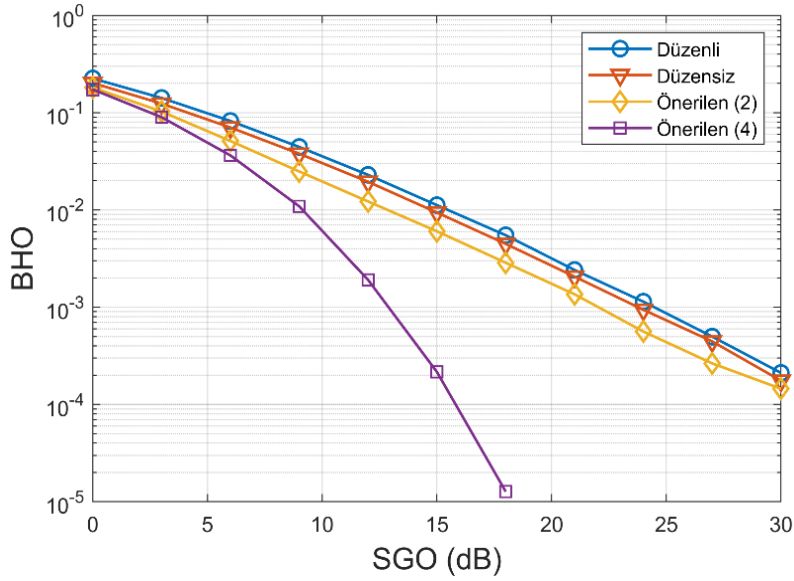
Çalışmanın ilk aşamasında oluşturulan OFDM benzetimcisinin doğruluğu AWGN ve Rayleigh kanalların için test edilerek sınanmıştır. Benzetimler Intel Core i7 6700HQ 2.6 GHz işlemcili ve 16 GB RAM'li bir dizüstü bilgisayar ile alınmıştır. OFDM benzetimcisine ait teorik ve benzetim sonuçları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. AWGN ve Rayleigh kanallar için OFDM benzetimcisinin sınanması

Figure 8. Testing of OFDM simulator for AWGN and Rayleigh channel

Şekil 9'da Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı (pilot sayısı 192) ve 10 Hz'lik Doppler frekansı için düzenli, düzensiz ve önerilen pilot yerleşim algoritmaları kanal kestirim sonuçları verilmiştir. Şekilde Önerilen (2), kanalın belirlenen kısımlarında pilot sıklığının 2 kat artırılacağını, Önerilen (4) ise kanalın belirlenen kısımlarında pilot sıklığının 4 kat artırılacağını ifade etmektedir. Önerilen algoritmaların düzenli ve düzensiz pilot yerleşimine göre daha iyi performans gösterdiği Şekil 9'da görülmektedir. Önerilen (4) pilot sembol yerleşimi ile BHO başarımında düzenli pilot sembol yerleşim yöntemine göre yaklaşık 11.6 dB'e varan bir iyileşme sağlanabilmektedir (BHO'nun yaklaşık  $10^{-3}$  değeri için). Önerilen (2) pilot sembol yerleşimi ile BHO başarımındaki iyileşme düzenli ve düzensiz yöntemlere göre 2-3 dB arasında olabilmektedir (BHO'nun yaklaşık  $10^{-3}$  değeri için).



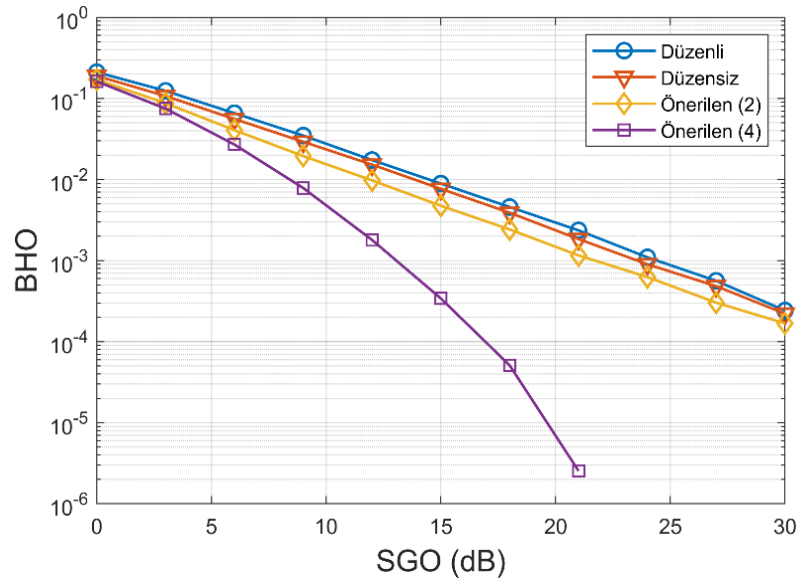
Şekil 9. Indoor Office-A, 10 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri

Figure 9. BER values for Indoor Office-A, 10 Hz, 4 pilot ratio

Indoor Office-A kanalı 10 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri analizi yanında ortalama kare hatası (MSE) analizleri de yapılmıştır. 12 dB SGO değeri için MSE hatası Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritması için -16.52 dB'dir. Bu değerler Önerilen (2), Düzensiz ve Düzenli pilot sembol yerleşim algoritmaları için sırasıyla -13.76 dB, -12.81 dB ve -12.59 dB'dir.

Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı, 10 Hz Doppler frekansı için Düzenli pilot sembol yerleşim algoritması için benzetim süresi 4.22 sn'dir. Düzensiz pilot sembol yerleşim algoritması için bu süre 56.45 sn'dir. Önerilen (2) algoritması için benzetim süresi 28.47 sn iken Önerilen (4) algoritması için ise 30.52 sn'dir.

Şekil 10'da Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı (pilot sayısı 192) ve 100 Hz'lik Doppler frekansı için benzetim sonuçları verilmiştir. 10 Hz'lik Doppler frekansında olduğu gibi Önerilen (2) ve Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritmalarının başarımları düzenli ve düzensiz pilot sembol yerleşim algoritmalarına göre daha iyidir. Önerilen (4) için BHO başarımı düzenli pilot yerleşim algoritmasına göre 11.3 dB'e kadar iyileşebilmektedir (BHO'nun yaklaşık  $10^{-3}$  değeri için). Önerilen (2) algoritmasının BHO başarımı ise düzenli ve düzensiz pilot yerleşim algoritmalarına göre 2-3 dB daha iyidir (BHO'nun yaklaşık  $10^{-3}$  değeri için).

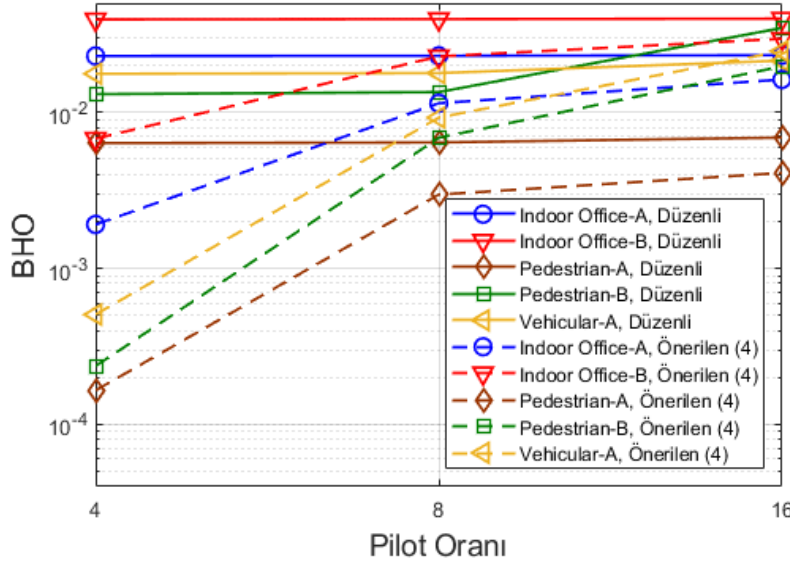


Şekil 10. Indoor Office-A, 100 Hz, 4 pilot oranı için BHO değerleri

Figure 10. BER values for Indoor Office-A, 100 Hz, 4 pilot ratio

Şekil 9 ve Şekil 10 bir bütün olarak değerlendirildiğinde Indoor Office-A kanalı, 4 pilot oranı ve 10/100 Hz Doppler frekansı için en iyi OFDM sistem başarımı Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritması için elde edilmiştir. Benzer değerlendirmeler tüm kanal profili, 4, 8, 16 pilot oranları ve 10/100 Hz Doppler frekansları için de yapılmıştır. Sonuçlardan Önerilen (4) pilot sembol yerleşim algoritmasının Indoor Office-A, Indoor Office-B, Indoor Pedestrian-A, Indoor Pedestrian-B kanal profilleri, 4, 8, 16 pilot oranları ve 10/100 Hz Doppler frekansları için en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Vehicular-A kanal profili için de 10 Hz ve 4/8/16 pilot oranları için en iyi sistem başarımını Önerilen (4) algoritması vermiştir. Vehicular-A, 100 Hz için 4 pilot oranı için Önerilen (4) algoritması en iyi sonucu verirken, 8/16 pilot oranları için en iyi başarımı Önerilen (2) algoritması vermiştir. Bunun temel nedeni frekans seçiciliği yüksek Vehicular-A kanalı için 8/16 pilot oranları için pilotlar minimum noktalara daha sık yerleştirildikçe diğer noktadaki pilot sıklığı gittikçe azalmaktadır. Düşük pilot oranları için bu durum sorun teşkil etmese de pilot oranı arttıkça zaman zaman başarım kaybına yol açabilmektedir. Sonuçlar ile ilgili olarak daha detaylı grafik ve açıklamalar (Ayvenli, 2019)'da bulunabilir.

4, 8 ve 16 pilot oranı, 10 Hz Doppler frekansı, 12 dB SGO ve düzenli ve Önerilen (4) algoritmaları için tüm kanalların BHO değerleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm kanallar için Önerilen (4) algoritması düzenli pilot yerleşimine göre daha iyi başarım göstermektedir. Özellikle düşük pilot oranları için Önerilen (4) algoritması kanal kestirim başarımında oldukça yüksek bir iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 11. 10 Hz ve farklı pilot oranları için önerilen yöntemin başarımları

Figure 11. The performances of the proposed method for 10 Hz and different pilot rates

Şekil 11’de artan pilot oranına bağlı olarak BHO değerlerinin düştüğü de görülmektedir. Pilot oranının artması aslında kanal tahmininde kullanılacak pilot sembollerin sayısının azalması, başka bir deyişle bir çerçevede gönderilen veri bitlerinin sayısının artmasıdır. Pilot oranına bağlı BHO değerleri ile sistem verimi arasında bir ödünleşim (trade-off) vardır. Toplam bit sayısı (pilot sembolü ile veri biti toplamı) aynı olduğundan kanal kestiriminde kullanılan pilot sembol sayısının azalması kanal tahmin başarımında düşüşe ve dolayısıyla BHO değerinde artışa neden olur. Pilot oranı, pilot sembol sayısı, veri bitleri sayısı ve sistem verimine ait değerlendirmeler Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4’den de görüldüğü gibi 16 pilot oranı için her ne kadar BHO değeri düşük olsa bile sistem verimi %93,75 ile en yüksektir.

Çizelge 4. Pilot oranına bağlı olarak sistem verimin değerlendirilmesi

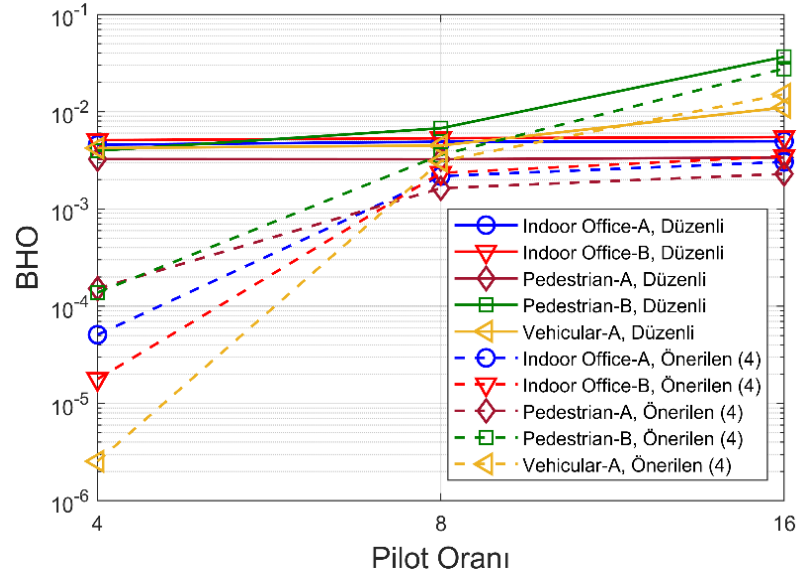
Table 4. Evaluation of system efficiency depending on the pilot rate

Pilot Oranı	Bir OFDM çerçevesindeki toplam sembol sayısı (TSS)	Pilot sembol sayısı (PSS)	Bir OFDM çerçevesinde iletilen veri sembolü sayısı (VSS)	Sistem verimi (%) $100 \times \frac{VSS}{TSS}$
4	768	192	576	75
8	768	96	672	87,5
16	768	48	720	93,75

TSS=1024 – 256 =768, 256: Tampon zamanı sembol sayısı



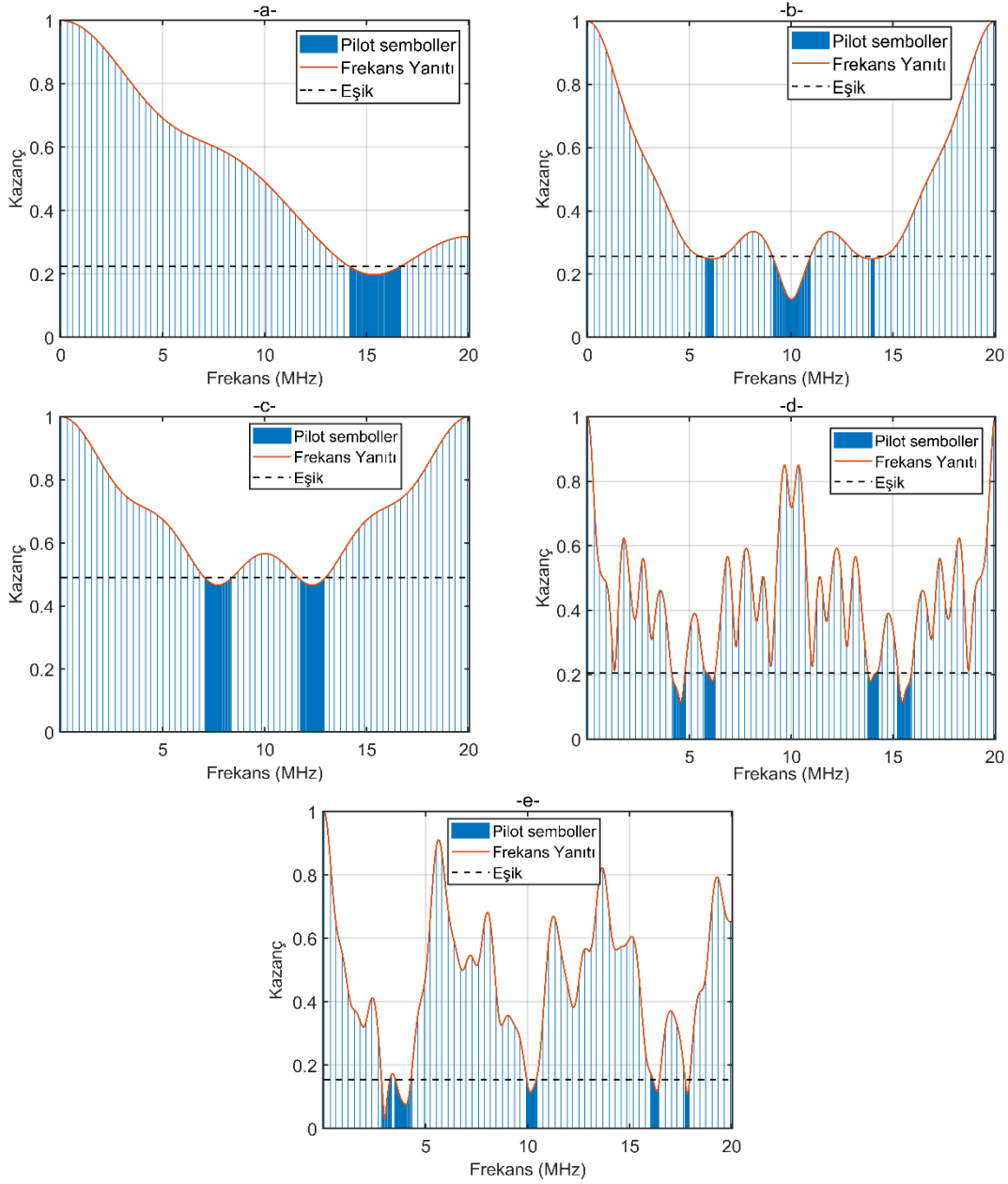
Şekil 12’de 4, 8 ve 16 pilot oranları, 100 Hz Doppler frekansı, 18 dB SGO, düzenli ve Önerilen (4) algoritmaları için tüm kanalların BHO değerleri verilmiştir. Önerilen (4) algoritmasının özellikle düşük pilot oranlarında (4 ve 8) BHO değerinde kayda değer bir iyileşme sağladığı şekilden görülmektedir.



Şekil 12. 100 Hz ve farklı pilot oranları için önerilen yöntemin başarımları

Figure 12. The performances of the proposed method for 100 Hz and different pilot rates

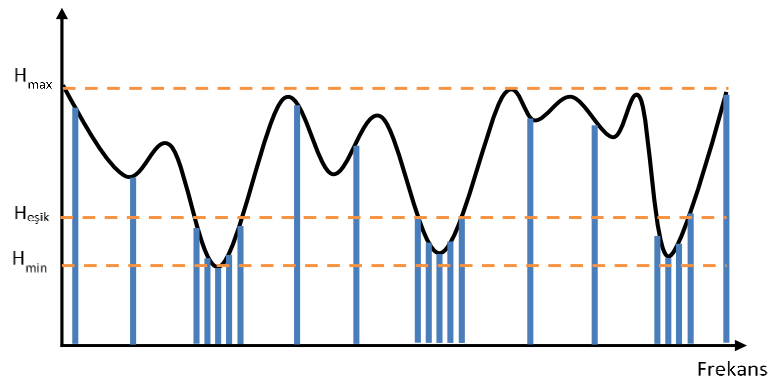
Beş farklı kanal profili, 16 pilot oranı, 30 dB SGO, 10 Hz Doppler frekansı için Önerilen (4) algoritmasında frekans düzleminde pilot aralıkları Şekil 13’de verilmiştir. Şekillerde eşik seviyesinin altında kalan bölgelerde pilotlar frekans düzlemine 4 kat daha sık yerleştirilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi frekans düzleminde bu sık yerleşim bölgeleri (2, 3, 4) kanal yapısına bağlı olarak değişmektedir.



**Şekil 13.** Beş farklı kanal için önerilen yöntemde frekans düzleminde pilot işaretlerin yerleşimi; (a) Indoor Office-A, (b) Indoor Office-B, (c) Indoor Pedestrian-A, (d) Indoor Pedestrian-B, (e) Vehicular-A

*Figure 13. Pilot arrangement in the frequency domain in the method proposed for five different channels; (a) Indoor Office-A, (b) Indoor Office-B, (c) Indoor Pedestrian-A, (d) Indoor Pedestrian-B, (e) Vehicular-A*

Şekil 13'de görüldüğü gibi Önerilen (4)'de daha sık yerleştirilecek pilot sembollerin kanalın frekans düzlemindeki kazanç değeri (eşik seviyesi) değişebilmektedir (Şekil 13'de kesikli çizgilerle gösterilmiştir). Değişen bu eşik seviyelerini belirleyebilmek için Şekil 14'de verilen tanımlamalar yapılmıştır. Burada  $H_{\max}$  kanalın en yüksek genlik değerini,  $H_{\min}$  kanalın en düşük genlik değerini,  $H_{\text{eşik}}$  ise pilotların daha sık yerleştirileceği, kanalın en düşük genlik seviyesini göstermektedir.



**Şekil 14.** Eşik seviyesini belirlemek için yapılan tanımlamalar

*Figure 14. Definitions made to determine the threshold level*

Beş farklı kanal için  $H_{min}$ ,  $H_{max}$  ve  $H_{eşik}$  değerleri hesaplanmış ve Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelgede tüm kanal genlikleri normalize edilerek maksimum değeri 1 yapılmıştır. Çizelge 5’de görüldüğü gibi  $H_{min}$  değerleri 0,08 ile 0,46 arasında değişmektedir.  $H_{eşik}$ ’in ise değişim aralığı 0,15 ile 0,49 arasındadır.

**Çizelge 5.** Beş farklı kanal için  $H_{min}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{eşik}$  ve K değerleri

*Table 5.  $H_{min}$ ,  $H_{max}$ ,  $H_{eşik}$  and K values for five different channels*

Kanal	$H_{min}$	$H_{max}$	$H_{eşik}$	K
Indoor Office-A	0,19	1	0,22	0,037
Indoor Office-B	0,14	1	0,25	0,127
Indoor Pedestrian-A	0,46	1	0,49	0,055
Indoor Pedestrian-B	0,12	1	0,20	0,090
Vehicular-A	0,08	1	0,15	0,076

$H_{eşik}$ , (10) eşitliği kullanılarak  $H_{min}$  ve  $H_{max}$  ile ilişkilendirilmiştir. Burada K katsayısı eşik seviyesi, kanalın  $H_{min}$  ve  $H_{max}$  değerine bağlı olarak değişebilen bir büyüklüktür. Beş farklı kanal için Çizelge 5’de verildiği gibi K değeri 0,037 ile 0,127 aralığında değişmektedir. Beş farklı kanal için K’nın ortalama değeri 0,077’dir. Dolayısıyla farklı kanal profilleri için K değeri 0,077 seçilerek sık yerleşimin yapılacağı pilot işaretler için eşik seviyesi (10) eşitliği kullanılarak kolaylıkla belirlenebilir.

$$H_{eşik} = H_{min} + (H_{max} - H_{min}) \times K \quad (10)$$

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada OFDM sistemleri için kablosuz iletim kanalın yapısına bağlı olarak değişebilen yeni bir pilot sembol yerleşimli kanal kestirim algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma düzenli/düzensiz pilot sembol yerleşimi algoritmaları ve 10/100 Hz Doppler frekansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan Önerilen (4) algoritması toplamda 30 senaryodan (5 kanal, 3 farklı pilot oranı, 2 farklı Doppler frekansı) 28 tanesinde en iyi sonucu vermiştir. Kalan 2 senaryo için ise yine Önerilen (2) algoritması en iyi başarıyı vermiştir. Düzensiz pilot yerleşimi benzetimlerin çoğunda en kötü performansı sergilemiştir. Önerilen (4) algoritması özellikle düşük pilot oranlarında (örn. 4) çok yüksek bir başarıyı sergilemektedir. Pilot oranı arttıkça Önerilen (4) algoritmasının başarıyı düzenli/düzensiz yöntemlere yaklaşmaktadır. Yüksek frekans seçicilikli kanallarda (örn Vehicular-A) ve yüksek pilot oranlarında (örn. 16) zaman zaman Önerilen (2) algoritması Önerilen (4) algoritmasına göre daha iyi başarıyı gösterebilmektedir. Çalışmanın

son aşamasında literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Önerilen (4) algoritması için frekans düzleminde pilot sıklığının artırılacağı bölgelerin eşik değerini belirlemek için yeni bir matematiksel ifade önerilmiştir.

Bu çalışmada yalnızca tarak-tip pilot yerleşimi ile kanal kestirimi için analizler yapılmıştır. Gelecekte blok-tip, elmas-tip, dikdörtgen-tip kanal kestirim yöntemleri için de çalışma genişletilebilir. Böylece zaman düzleminde Doppler etkisi daha iyi incelenebilir. LS algoritması yerine MMSE algoritması ve farklı ara değerlendirme yöntemleri kullanılarak sistem başarımı artırılabilir. Ayrıca H<sub>eşik</sub> seviyesi farklı kanal profilleri için de hesaplanarak önerilen (10) eşitliği güncellenebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acar, Y., Aldırmaz, S. Ç., Basar, E., 2019, "Channel estimation for OFDM-IM systems", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Cilt 27, Sayı 3, ss.1908-1921.
- Acar, Y., Dogan, H., Panayırıcı E., 2017, "Pilot symbol aided channel estimation for spatial modulation-OFDM systems and its performance analysis with different types of interpolations", *Wireless Personal Communications*, Cilt 94, Sayı 3, ss.1387-1404.
- Acar, Y., Dogan H., Başar E., Panayırıcı, E., 2016, "Interpolation based pilot-aided channel estimation for STBC spatial modulation and performance analysis under imperfect CSI", *IET Communications* Cilt 10, Sayı 14, ss.1820-1828.
- Ami Munshi, A., Unnikrishnan, S., 2021, "Performance Analysis of Compressive Sensing based LS and MMSE Channel Estimation Algorithm", *Journal of Communications Software and Systems*, Cilt 17, Sayı 1, ss.13-19.
- Ayvenli, F., 2019, "Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Sistemleri İçin Kanal Kestirim Yöntemlerinin Başarımının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Chen, J. C., Wen, C. K., Ting, P., 2013, "An efficient pilot design scheme for sparse channel estimation in OFDM systems", *IEEE Communications Letters*, Cilt 17, Sayı 7, ss. 1352-1355.
- Cho, Y. H., Ko, H. L., 2020, "Channel Estimation Based on Adaptive Denoising for Underwater Acoustic OFDM Systems", *IEEE Access*, Cilt 8, ss. 157197-157210.
- Coleri, S., Ergen, M., Puri, A. Bahai, A., 2002, "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Cilt 48, Sayı 3, ss. 223-229.
- Edfors, O., Sandell, M., van de Beek, J.J., Wilson, S.K., Brjesson, P.O. 1998, "OFDM channel estimation by singular value decomposition", *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 46, Sayı 7, ss. 931-939.
- Engiz, B.K., Kurnaz, Ç., Sezgin, H., "Determining the Optimum Pilot Density in OFDM Systems over Propagation Measurement Based Channels", 55th International Symposium ELMAR-2013, Zadar, Croatia, 25-27 September 2013.
- Engiz, B. K., Kurnaz, Ç., Sezgin, H., 2015, "Approach for determining the optimum pilot placement in orthogonal frequency division multiplexing systems", *IET Communications*, Cilt 9, Sayı 15, ss. 1915-1923.
- Fertl, P., Matz, G., 2010, "Channel estimation in wireless OFDM systems with irregular pilot distribution", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 58, Sayı 6, ss. 3180-3194.
- Gu, F., Fan, Y., Wang L., Tan, X., Wei, J., 2019, "A Universal Channel Estimation Algorithm Based on DFT Smoothing Filtering", *IEEE Access*, Cilt 7, ss. 129883-129891.
- Han, P., Wang J., Xu, P., "Adaptive pilot design based on Doppler frequency shift estimation for OFDM system", *International Conference on Computer Design and Applications*, Qinhuangdao, Çin, 25-27 Temmuz 2010.
- Hsieh, M. H., Wei, C. H., 1998, "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Cilt 44, Sayı 1, ss. 217-225.
- Jain, R., 2007, "Channel models: A tutorial", WiMAX forum AATG (Vol. 10), Washington Univ. St. Louis, Dept. CSE.

- Jency, G. B., Gladwin, S. J., "Channel estimation using optimized pilot placement in OFDM system", *International Conference on Communication and Signal Processing*, Bangkok, Tayland, 10-12 Ekim 2014.
- Kurnaz, C., Gökalp H., "Investigating MC-CDMA System Performance Using Measurement-Based Channel Models" 14th European Wireless Conference, Prague, Czech Republic, 22-25 June 2008.
- Kurnaz, C., Engiz, B. K., Gökalp, H., Sezgin, H., 2012, "Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Sisteminde En Uygun Pilot Aralığının Kanal Değişkenleri ile İlişkilendirilmesi", *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 17, Sayı 1, ss. 79-92.
- Kurnaz, Ç., Engiz, B.K., Ayvenli, F., "Performance Comparison of Regular and Irregular Pilot Placements in OFDM Systems", *5th International Conference on Advanced Technologies (ICAT)*, İstanbul, Türkiye, 9-12 Mayıs 2017.
- Lee, S., Ju, H., Shim, B., "Pilot Assignment and Channel Estimation via Deep Neural Network", *24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Ningbo, Çin, 12-14 Kasım 2018.,
- Leus, G. Van der Veen, A., 2005, Channel estimation. Smart Antennas-State of the Art, Hindawi Publishing Corporation, 293-319.
- Li, Q., Wen, M., Zhang, Y., Li, J., Chen, F., Ji, F., 2018, "Information-guided pilot insertion for OFDM-based vehicular communications systems", *IEEE Internet of Things Journal*, Cilt 6, Sayı 1, ss. 26-37.
- Nan, Y., Sun, X., Zhang, L., "Near-optimal pilot allocation in sparse channel estimation for massive MIMO OFDM systems", *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Brüksel, Belçika, 25-28 Ağustos 2015.
- Nee, R.V., Prasad, R., 2000, OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House, Inc. 280.
- Panah, A. Y., Nosrat-Makouei, B., Vaughan, R. G., 2008, "Non-uniform pilot-symbol allocation for closed-loop OFDM", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 7, Sayı 7, ss. 2723-2731.
- Patil, S., Jadhav A.N., 2014, "Channel Estimation Using LS and MMSE Estimators", *KIET International Journal of Communications & Electronics*, Cilt 2, Sayı 1, ss. 51-55.
- Petropulu, A., Zhang, R. Lin, R., 2004, "Blind OFDM channel estimation through simple linear precoding", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 3, Sayı 2, ss. 647-655.
- Raghavendra, M. R., Lior, E., Bhashyam, S. Giridhar, K., 2007, "Parametric channel estimation for pseudo-random tile-allocation in uplink OFDMA", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 55, Sayı 11, ss. 5370-5381.
- Shin, C., Heath, R. W. Powers, E. J., 2007, "Blind channel estimation for MIMO-OFDM systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Cilt 56, Sayı 2, ss. 670-685.
- Singh, H., Bansal, S., 2016, "Comparison of Channel Estimators for OFDM Channel Estimation", *International Journal of Computer Applications*, Cilt ICAET 2016, Sayı 7, ss.41-44.
- Simeone, O., Bar-Ness Y., Spagnolini, U., 2004, "Pilot-based channel estimation for OFDM systems by tracking the delay-subspace", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Cilt 3, Sayı 1, ss. 315-325.
- Song, W.G., Lim, J. T., 2003, "Pilot-symbol aided channel estimation for OFDM with fast fading channels", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Cilt 49, Sayı 4, ss. 398-402.
- Souleymane, B., Mondol, S.R., Wei, Z., 2016, "Comparative Performance Study of LS and MMSE Channel Estimation over Time Varying Channel in OFDM System", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Cilt 5, Sayı 3, ss.847-850.
- Steendam, H., "How to select the pilot carrier positions in CP-OFDM?", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapeşte, Macaristan, 9-13 Haziran 2013.
- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., "Feedback-aided pilot placement for amplify-and-forward OFDM relay links", *IEEE 11th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Taichung, Tayvan, 17-20 Ekim 2010.
- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., "Feedback-aided pilot placement for OFDM relay links with subcarrier pairing", *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, Japonya, 5-9 Haziran 2011.

- Sung, K. Y., Hong, Y. W. P., Chao, C. C., 2012, "Feedback-aided pilot placement and subcarrier pairing for AF OFDM relay channels", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Cilt 62, Sayı 2, ss. 704-720.
- Tang, Z., Cannizzaro, R.C., Leus, G., Banelli, P., 2007, "Pilot-Assisted Time-Varying Channel Estimation for OFDM Systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Cilt 55, Sayı 5, ss. 2226-2238.
- Vithanage, C., Cepeda, R., Coon, J, McGeehan, J., 2010, "MIMO-OFDM pilot placement algorithms for wideband indoor communications", *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 59 Sayı 2, ss. 466-476.
- Wu, W., Jia, X., Cai, Y., Hu, H., "Feedback-aided pilot placement for two-way cooperative-OFDM", *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, Çin, 9-11 Kasım 2011.
- Zhao, X., Peng, T. Wang, W., "Parametric channel estimation by exploiting hopping pilots in uplink OFDMA", *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes, Fransa, 15-18 Eylül 2008.



## ADAPTIVE OPERATION MODEL FOR INTERIOR SMART LOGISTICS IN CYBER PHYSICAL SYSTEMS

<sup>1</sup>Emrah DÖNMEZ , <sup>2</sup>Fatih OKUMUŞ , <sup>3</sup>Adnan Fatih KOCAMAZ 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül University, Department of Software Engineering, Balıkesir, TURKEY

<sup>2</sup>İnönü University, Department of Software Engineering, Malatya, TURKEY

<sup>3</sup>İnönü University, Department of Computer Engineering, Malatya, TURKEY

<sup>1</sup>emrahdonmez@bandirma.edu.tr, <sup>2</sup>fatih.okumus@inonu.edu.tr, <sup>3</sup>fatih.kocamaz@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.11.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.09.2021)

**ABSTRACT:** Logistics operations are among the main activities in industrial production areas. Today, vehicles that are usually electric and manually operated by a driver are used to perform these operations. Logistics robots are an important alternative that can be used in this field, and their use in integration with cyber physical systems in industrial fields is increasingly common. The biggest advantage of the logistics robots is that they provide autonomous driving capabilities and optimum parameters for the entire system in accordance with industry 4.0 concept. In this study, an adaptive logistics robot system that can be integrated into the Cyber Physical System (CPS) system in an environment with cyber physical system infrastructure has been developed. In this context, positioning, path planning, multi-task allocation, energy management, task prioritization, optimization and obstacle avoidance issues are analyzed and simple solutions are proposed. The experiments have been carried out in eight different configurations and the average distance and energy costs have been improved by 5.1% and 6.6%, respectively.

**Key Words:** Cyber Physical System (CPS), Smart Logistics, Autonomous Robots, Industry 4.0, Robotic Control

### Siber Fiziksel Sistemlerde İç-Mekân Akıllı Lojistik için Adaptif İşletim Modeli

**ÖZ:** Lojistik operasyonlar, endüstriyel üretim alanlarında ana faaliyetler arasındadır. Günümüzde bu işlemleri gerçekleştirmek için genellikle elektrikli olan ve bir sürücü tarafından manuel olarak çalıştırılan araçlar kullanılmaktadır. Lojistik robotlar bu alanda kullanılabilecek önemli bir alternatiftir ve endüstriyel alanlarda siber fiziksel sistemlerle entegrasyonda kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Lojistik robotların en büyük avantajı, endüstri 4.0 konseptine uygun olarak tüm sistem için otonom sürüş kabiliyetleri ve optimum parametreleri sağlamasıdır. Bu çalışmada, siber fiziksel sistem altyapısı olan bir ortamda Siber Fiziksel Sistem (SFS) içerisine entegre edilebilen uyarlanabilir bir lojistik robot sistemi geliştirilmiştir. Bu kapsamda konumlandırma, yol planlama, çoklu görev dağılımı, enerji yönetimi, görev önceliklendirme, optimizasyon ve engellerden kaçınma konuları analiz edilerek basit çözümler önerilmektedir. Deneyler sekiz farklı konfigürasyonda gerçekleştirilmiş ve ortalama mesafe ve enerji maliyetleri sırasıyla % 5,1 ve % 6,6 oranında iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Siber Fiziksel Sistem (CPS), Akıllı Lojistik, Otonom Robotlar, Endüstri 4.0, Robotik Kontrol

## 1. INTRODUCTION

Cyber-physical system (CPS) is the general name given to system in which physical mechanisms are controlled or monitored by computer-based algorithms. Cyber physical systems are more commonly

used as industrial production technologies develop. These systems are one of the most significant components for the multi-agent based robotic control and monitoring systems. Because CPS is used to monitor an environment or control electro-mechanic systems (robots, production lines etc.) to optimize, stabilize and/or coordinate sub-components of the controllable environments. It is possible to adapt the cyber-physical system designed for a general production line to perform different tasks such as control, monitoring and intervention. The CPS systematically ensures fast and accurate interventions, coordinates physical systems, organize and transfer processed/measured data. This system can also provide efficient and low-cost solutions for multi-robot controlling and monitoring processes as well. One of the most common physical elements are mobile robots in the multi-robot management systems.

Mobile robots are interdisciplinary technological systems consisting of electronic, mechanical and software components that perform progress and maneuvering behaviors on a floor with moving transmission organs such as wheels, tracks, etc., and sensors for sensing the movement pattern / environment. They have been used for a wide variety of purposes in many sectors. Mobile robots become major actors in industrial production centers day by day. They collaborate collectively to perform given tasks in the environment. This collaboration is required multi-robot management and monitoring infrastructure to distribute and organize the available tasks. There are systems called smart and autonomous logistic systems where each agent collaborates one another to perform load handling tasks. All these management and monitoring processes are handled by the cyber-physical systems. Configuration of the CPS are adjusted according to the environment conditions and available tasks. The mobile robots are generally used to create smart logistics systems in industrial applications.

Smart logistics (SL) are implemented in industrial production areas, sea-ports, cargo management fields, cargo train ports and etc. Main advantages of such SL systems are that providing systematical load organization, smart scheduling, cooperation, safety, optimization (capacity, path and motion behaviors), cost reduction and so on. SL systems can also be managed and monitored by a CPS including computer-based algorithms. There are several issues in CPS-assisted SL systems. System integration (Iarovyi, Mohammed, Lobov, Ferrer, & Lastra, 2016) is a major difficulty to design an efficient CPS managing the elements of the SL system. The difficulty of system integration generally stems from interactions and conflicts between physical system, software and platform domains. The other concern about SL is safety in human environment. Even though researching robotics and facilitating technologies for applications are forming remarkable progress, it is important to create novel approaches for the design, modeling, and control of robotic systems operating safely with people hosted spaces (Schirmer, Erdogmus, Chowdhury, & Padir, 2013). The SL systems have distributed system (Sztipanovits et al., 2012) in networked CPS elements. The distributed system provides required message transfer to create interaction between these networked elements. One of the most important component of the SL systems is Internet of Things (IoT) infrastructure (Wan et al., 2016). It simply provides accessibility to CPS objects regardless of location over the internet. Ultimately, by building smart data transfer layers between these components of SL systems, a stable coordination between CPS elements will have been done.

The organization of the paper is as follows: In the section 2, related works are given. The materials and methods are described in section 3. Experimental results and observations are emphasized in section 4. The conclusion and discussion are mentioned in section 5. The references are given in last section 6.

## 2. RELATED WORKS

There are remarkable number of studies related to CPS-structured SL systems. In each study carried out, a different module for CPS is considered according to the usage purpose and environment characteristics of multiple mobile robots. Main issues focused on these studies are; real-time communication, creation of optimized path plans, transportation safety, internet of things, sensor fusion, multi-robot management and coordination, etc.

A Platform-as-a-Service (PaaS) model (Krainer & Kirsch, 2014) has been introduced for implementing information acquisition missions from multi-client. Their system manage swarm of unmanned vehicles operated and maintained by an external infrastructure. They emphasize that the



proposed system is integration of CPS and cloud computing as PaaS. A CPS system (Krueger et al., 2016) is proposed that it enables manufacturing tasks to be implemented with no intervention done by human. It is claimed that the proposed system operates even if the available environment definition (the world model) distresses from major uncertainties. By this way, the robot turns into an essential part of the manufacturing execution system. They said that the system has resulted concluding in a highly manageable complete system. In another study (Li et al., 2016), it has aimed to form a specific language called Cyber-Physical Robot Language (CPLR), that assists the cyber physical robot systems development and application in an efficient way. D'auria and Persia have highlighted the relevance of the application of CPS systems in the scope of robotic surgery (D'Auria & Persia, 2017). They introduce the design methodology for a cyber-physical system of collaborative robotics. This CPS model has been configured for surgery implementations aiming to minimize the vulnerability of robotic surgery systems. Semwal et al. propose a method to deal with the task execution order problem within a CPS that naturally organizes mutual exclusion (Semwal, Jha, & Nair, 2017). The method addresses a decentralized and distributed CPS that includes nodes such as computers, robots, and sensor nodes, and uses mobile software modules that help execute various tasks while also providing mutual exclusion of shared resources. Ernst has said that the robot autonomous vehicles (taxis) can decide where and when to go (Ernst, 2018). If necessary, it can also be controlled remotely, rather than autonomous driving, at least at the time of market entry where operating costs are less important. Besides, another important requirement is the ability to deal with faults. This requirement includes design and software faults as well as hardware faults and malfunctions. Laux et al.) have introduced the biological process required for sound signal based localization (Laux et al., 2018). In the study, a system that transfers single steps to a technical model is proposed to acquire a new type of localization model that uses one or two microphones to track an object. Their learning model is based on Support Vector Machines and Principal Component Analysis methods. Lee and Yang have investigated Massive MIMO (Multi-Input Multi-Output) usage infrastructure as a wireless technology in CPS (B. M. Lee & Yang, 2018). They have analyzed the overall performance of Massive MIMO base station positioned in a data center to ensure a dense connection to multiple devices for CPS based configurations. Lee et al have developed CPS-based intelligent robotic warehouse model to transform conventional warehouse tasks into smart logistics (C. K. M. Lee, Lin, Ng, Lv, & Tai, 2019). The multiple mobile robot resource allocation problem and calculation of collision-free path planning have been discussed in the study. An improved A\* method has been designed to discover all possible routes between source node and target node. Levshun et al. have introduced the novel model, that is a key factor of the design and verification methodology for secure cyber-physical systems (Levshun, Chevalier, Kotenko, & Chechulin, 2020). While the developed model expresses cyber-physical systems as several building blocks, each building block is the projection of the integrated model with the properties and connections between them. Yaacoub et al. have given a general review to all components in CPS systems and their connectivity, including IoT systems (Yaacoub et al., 2020). The study describes the main CPS security threats, vulnerabilities and attacks related to the utilized components and communication protocols. Finally, current CPS security models that can be classified as cryptographic and non-cryptographic solutions are discussed and analyzed. Lu and Asghar have introduced the concept of semantic CPS (SCPS) and developed technologies which allow semantic communication between SCPSs (Lu & Asghar, 2020). The SCPS presents a layered architecture that separates the implementation of traditional CPS and semantic communication. This structure makes that it is compatible with various CPS application architectures. Dönmez and Kocamaz have proposed a load balancing and task distribution system for multi agents in their study (Dönmez & Kocamaz, 2019a; Dönmez & Kocamaz, 2019b). They have claimed that the proposed load balancing schemes generally provide an optimum balance between the number of tasks and path lengths for the multi agent systems. They proposed a path planning and smoothing method in an obstacle hosted environment (Dönmez, Kocamaz, & Dirik, 2017). In another study; (Dönmez & Kocamaz, 2019), a vision-based path planning system is developed by using multi-cameras for CPS based environments. Okumuş and Kocamaz proposed path planning methods (Okumus & Kocamaz, 2018) for multi- robots and developed a cloud

platform (Okumuş & Kocamaz, 2019a; Okumus & Kocamaz, 2019b; Okumus, Donmez & Kocamaz 2020) for the multi-agent navigation management.

As it can be seen from the literature, there are various type of studies which focus different components of the CPSs. Most of these studies have focused several components of the CPS environments. On the other hand, these studies have been generally performed at theoretical level. In this study, a comprehensive adaptive model for CPS-assisted SL systems have been proposed. The model has several layers to deal with multi mobile robot agents while providing smooth task scheduling, coordination, managing, planning, controlling, safety and monitoring. We have compared our study with the featured studies () in the following Table 1.

**Table 1.** Comparison of the developed system in prominent related works.

	Chowdhury and Maier	Afrin et al.	Turner et al.	Schillinger et al.	Our Work
Environment Assets Definition	✓	✓	✓	✓	✓
AGV Charging	-	-	-	✓	✓
Mapping	✓	-	-	✓	✓
Multi-AGV	-	✓	✓	✓	✓
Multi-Task Allocation	✓	✓	✓	✓	✓
Simultaneous Task Execution	✓	✓	✓	✓	✓
Coordination Type	Centralized	Centralized	Decentralized	Centralized	Centralized
Monitoring	-	-	-	-	✓
Simulation	-	✓	✓	✓	✓
Path Planning	-	-	-	STAP	D* Lite
Multi-AGV Collaboration	-	✓	-	✓	✓
Collision Avoidance	-	-	-	✓	✓
Pseudocode	✓	✓	✓	✓	✓
Cost Optimization	✓	✓	✓	✓	✓
Position Tracking	-	-	-	-	✓

### 3. MATERIAL & METHODS

The CPS systems are mainly utilized in industrial production areas. There are a number of algorithms to monitor physical devices, machineries, production lines etc. Some algorithms are used to control some of these devices, robotic units, transfer vehicles etc. The CPS assisted SL systems are generalized for regular industrial production procedures within the scope of this study.

#### 3.1. Position detection

There are a number of methods to determine the global position of the logistic robot(s) and workload(s) (targets). Encoder based methods are used to locate position of the mobile robot. However, the encoder data may give rise to error accumulation. Since moving parts of the robot can slip, skid because of the floor conditions. Tag based position detection is another method to locate mobile robots in the operating environment. Image processing methods through camera or special scanning devices are used to detect tags. Such methods require more complex mathematical processes and high computing power. In this study we propose a RFID- based position detection by using RFID tags and reader. We placed the tags according to the several predefined parameters over the floor where the mobile robot can make movement process. These predefined parameters are signals ( $S_i$ ,  $S_n$ ), active task ( $T_{act}$ ), distance ( $D_n$ ) between the tags ( $T_n \in T_A$ ), distance error ( $E_n$ ) reader antenna pitch and tag locations ( $C_{x,y}$ ) and antenna distance to the floor. The basic steps of the position detection algorithm are given below. The parameter  $P_{Rn}$  is the position of the  $n_{th}$  robot. The following Algorithm 1 shows the process of position detection.

---



---

**Algorithm 1** Pseudocode of the position algorithm
 

---

```

1. function PositionDetection()
2.    $S_i \in A_i \leftarrow$  signal to all tags
3.   received signals  $\leftarrow S_n \in T_A$ 
4.   while  $T_{act} = true$ 
5.      $D_n$  of  $T_n \in T_A \leftarrow$  Compute
6.      $E_n \leftarrow$  Compute
7.      $C_{x,y} \leftarrow$  Refine  $C_{x,y}$  of  $T_n$ 
8.      $P_{Rn}$  w.r.t.  $T_n \leftarrow$  Calculate
9.   return  $P_{Rn}$ 

```

---

### 3.2. Multi-task allocation

Multi task allocation is one of the major challenges for the multi-robots in the CPS configured environments. An optimized task allocation can provide good balance between performance, cost and safety. In this study, we define several major parameters to perform multi-task allocation. These parameters are environment map which shows static obstacles (e.g. machineries, product lines), position of robots, position of available tasks, task list, definition of prioritized tasks, energy level of each robot, number of available robots (some may be charging, some may require fixing etc.) and P2P communication with CPS infrastructure. The operating scheme of the proposed adaptive operation model for the logistic robots in CPS based environment is demonstrated in Figure 1. In the multi task allocation algorithm, the energy levels of the robots are questioned after the positions of targets and robots are determined. Then, the optimum task assignment is carried out with other parameters including positions and energy levels.

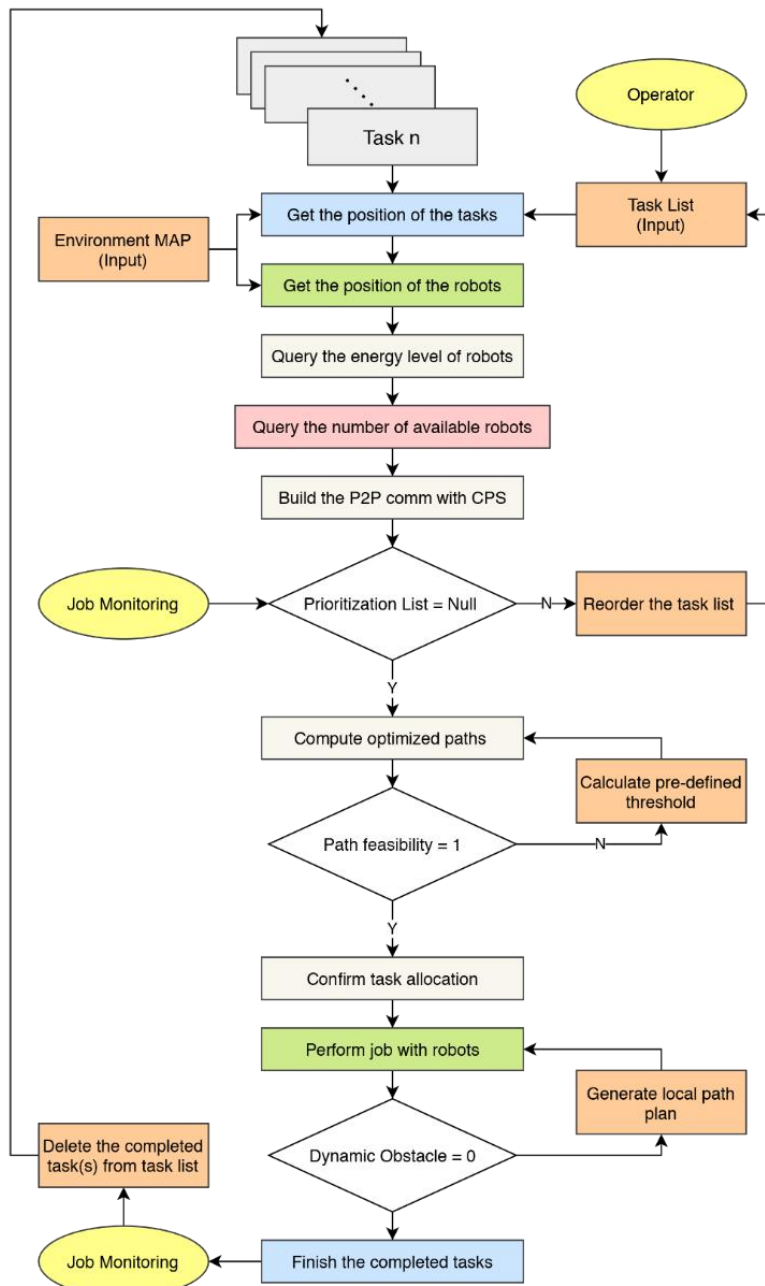


Figure 1. The proposed adaptive operation model for logistic robots in CPS

### 3.2.1. Path planning

The path planning process is required to determine the tracking trajectory used by the logistic robots in the environment. There are multiple tasks, multiple robots and static/dynamic obstacles in the operating environment. There are three types of tasks in the environment; constant tasks, variable tasks and temporary tasks. The static obstacles are generally machineries etc. and the dynamic obstacles are generally other robots or humans etc. Therefore, path planning is performed by taking into account these variable/dynamic and constant/static parameters. There are a lot of path planning approaches in the literature. Dijkstra, A\*, D\*, APF, RRT, Probabilistic Roadmap etc. Each method has different advantages and complexities. The basic steps of the path planning algorithm are as following Algorithm 2. The  $ML_{TR}$  parameter the task-robot matching list,  $OP_n$  is optimal path,  $C_m$  is the conflicts, CPS is central management unit,  $W_s$  is warning signal and  $P_L$  is local path. The parameter  $R_n$  corresponds the

$n_{th}$  robot. Similarly, the parameter  $O_{D_i}$  represents the  $i_{th}$  dynamic obstacle in the environment.  $T_n$  and  $R_n$  indicate the target (or workload) and robot, respectively.

---

**Algorithm 2.** Pseudocode of the path planning algorithm

---

1. **function** PathPlan()
  2.      $ML_{TR} \leftarrow$  Target – Robot matching
  3.      $OP_n \leftarrow$  between  $T_n$  and  $R_n$
  4.      $C_m \leftarrow$  between  $OP_n$
  5.     **if**  $C_m = true$  **then**
  6.         recalculate  $OP_n$
  7.     **if**  $C_m = false$  **then**
  8.          $OP_n \rightarrow R_n$
  9.     TrackRobot( $R_n$ )
  10.    **if**  $R_n$  send  $O_{D_i} = true$  **then**
  11.       run InformCentral()  $\leftarrow$  CPS management unit
  12.     $R_n \rightarrow W_s$
  13.    Determine  $P_L$  to avoid  $O_{D_i}$
  14.    **if**  $T_n$  is max **then**
  15.       **return**  $OP_n$  and  $P_L$
- 

### 3.2.2. Energy management

Logistic robots have battery pack to perform its motions. When the battery goes down to the critical level it needs to be recharged to maintain given tasks. If the tasks are distributed without considering the energy level of the robots, then there may be interruption between tasks and this interruption may affect the whole CPS environment. There may be production delay and critical processes increase the cost and decrease the efficiency. To overcome this problem, energy level of each robot ( $E_{L_n}$ ) is checked and to perform the given  $T_n$  task energy consumption ( $EC_n$ ) is calculated. If the energy level is not enough to complete the given task, then the  $R_n$  robot is directed to the charge station ( $CS_i$ ). If the energy level of the robot decreases to the critical threshold level after completing the given task, then the robot is directed to the charge station to charge the battery, similarly. After battery analysis of the robot, the most suitable robot is assigned to the related task. The  $T_{list}$  and  $R_{next}$  represent the task list and the next available robot, respectively. The pseudocode of the energy management Algorithm 3 is given below.

---

**Algorithm 3.** Pseudocode of the energy management algorithm

---

1. **function** EnergyManagement()
  2.      $EC_n$  of  $R_n$  for  $T_n \in T_{list} \leftarrow$  Calculate
  3.      $E_{L_n}$  of  $R_n$  for  $T_n \leftarrow$  Check
  4.     **if**  $E_{L_n}$  is not feasible  $\leftrightarrow EC_n$  **then**
  5.          $R_n \rightarrow$  nearest  $CS_i$
  6.          $T_n \rightarrow$  nearest  $R_{next}$
  7.     **return**  $E_{L_n}$
-

### 3.2.3. Task prioritization

The regular tasks for the logistic robots are realized according to the process order of robotic systems, machineries and conveyer belts etc. in the CPS. The order of processes is adjusted with respect to logical order of product processing. However, there may be a process that interrupts the whole logistic/production operations. Therefore, an approach is required to put in order the prioritized task/process in task list without stopping the operations. We have developed a task prioritization algorithm to optimize the system bay adding new tasks/jobs. The pseudocode of this process is given in Algorithm 4. The parameter  $T_{list}$  is the available task list. The  $Q_p$  prioritization queue holding prioritized tasks. The  $T_p$  represents the prioritized task. The  $L_{PT}$  label is used to mark  $T_p$  in  $T_{list}$ .

---



---

**Algorithm 4.** Pseudocode of the task prioritization algorithm

---

1. **function** Prioritization()
  2.      $T_{list} \leftarrow$  Get
  3.      $T_n \in T_{list}$  by FIFO  $\leftarrow$  Perform conventional queue balance
  4.      $Q_p$  queue  $\leftarrow$  Check
  5.     **if**  $\forall T_p \in Q_p$  **then**
  6.         Add  $T_p$  to  $T_{list}$  with  $L_{PT}$  label
  7.      $T_p$  acc. to  $L_{PT}$  order in  $T_{list}$   $\leftarrow$  Perform
  8.     completed  $T_p \in T_{list}$   $\leftarrow$  Remove
  9. **return**
- 

### 3.2.4. Path optimization

Path optimization is a critical issue in terms of cost reduction and efficiency increase. When the tasks are distributed among the available logistic robots in the CPS; firstly, positions of both robots and targets are identified. Then energy level of each robot is checked and shortest path between target and robots are calculated. The robot closest to the target is assigned to this target. This process is repeated for all available robots for logistics. If there are some targets ( $T_i$ ) that are not assigned to any robot, those targets will be queued to be assigned to the appropriate robot that completed the given task. After robot-task assignment process, the possible conflicts ( $PC_{list}$ ) between the paths are analyzed and alternative paths are created if there is a critical conflict that have to be eliminated. Another issue is prioritized tasks ( $Q_p$ ) that defined after all general process are completed while robots perform the given tasks. These tasks may give rise to the changes in optimized path trajectories. The paths are recalculated if the prioritized tasks interrupt the logistic operation. The Algorithm 5 being pseudocode is summarized all these processes. The  $T_{list}$  and  $R_{list}$  are the available task and robot lists. The parameters  $P_s$ ,  $T_m$  and  $R_n$  are path, task and robot, respectively. The  $P_{O_n}$  parameter represents the optimized  $n_{th}$  path between  $R_n$  and  $T_m$ .

**Algorithm 5.** Pseudocode of the path optimization algorithm

- 
1. **function** PathOptimization()
  2.      $T_{list}$  and  $R_{list} \leftarrow$  Get
  3.      $P_s$  between  $T_m$  and  $R_n \leftarrow$  Calculate
  4.      $R_n \rightarrow T_m$
  5.     store  $P_{O_n} \leftarrow$  PathPlan()
  6.     **if**  $\forall T_i \in T_{list}$  that is not assigned to any  $R_n$  **then**
  7.         Queue  $T_i \rightarrow Q_p$
  8.     Calculate  $PC_{list}$
  9.      $PC_j \in PC_{list} \leftarrow$  Optimize conflicted path
  10.    **if**  $\forall T_p \in Q_p$  **then**
  11.        **return**  $P_{O_n}$
- 

**3.2.5. Obstacle avoidance**

There are two types of obstacles in the operating environment of CPS. The first type of obstacle is static obstacles and second type is dynamic obstacles. The static obstacles are again two types; permanent static obstacles and temporary static obstacles. The permanent static obstacles are machineries, conveyor belts, fixed electronic devices etc. The temporary static obstacles are obstacles which is placed to a position for a temporary time. The environment map is used to create the path plans. This map includes static obstacles. The permanent ones are predefined to the map. The temporary ones are defined to the map together a time label. Both obstacle types don't affect the path trajectories when robot have performed the assigned task(s). However, the main issue in terms of the obstacles are dynamic obstacles. Their behavior is not predictable to create a static path plan. When they emerge and which direction, they came are ambiguous. The dynamic obstacles can be detected with local (onboard) sensors ( $S_v$ ) placed on the robots to overcome behaviors of dynamic obstacles. After detection process of the dynamic obstacles, the robot sends sound and light warning without attempting any movements. If the obstacle(s) does not respond, the operator(s) of the CPS infrastructure are informed. The robot creates the local path plan to avoid obstacle. This local path plan provides that the robot temporarily goes out from the main path plan and when the obstacle is passed the robot goes into the main path plan. In addition, the robot passes the obstacle with a predefined safe distance threshold. The dynamic obstacle avoidance Algorithm 6 is given below. The parameter  $O_{D_i}$  represents the  $i_{th}$  dynamic obstacle in the environment. The  $W_s$  is the warning signal mentioned before. The  $OP_{(CPS)}$  corresponds to the CPS operator. The parameters  $P_L$  and  $P_M$  are local path and main path, respectively. The  $T_i$  is the  $i_{th}$  task actively processed.

---



---

**Algorithm 6.** Pseudocode of the obstacle avoidance algorithm

---

1. **function** ObstacleAvodiance()
2.      $S_v \leftarrow \text{Get}$
3.     **if**  $S_v \neq 0$  **then**
4.          $O_{D_i} = \text{true}$
5.          $W_s \rightarrow OP_{(CPS)}$
6.     **if**  $O_{D_i} \rightarrow \text{not respond}$  **then**
7.         Create  $P_L$  & Track  $P_L$
8.     **if**  $P_L \text{ completed} = \text{true}$  **then**
9.         Track  $P_M$  until  $T_i$  is completed

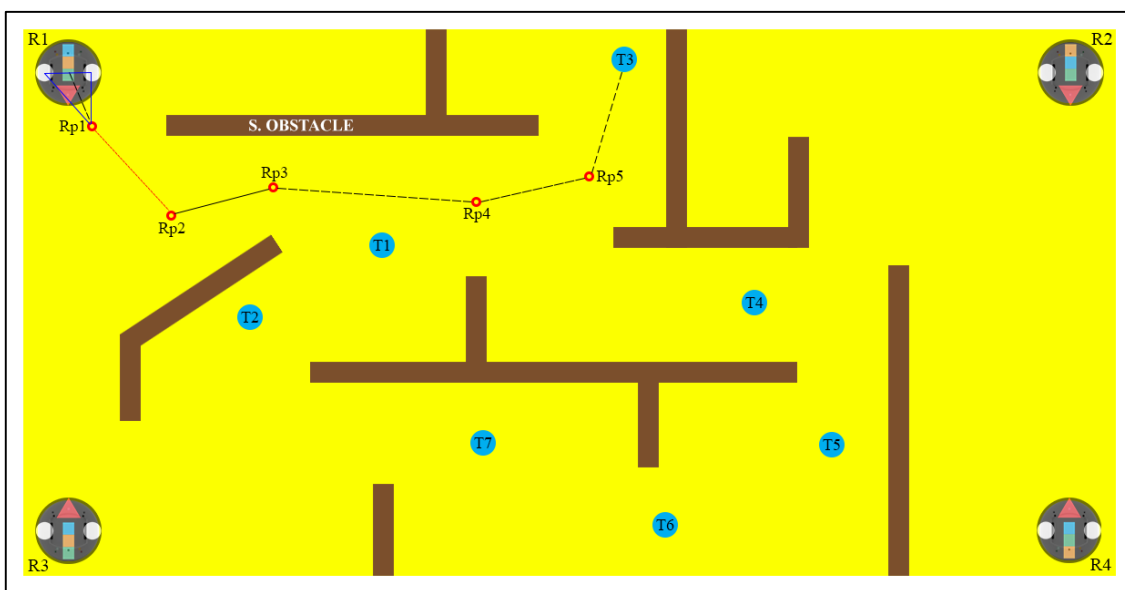
---

### 3.2.6. Job monitoring

The job (task) monitoring module performs the tasks of viewing the list of assigned tasks, monitoring the status of the current tasks and monitoring the completed tasks. In this context, it monitors the prioritized tasks and removes the completed tasks from the task list. In this way, the CPS makes the minimum number of operations to focus on the remaining tasks.

## 4. EXPERIMENTAL RESULTS AND OBSERVATIONS

There are four robots and four seven tasks (targets) for the experiments. Static obstacles are demonstrated with brown color. Each robot is a dynamic obstacle for the other robots. Humans other movable devices are assumed as dynamic obstacles as well. The experimental environment for the proposed adaptive operation model is demonstrated in the following Figure 2. Simulation environment is simply modeled in the MATLAB and Python programming environment. In the figure, R1, R2, R3 and R4 represent the robots. T1, T2, ..., T7 correspond to the targets. The Rp1, Rp2, ..., Rp5 are the representative RFID tags which identifies the key-positions in the main path planning.



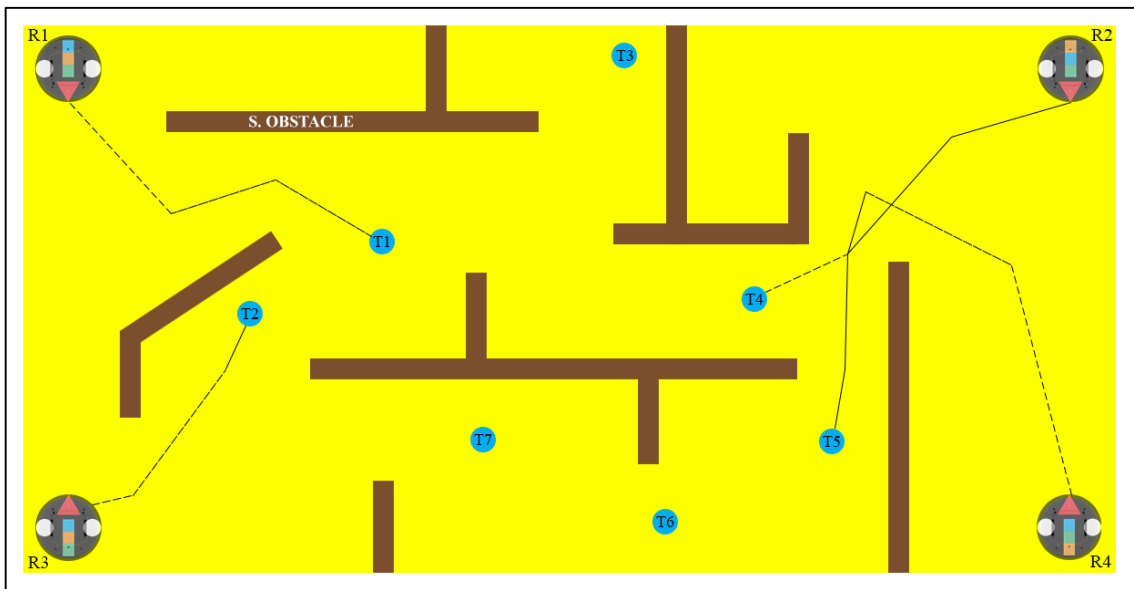
**Figure 2.** Representative operating environment



The RFID tags are used to locate the position of the robots. A sample path plan between the R1 robot and T3 target is shown in the figure as well. The number of robots and targets can be increased. However, to show details of the study with simple structures, a limited number of robots and targets are placed to the CPS system. Robots are simply identified onboard colored tags. Each colored tag has different order of colors to distinct robots. The tasks are distributed by taking into account both distance value and number of the tasks. The path plans are created for four robots between the seven tasks in an obstacle hosted environment. This path plans are demonstrated in Figure 3. The following Table 2 shows the local coordinates of the robots.

**Table 2.** Local (px) coordinates of the robots

Coord.	R1	R2	R3	R4
X	69	1170	69	1170
Y	67	67	571	571



**Figure 3.** Assigned tasks to multiple robots and path plans

The multitask allocation algorithm detects the closest task/target to the robot and assign that target to the robot. The robots perform the assigned tasks simultaneously. When the two or more robot encounter in the operating environment while following the paths, the foremost task in the queue is prioritized. Therefore, the encountered other robots give the path to the robot assigned to this foremost task. These robots simply get out of the path by determining a suitable position. The following Figure 4 shows task allocation process when there are no obstacles in the environment.

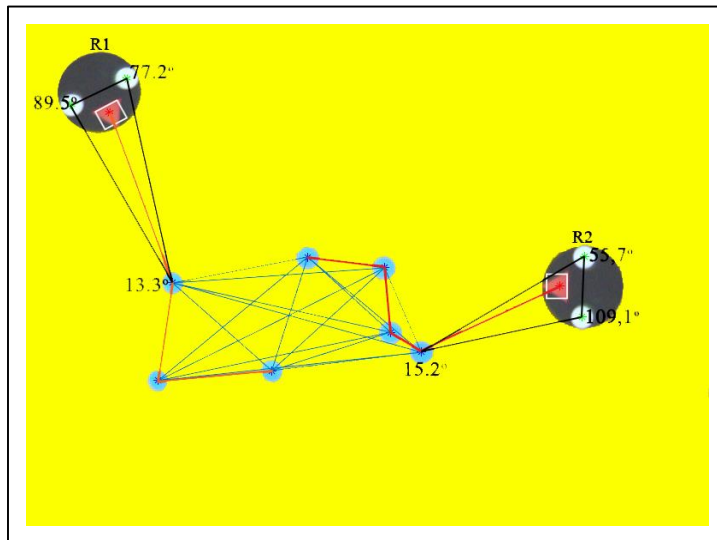


Figure 4. Multi Task allocation without any obstacle(s)

There are 7 task (or targets) and two robots in the Figure 4. The algorithm firstly calculates the distances between the robot and targets. Because of there is no target, distances between the targets are calculated as well. These process is made for all targets and a fully connected graph like structure is acquired. This structure is utilized to determine the shortest path between the allocated targets to the robots. The figure 5 demonstrates a prioritization process. The prioritized task T7 is shown with red color.

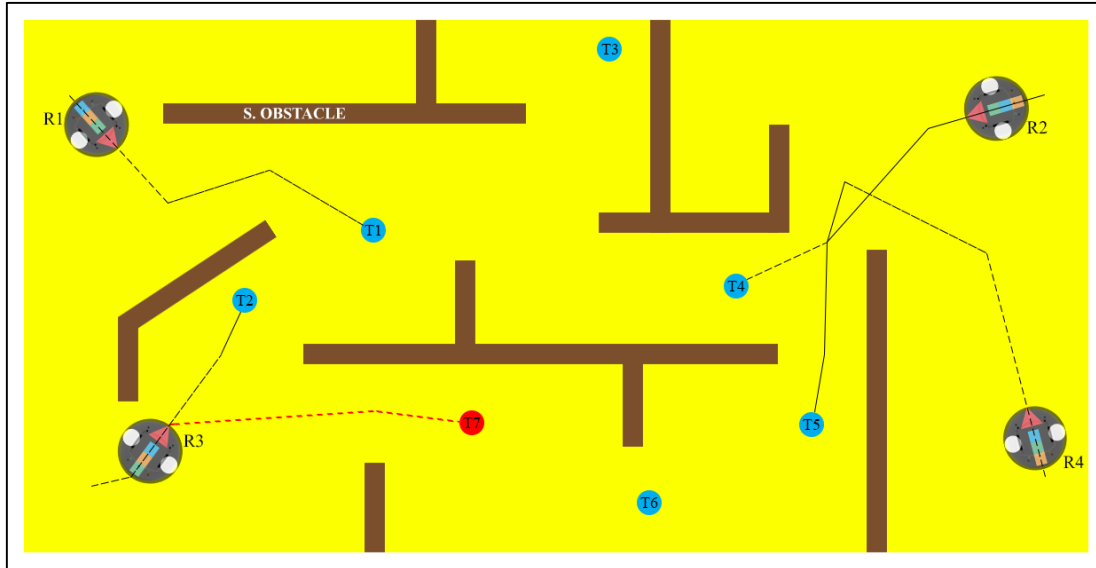


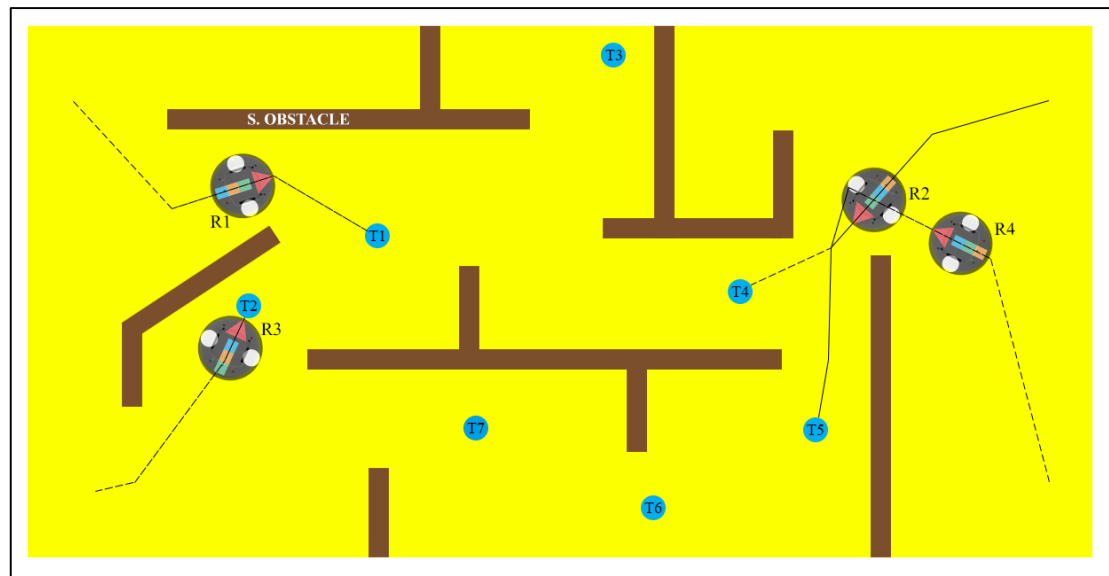
Figure 5. A task prioritization scheme

When a prioritized task is added to the task list, all the robots attempting to perform the assigned tasks are alerted about the prioritized task(s). The robots send the coordinate information of the current location to the CPS. Then the nearest robot to the prioritized task is directed to this target. The canceled task is added to the queue by checking the distances and available robot situations. Therefore, the path optimization algorithm is executed to check if there are any changes in the cost of the paths. The following Table 3 shows the local coordinates for robots when prioritization is employed.

**Table 3.** Local coordinates (px) of the robots

Coord.	R1	R2	R3	R4
X	102	1116	162	1160
Y	139	120	505	492

The Figure 6 shows the obstacle avoidance process between the robot and dynamic obstacle (another robot).

**Figure 6.** Dynamic obstacle avoidance process

The R2 and R4 robots have encountered when they trying to perform the assigned tasks. The R2 robot is a dynamic obstacle for the R4 robot in this situation. Therefore, the R4 robot waits for the R2 robot to pass toward to the T4 target. When the obstacle detection sensors of R4 have not detect any obstacles, the R4 robot maintains its movement to the assigned T5 target. The following Table 4 shows the local coordinates for robots when dynamic obstacle avoidance process is performed.

**Table 4.** Local coordinates (px) of the robots

Coord.	R1	R2	R3	R4
X	262	974	248	1070
Y	200	215	384	265

Several experiments have been conducted and their results are given in the following Table 5. The distance values are computed by utilizing Euclidean distance calculation.

**Table 5.** Experimental results for distance cost and energy

Experiments	Total Distance (px)	Optimized Total Distance (px)	Total Energy (kW)	Optimized Total Energy (kW)
Exp-1	1580	1492	21,6	20,1
Exp-2	1635	1523	23,7	21,4
Exp-3	1442	1411	20,4	19,8
Exp-4	1723	1608	25,8	23,3
Exp-5	1336	1288	19,1	18,6
Exp-6	1434	1368	20,3	19,6
Exp-7	1682	1603	23,9	23,3
Exp-8	1501	1414	21,3	19,4
<b>Average</b>	1541,63	1463,38	22,01	20,69

Seven targets and four robots have been used in the experiments. There are eight experiments and each experiment has different task/target distribution. Each experiment is repeated five times and average value of these experiments have been calculated and placed to the table. Total distance (without system optimization), optimized total distance, total energy (without energy optimization) and optimized total energy parameters have been calculated as the performance metrics to observe the overall system performance. The following equation 1 is utilized the path cost.

$$D_s = \sqrt{\sum_{i=1}^k (q_i - p_i)^2} \quad (1)$$

In this equation, the  $D_s$  represents the distance of the simulated path. The  $k$  parameter  $(q_i, p_i)$  is the number of Cartesian coordinates. Parameter  $k$  is Cartesian coordinates given in the form of  $(q_i, p_i)$  on the path. The cost of the path is made by combining  $n$  part consecutive edges between cartesian coordinates.

Total distances have been optimized according to the path optimization algorithm given before. Additionally, total energy has been calculated by a rate between the total and optimized distances without considering all the environmental factors (e.g. coefficient of friction). However, there may be several dynamic obstacle avoidance operations that increase energy consumption. Therefore, it may be necessary to ignore external factors such as obstacle avoidance. The average has been given to demonstrate the average metric values of the different task configurations. The distance and required energy values changes according to the distribution and position of the tasks. Both distance and energy have been improved with the proposed system by decreasing the total distances and total energy. The distance and energy gains changes in each experiment; the most gained value has been about 6,9% for distance and 9,8% for energy in second experiment (Exp-2). The average gains have been 5,04% and 5,99% for distance and energy optimization, respectively.

## 5. CONCLUSION AND DISCUSSION

The logistic robots in the CPS infrastructures are one of the key components for the overall automation performance. The main factors affecting the autonomous logistics hosted CPS environments are positioning, path planning, multi-task allocation, energy management, task prioritization, optimization and obstacle avoidance issues. All these issues are covered with simple and efficient approaches within the scope of this study. Specific models and pseudocodes of the proposed algorithms are given with their details. A simple simulation environment is created and experiments are conducted in this environment. The conducted experiments have showed that the proposed system can manage the different task configurations while improving the overall performance of logistics robot system being an important component of the CPS. In future, experiment will be conducted in a real laboratory

environment. We plan to adapt deep learning and machine vision methods in this environment to strengthen the proposed models for the logistic robot automation.

## 6. ACKNOWLEDGEMENT

This study was carried out within the scope of the project with the FKP-2020-1993 project code of the İnönü University BAP unit. The study has been supported by Çalık Denim company and the company's R&D Center. The stages required for cyber physical systems have been determined in the company's production site. We would like to thank all institutions and centers that contributed to the study.




## REFERENCES

- Afrin, M.; Jin, J.; Rahman, A.; Tian, Y.C.; Kulkarni, 2019, "A. Multi-objective resource allocation for Edge Cloud based robotic workflow in smart factory.", *Future Gener. Comput. Syst.* 2019, 97, 119–130, doi:10.1016/j.future.2019.02.062.
- Chowdhury, M.; Maier, M., 2017, "Collaborative Computing for Advanced Tactile Internet Human-to-Robot (H2R) Communications in Integrated FiWi Multirobot Infrastructures.", *IEEE Internet Things J.*, 4, 2142–2158, doi:10.1109/JIOT.2017.2761599.
- D'Auria, D., & Persia, F., 2017, "A collaborative robotic cyber physical system for surgery applications.", In *Proceedings - 2017 IEEE International Conference on Information Reuse and Integration, IRI 2017*. <https://doi.org/10.1109/IRI.2017.84>
- Donmez, E., & Kocamaz, A. F., 2019, "The eye-out-device multi-camera expansion for mobile robot control.", *2019 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing Symposium, IDAP 2019*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875981>
- Dönmez, E., & Kocamaz, A. F., 2019, "Multi Target Task Distribution and Path Planning for Multi-Agents.", *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620932>
- Dönmez, E., & Kocamaz, A. F., 2019, "Çoklu Hedeflerin Çoklu Robotlara Paylaştırılması İçin Bir Yük Dengeleme Sistemi." *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.467757>
- Dönmez, E., Kocamaz, A. F., & Dirik, M., 2017, "Bi-RRT path extraction and curve fitting smooth with visual based configuration space mapping.", *IDAP 2017 - International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2017.8090214>
- Ernst, R., 2018, "Automated Driving: The Cyber-Physical Perspective", *Computer*. <https://doi.org/10.1109/MC.2018.3620974>
- Iarovyi, S., Mohammed, W. M., Lobov, A., Ferrer, B. R., & Lastra, J. L. M., 2016, "Cyber-Physical Systems for Open-Knowledge-Driven Manufacturing Execution Systems.", *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2509498>
- Krainer, C., & Kirsch, C. M., 2014, "Cyber-physical cloud computing implemented as PaaS.", *Proceedings of the 4th ACM Workshop on Design, Modeling and Evaluation of Cyber Physical Systems, CyPhy 2014*. <https://doi.org/10.1145/2593458.2593461>
- Krueger, V., Chazoule, A., Crosby, M., Lasnier, A., Pedersen, M. R., Rovida, F., ... Veiga, G., 2016, "A vertical and cyber-physical integration of cognitive robots in manufacturing.", *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2521731>
- Laux, H., Bytyn, A., Ascheid, G., Schmeink, A., Kurt, G. K., & Dartmann, G., 2018, "Learning-based indoor localization for industrial applications.", *2018 ACM International Conference on Computing Frontiers, CF 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3203217.3203227>
- Lee, B. M., & Yang, H., 2018, "Massive MIMO for Industrial Internet of Things in Cyber-Physical Systems.", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2787988>
- Lee, C. K. M., Lin, B., Ng, K. K. H., Lv, Y., & Tai, W. C., 2019, "Smart robotic mobile fulfillment system with dynamic conflict-free strategies considering cyber-physical integration.", *Advanced*

- Engineering Informatics*. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100998>
- Levshun, D., Chevalier, Y., Kottenko, I., & Chechulin, A., 2020, "Design and verification of a mobile robot based on the integrated model of cyber-Physical systems.", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 105, 102151. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102151>
- Li, F., Wan, J., Zhang, P., Li, D., Zhang, D., & Zhou, K., 2016, "Usage-specific semantic integration for cyber-physical robot systems.", *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. <https://doi.org/10.1145/2873057>
- Lu, Y., & Asghar, M. R., 2020, "Semantic communications between distributed cyber-physical systems towards collaborative automation for smart manufacturing.", *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.001>
- Okumuş, F., & Fatih, A., 2019, "Exploring the Feasibility of a Multifunctional Software Platform for Cloud Robotics.", *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing, IDAP 2018*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620865>
- Okumus, F., & Kocamaz, A. F., 2018, "Comparing Path Planning Algorithms for Multiple Mobile Robots.", *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620785>
- Okumus, F., & Kocamaz, A. F., 2019, "Cloud based indoor navigation for ros-enabled automated guided vehicles.", *2019 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing Symposium, IDAP 2019*. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875993>
- Okumus, F., Donmez, E., & Kocamaz, A. F., 2020, "A Cloudware Architecture for Collaboration of Multiple AGVs in Indoor Logistics: Case Study in Fabric Manufacturing Enterprises.", *Electronics*. 9(12). <https://doi.org/10.3390/electronics9122023>
- Schillinger, P.; Bürger, M.; Dimarogonas, D.V., 2018, "Simultaneous task allocation and planning for temporal logic goals in heterogeneous multi-robot systems.", *Int. J. Robot. Res.* 2018, 37, 818–838, doi:10.1177/0278364918774135.
- Schirner, G., Erdogmus, D., Chowdhury, K., & Padir, T., 2013, "The future of human-in-the-loop cyber-physical systems.", *Computer*. <https://doi.org/10.1109/MC.2013.31>
- Semwal, T., Jha, S. S., & Nair, S. B., 2017, "On ordering multi-robot task executions within a cyber physical system.", *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*. <https://doi.org/10.1145/3124677>
- Sztipanovits, J., Koutsoukos, X., Karsai, G., Kottenstette, N., Antsaklis, P., Gupta, V., ... Wang, S., 2012, "Toward a science of cyber-physical system integration.", *Proceedings of the IEEE*. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2161529>
- Turner, J.; Meng, Q.; Schaefer, G.; Whitbrook, A.; Soltoggio, A., 2017, "Distributed Task Rescheduling with Time Constraints for the Optimization of Total Task Allocations in a Multirobot System.", *IEEE Trans. Cybern.* 2018, 48, 2583–2597, doi:10.1109/TCYB.2017.2743164.
- Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V., 2016, "Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0.", *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2565621>
- Yaacoub, J. P. A., Salman, O., Noura, H. N., Kaaniche, N., Chehab, A., & Malli, M., 2020, "Cyber-physical systems security: Limitations, issues and future trends.", *Microprocessors and Microsystems*. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103201>



## PVA/ AMBERLİT İRA 743 HİBRİT MEMBRAN İLE ENDÜSTRİYEL ATIK SUDAN BOR GİDERİMİ

<sup>1</sup>Mehtap ÖZEKMEKÇİ , <sup>2</sup>Derya ÜNLÜ , <sup>3</sup>Mehmet ÇOPUR 

<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>mehtap.ugur@btu.edu.tr, <sup>2</sup>derya.unlu@btu.edu.tr, <sup>3</sup>mehmet.copur@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 24.06.2021 Kabul/Accepted in Revised Form: 06.10.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada, pervaporasyon prosesi ile endüstriyel atık sudan borun uzaklaştırılması incelenmiştir. Bu işlem için Saf PVA ve Amberlit İRA 743 katkılı PVA membranlar hazırlanmıştır. SEM analizinde, saf membranlarda yoğun ve homojen bir yapı gözlenirken, katkılı membranda Amberlit İRA 743 dağılımı açıkça görülmektedir. Amberlit İRA743 ilavesinin ve çapraz bağlanmanın membranın kimyasal bağ yapısında meydana getirdiği değişimler Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ile belirlenmiştir. Membranların suya karşı ilgisi şişme testi ile belirlenirken, yüzey hidrofiliği temas açısı ölçümleriyle araştırılmıştır. Sıcaklığın ve Amberlit İRA 743 yükleme oranının membranın ayırma performansına etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın artması suyun akısını artırırken bor giderimine önemli bir etkisi olmamıştır. Amberlit İRA 743 miktarının artması ile suyun akısı azalırken bor giderimi artmıştır. PVA/Amberlit İRA 743 membranların endüstriyel atık sulardan bor gideriminde yüksek ayırma performansı gösterdiği ve %99'dan daha fazla oranda bor giderildiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bor, Endüstriyel atık su, PVA, Amberlit İRA 743, Pervaporasyon

### Boron Removal from Industrial Wastewater with A PVA/ Amberlite İRA 743 Hybrid Membrane

**ABSTRACT:** In this study, the removal of boron from industrial wastewater was investigated by the pervaporation process. Pristine PVA and Amberlite İRA 743 doped PVA membranes have been prepared for this process. In the SEM analysis, while the dense and homogeneous structure was observed in pristine membranes, Amberlite İRA 743 distributions in doped membrane were seen clearly. The changes in the chemical bond structure of the membrane that is caused by the addition of Amberlite İRA 743 and cross-linking were determined by Fourier transform infrared (FTIR). While the affinity of the membranes on water was determined by the swelling test, the surface hydrophilicity was investigated by contact angle measurements. The effects of temperature and Amberlite İRA 743 amount were investigated on separation performance. While the increase in temperature increased the water flux, it did not have a significant effect on boron removal. While the water flux decreased, the boron removal increased with the increase of Amberlite İRA 743 amount. It has been determined that PVA Amberlite İRA 743 membranes show high separation performance in boron removal from industrial wastewater and more than 99% boron is removed.

**Key Words:** Boron, Industrial wastewater, PVA, Amberlite İRA 743, Pervaporation

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye bünyesinde bulunan 3.3 milyar ton bor rezervi ile Dünya bor rezervinin yaklaşık %73'üne sahiptir. Eti maden işletmelerinin rafine bor üretim kapasitesi ise 2.7 milyar tondur (Eti maden, 2016). Rafine bor ürünlerinin üretimi sırasında yüksek miktarda bor içeren atık sular oluşmaktadır. Borlu atık sular yer altına sızarak yağmur suları ile yüzey sularına karışarak hem yer altı hem de yüzey sularının

kirlenmesine neden olur. Bor içeren atık suların yer altı ve yer üstü sularına karışmasıyla birlikte Pb, Cd, Cu ve Ni gibi ağır metallerle kompleksler oluşur ve bu kimyasal yapılar onları oluşturan ağır metallere göre daha zararlı etkiler yaratır (Seiler ve diğ., 1998).

Bor hem canlıların hem de bitkilerin büyümesi için gerekli olmakla birlikte, fazla miktarda maruz kalınması durumunda canlılar üzerine toksik etki göstermektedir. Aynı zamanda uzun süreli bor maruziyeti organizmayı zehirleyerek, insan ve hayvanlarda sinir, kardiyovasküler ve sindirim sistemlerine zarar verebilir. Dünya sağlık örgütü içme sularındaki bor konsantrasyonunu 2011 yılında 2.4 mg/L olarak belirlemiştir (DSÖ, 2011). Türk çevre mevzuatı kriterlerine göre denize deşarj edilecek sudaki bor miktarı 500 mg/L'yi geçmemelidir (Ates ve diğ., 2018). Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda yüksek konsantrasyonlarda bor içeren sulardan ve bor endüstriyel atık sulardan borun giderilmesi önem kazanmaktadır.

Sulardan borun uzaklaştırılması için uygulanan membran prosesleri; ters osmoz (Pastor ve diğ., 2001; Glueckstern ve Priel, 2003; Öztürk ve diğ., 2008; Cengeloglu ve diğ., 2008), ultrafiltrasyon (Tortora ve diğ., 2018), membran distilasyon (Belessiotis ve diğ., 2016); geleneksel ayırma prosesleri ise adsorpsiyon (Kavak, 2009; Ozturk ve Kavak, 2004; Celik ve diğ., 2008), iyon değişimi (Kabay ve diğ., 2007; Kabay ve diğ., 2008), elektrokoagülasyon (Isa ve diğ., 2014; Garcia Segura ve diğ., 2017) ve çöktürmedir (Ates ve diğ., 2018; Yilmaz ve diğ., 2012). Bu prosesler sulardan bor uzaklaştırılması için uygulamada belirli sınırlamalara sahiptir. Adsorpsiyon işleminde sulardan bor uzaklaştırmada maliyet olarak uygun gözükse de, bor uzaklaştırma verimliliği büyük ölçüde sıcaklık, pH ve adsorbent özelliklerinden etkilenmektedir. Aynı zamanda bu yöntemde adsorbent etkinliğini yitirdikten sonra ekstra bir rejenerasyon işlemi gerekir (Hou ve diğ., 2013). Bu durum adsorbentin kapasitesini azaltabilir ve ikinci bir kirliliğe sebep olur. Yüksek bor derişimli sulardan bor gideriminde kullanılan çöktürme prosesi deşarj limitlerine bağlı olarak hem tek başına hem de çok kademeli arıtım proseslerinde bor konsantrasyonunu düşürmek için diğer proseslerle birlikte kullanılabilir (Ates ve diğ., 2018). Bununla birlikte bu yöntemde kullanılan metal hidroksitin, düşük bor giderimi ve çok miktarda geri dönüştürülemeyen atık oluşturması yöntemin uygulanmasını kısıtlamaktadır. Atık sulardan bor giderimi için membran prosesleri de uygulanmaktadır. Uygulanan membran proseslerinden ters osmozda, %91-96 seviyelerinde borun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Ancak bu yöntemde, atık suyun deşarj olmadan önce iyon değişimi gibi yöntemler kullanılarak arıtılması ek proses gerektirir (Pasoto ve diğ., 2001; Glueckstern ve Priel, 2003; Busch ve Mickols, 2004). Gözenekli membran proseslerinin kullanılması, membran gözeneklerin tıkanması ile tüm sürecin işletme maliyetini artıracak düzenli ve pahalı bir bakım gerektirmektedir. Membran distilasyonla yapılan ayırma işleminde zamanla azalan performans ve yüksek enerji tüketimi, bu prosesin dezavantajlarıdır (Salehi ve Rastomani, 2013). Bununla birlikte, membran distilasyonunun önemli avantajı iyonların, moleküllerin ve kolloidlerin yüksek oranda arıtılmasıdır (Belessiotis ve diğ., 2016).

Pervaporasyon geleneksel ayırma işlemlerine alternatif bir ayırma prosesidir. Son yıllarda pervaporasyon prosesi ile içme ve kullanma suyu elde etmek için atık suların ve deniz sularının arıtılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Prihatiningtyas ve diğ., 2020; Meng ve diğ., 2019). Pervaporasyon, mükemmel ayırma performansı, düşük enerji tüketimi, ekonomik olması, ılımlı operasyon koşulları, ilave kimyasal kullanımı gerektirmemesi ve çevre dostu olması nedeniyle pek çok uygulamada tercih edilmektedir (Peters, 2006; Assabumrungrat ve diğ., 2003; Unlu ve Hilmioglu, 2016). Pervaporasyonda ayırma işlemi yoğun membran kullanılması dolayısıyla çözelti-difüzyon mekanizmasına göre gerçekleşir. Bu mekanizma modeli, besleme çözeltisindeki bileşenlerin membran malzemesinde çözündüğü ve daha sonra membran boyunca bir konsantrasyon gradyanına doğru difüzlendiği modeldir. Membran malzemesi içinde bileşenlerin çözünürlüklerindeki ve yayılma hızındaki farklılıklar nedeniyle, farklı geçirgenlikler arasında bir ayırma sağlanır. Pervaporasyon prosesi ile borlu suyun arıtılmasında, beslemedeki su, hidrofilik membran ile yüksek etkileşime sahiptir ve membran yüzeyine mükemmel bir şekilde adsorbe olur ve yoğun membran malzemesinde çözünür. Konsantrasyon gradyanı ile membran boyunca difüze olur ve membranın diğer tarafından düşük basınç sebebiyle desorbe olarak ayırma işlemi gerçekleşir. Membran boyunca taşımada itici güç bileşenin



membranın besleme tarafındaki buhar basıncı ile ürün tarafındaki buhar basıncı arasındaki farktır (Huang, 1991).

Bu çalışmada membran malzemesi olarak hidrofilik özellikteki Polivinil alkol (PVA) polimeri tercih edilmiştir. PVA, yapısında bulunan hidroksil (OH) gruplarından dolayı sahip olduğu hidrofilik karakteri sayesinde pervaporatif dehidrasyon ve desalinasyon uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir polimerdir. Yüksek kimyasal, termal, ve mekanik dayanım gösterir. Ayrıca iyi film oluşturma özelliğine sahiptir (Yılman ve diğ., 2019). PVA membranda borun tutularak seçiciliğin artırılması için membrana Amberlit IRA 743 katkı maddesi ilave edilmiştir. Amberlit IRA 743 bir anyon değişim reçinesi olup, yapısında aktif N-metil glukamin gruplarına sahip makro gözenekli polistiren bir malzemedir. N-metil-glukamin, yapısında bulunan sorbitol grup sayesinde borik asit ve boratların reçine ile stabil bir kompleks oluşturmasına olanak sağlar (Darwish ve diğ., 2015). Böylece borun Amberlit IRA 743 tarafından tutulması membrandan sadece suyun transfer olması sağlanır.

Bu çalışmada, borun pervaporasyon prosesi ile atık suda gideriminde kullanılmak üzere Amberlit IRA 743 katkılı PVA membranları hazırlanmıştır. Literatürde PVA/Amberlit IRA 743 membranları kullanılarak borun atık sularından pervaporasyon prosesi kullanılarak uzaklaştırılmasına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### Materyal (Material)

Membran hazırlamada kullanılan PVA 90,000 molekül ağırlığına sahiptir ve Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Glutaraldehit (%25 sulu çözelti), hidroklorik asit (%37), aseton (%99) ve Amberlit IRA 743 Sigma Aldrich firmasından satın alınmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan atık su Balıkesir Eti Maden İşletmelerinden temin edilmiş olup, suyun kimyasal analizi ICP-OES ile yapılmıştır. Analiz sonucu Çizelge 1'de verilmiştir. Temin edilen suyun pH değeri 7,91 olup, filtre edildikten sonra deneylerde kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Atık suyun kimyasal analizi

*Table 1. Chemical analysis of wastewater*

Bileşenler (mg/L)					
B	Ca	Mg	Si	Fe	Na
2900	317.95	325	6.25	0.06	0.08

### Membranların Hazırlanması (Preparation of Membranes)

PVA, saf su içerisinde çözülerek ağırlıkça %5 lik homojen membran dökme çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti içerisine polimer ağırlığının %0.1, %0.2 ve %0.3 ü olmak üzere 3 farklı oranda Amberlit IRA 743 reçinesi eklenerek, manyetik karıştırıcıyla karıştırılıp homojen bir dağılım sağlandıktan sonra elde edilen hibrit çözelti cam yüzeye dökülerek oda sıcaklığında (25±2 °C) kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan membranların suda çözünmesini engellemek için çapraz bağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Membranlar 30 mL aseton, 10 mL su, 2 mL glutaraldehit ve 2 mL HCl içeren çapraz bağ çözeltisinde 3 saat bekletilerek çapraz bağlanma sağlanmıştır. Membranlar çapraz bağ banyosundan çıkartılıp üzerinde kalan kimyasallar uzaklaştırmak için saf su ile yıkanmıştır.

### Membran Karakterizasyonu (Membrane Characterization)

Hazırlanan membranların morfolojik özellikleri Bursa Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında ZEISS marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Membranlar SEM görüntülerinin alınması için sıvı azotta kırılarak vakum altında altın ile kaplanmıştır.

Membranların fonksiyonel gruplarının belirlenmesi için Perkin Elmer FTIR spektroskopi cihazı kullanılarak analiz 400-4500  $\text{cm}^{-1}$  bant aralığında gerçekleştirilmiştir. Membranların hidrofilikliği Attension/Theta marka cihaz ile temas açılı ölçülerek belirlenmiştir.

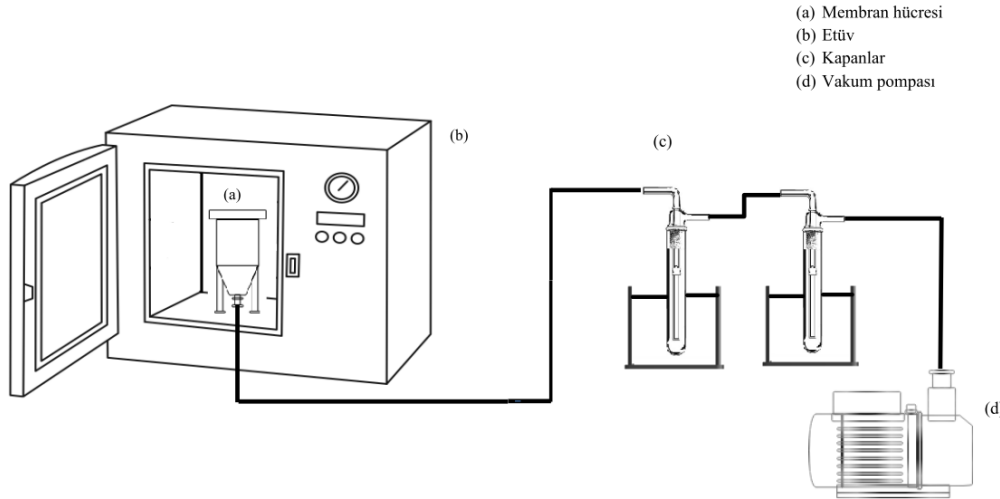
### Şişme Testi (Swelling Test)

Hazırlanan membranların suya karşı ilgisini belirlemek için şişme testleri yapılmıştır. Membranlar tartılarak ilk ağırlıkları belirlendikten sonra oda sıcaklığında içerisinde membranların üstlerini kaplayacak miktarda saf su bulunan petri kaplarına konulmuş ve belirli zaman aralıklarla petri kaplarından alınmış ve üzeri filtre kağıdı ile kurulandıktan sonra tartılmıştır. Bu işlem membran ağırlığı sabitlenene kadar devam etmiştir. Şişme derecesi Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır. Eşitlik 1 de,  $M_s$  şişmiş olan membranın ağırlığını,  $M_d$  ise kuru membranın ağırlığını temsil etmektedir.

$$\%SD = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

### Pervaporasyon Deneyleri (Pervaporation Experiments)

Pervaporasyon deneyleri Şekil 1'de verilen laboratuvar ölçekli pervaporasyon ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Pervaporasyon deney düzeneği; (a) 9.6  $\text{cm}^2$  efektif membran alanına sahip ayırmanın gerçekleştiği çelik membran hücresi (b) besleme çözeltisini sabit sıcaklıkta tutmak için etüv (c) geçen buhar ürününü yoğunlaştırmak için kapanlar ve (d) sistemi vakum altında tutan vakum pompasından oluşmaktadır.



**Şekil 1.** Deney düzeneği

*Figure 1.* Experimental setup

Pervaporasyon deneylerinde Saf PVA ve Amberlit IRA 743 katkılı PVA membranları kullanılmıştır. Amberlit IRA 743 konsantrasyonunun bor giderimine etkisi oda sıcaklığında ( $25 \pm 2$  °C) %0.1, %0.2 ve %0.3 Amberlit IRA743 katkılı PVA membranları kullanılarak yapılan deneylerle incelenmiştir. Sıcaklığın etkisini incelemek için %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membran kullanılarak 40°C ve 50 °C olmak üzere 2 farklı sıcaklıkta deneyler yapılmıştır. Deney süresi boyunca sıcaklığın sabit kalması için membran hücresi bir etüv içerisine yerleştirilmiştir. Deneye başlamadan 1 saat önce etüv çalıştırılarak deney düzeneğinin belirlenen sıcaklığa gelmesi sağlanmıştır. Deneylerde 30 mL bor içeren atık su çözeltisi

membran hücresine konularak, 5 saat süreyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Pervaporasyon sisteminde besleme kısmı tamamen atmosfere kapatılmış olup ürün kısmında ise 10 mbar vakum uygulanmıştır. Membrandan buharlaşarak ayrılan ürün akımı sıvı azot dolu kapların içerisine yerleştirilen kaparlarda yoğunlaştırılarak tekrar sıvı olarak alınmıştır. Kapanlardan alınan sıvı numuneler tartılmış ve suyun akışı Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda numunelerin içerisindeki bor analizi ICP-OES cihazıyla yapılmış ve membranın bor alıkoyma yüzdesi Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$J = \frac{m}{A \cdot t} \quad (2)$$

$$R (\%) = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (3)$$

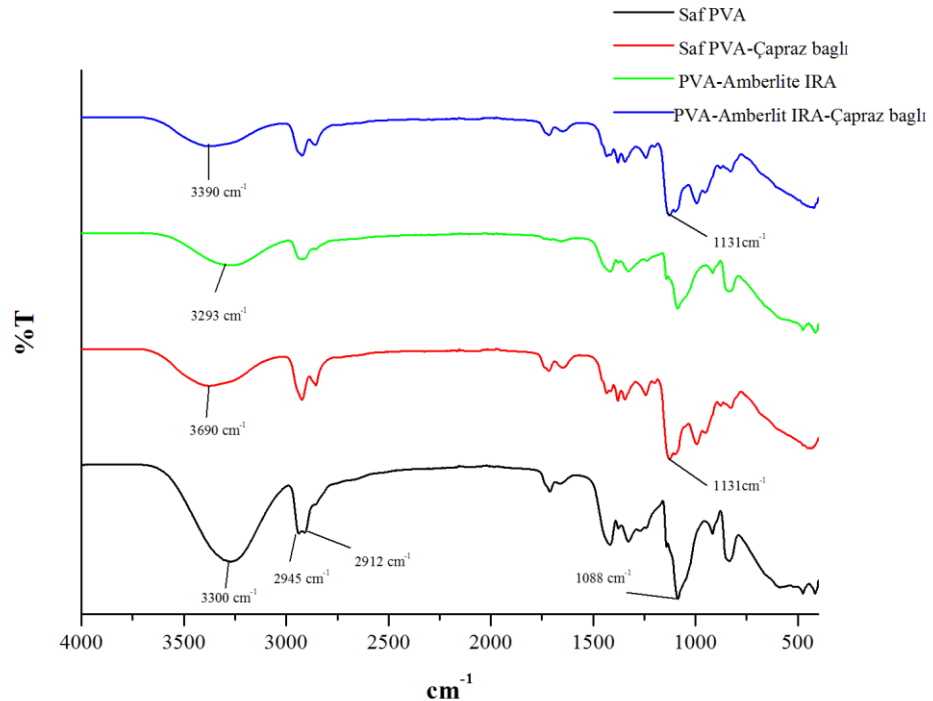
Eşitlik 2'de m membrandan geçen madde miktarını (kg), t; işlem süresini (saat), A; membranın efektif aktif alanını (m<sup>2</sup>), Eşitlik 3'te C<sub>f</sub> beslemedeki bor konsantrasyonunu, C<sub>p</sub> ise geçen akımdaki bor konsantrasyonunu göstermektedir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### Membran Karakterizasyonu (Membrane Characterization)

#### FTIR analizi (FTIR analysis)

PVA ve Amberlit IRA 743 kullanılarak hazırlanan membranlara ait FTIR spektrumları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PVA membranlarına ait FTIR analiz sonuçları

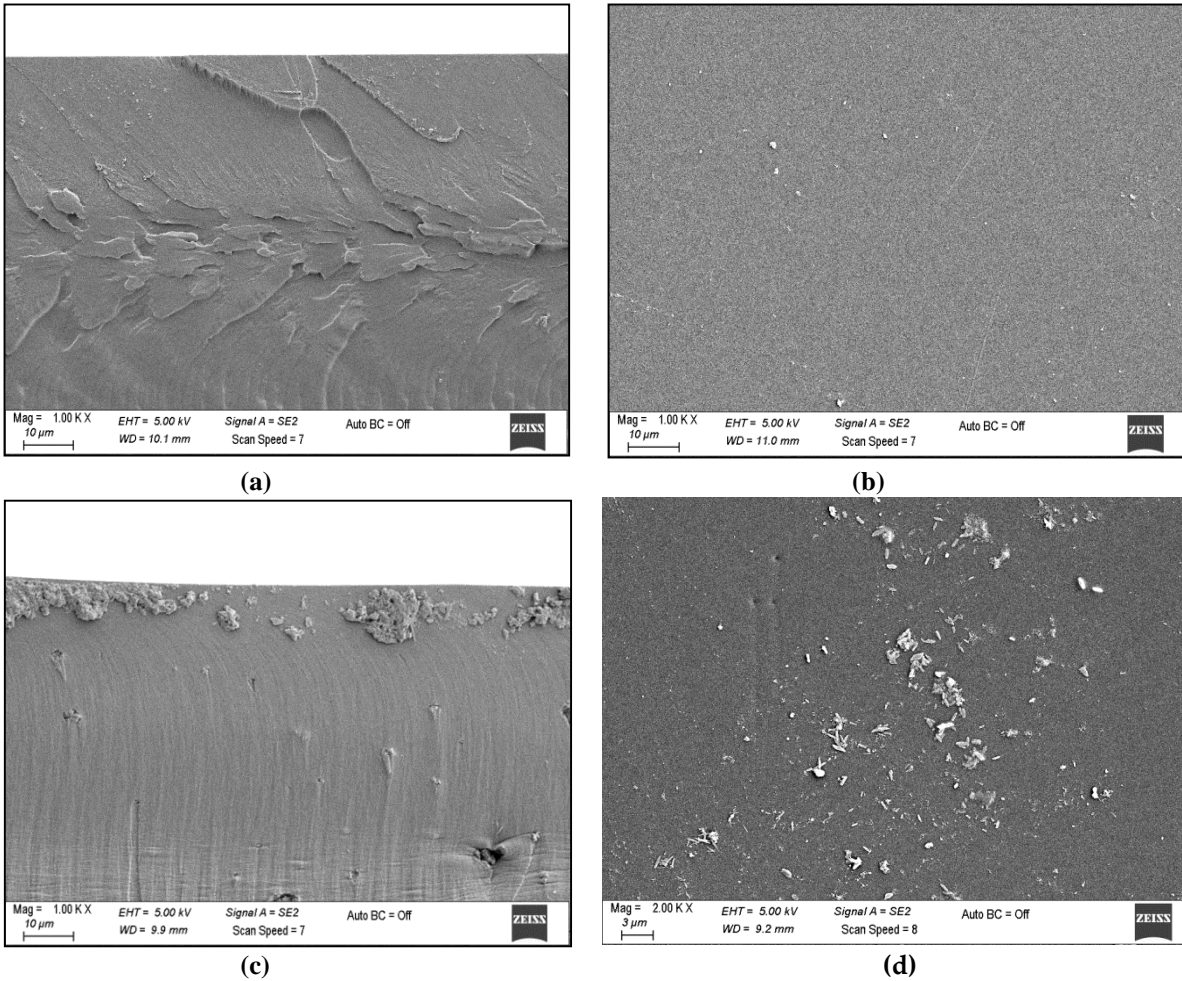
Figure 2. FTIR analysis results of PVA membranes

Verilen spektrumlara göre 3000-3600 cm<sup>-1</sup>'de yer alan geniş bant aralığı PVA yapısında bulunan molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağlarından kaynaklanan OH'nin karakteristik pikidir. PVA

yapısında bulunan  $\text{CH}_2$  bandının simetrik ve simetrik olmayan gerilimleri sırasıyla  $2945 \text{ cm}^{-1}$  ve  $2912 \text{ cm}^{-1}$  'de yer almaktadır.  $1088 \text{ cm}^{-1}$  'de yer alan pik PVA matrisinde bulunan C-OH'ın gerilimini temsil eder. FTIR analizi çapraz bağlanma hakkında da bilgi verir. Çapraz bağlama işlemi reaksiyon, PVA'nın yapısında bulunan hidroksil grupları ile glutaraldehit arasında gerçekleşir. Bundan dolayı membranlarda yapılan çapraz bağlama işlemi sonrası OH gruplarına ait pikin yoğunluğunun azaldığı ve piklerin kaydığı görülmektedir. Çapraz bağlamada PVA ve glutaraldehit arasında gerçekleşen reaksiyonda oluşan asetata (C-O-C) ait pik  $1130 \text{ cm}^{-1}$  'de yer almaktadır (Unlu, 2020; Rudra ve diğ., 2015). %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membranlar incelendiğinde, PVA içerisine eklenen Amberlit IRA 743'ün membranın yapısını değiştirmedeği görülmektedir. Bununla birlikte eklenen Amberlit IRA 743 ile spektrumda piklerin yoğunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. Amberlit IRA 743 polimer yapısına eklendiğinde PVA matrisinde kimyasal olarak bir değişiklik meydana getirmemiş, dolayısıyla eklenen Amberlit IRA 743 PVA ile fiziksel olarak etkileşime girmiştir.

### SEM analizi (SEM analysis)

Çapraz bağlı saf PVA ve %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı PVA membranlarının SEM analizi yapılmıştır. Membranların yüzey ve kesit görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Verilen şekilde a ve b sırasıyla Saf PVA membranına ait kesit ve yüzey görüntüsünü temsil ederken, c ve d sırasıyla %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membrana ait kesit ve yüzey görüntüsüdür.



Şekil 3. PVA membranlarına ait SEM analiz sonuçları

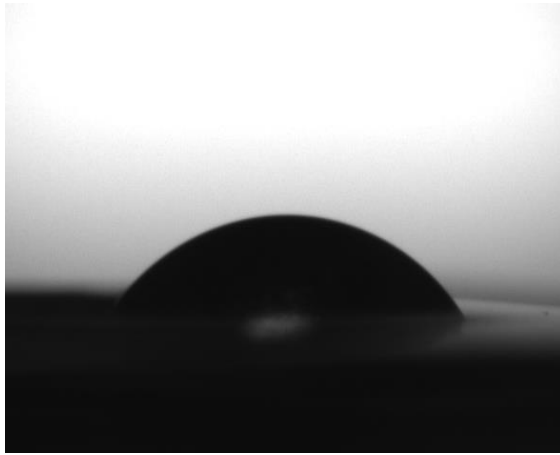
Figure 3. SEM analysis results of PVA membranes

Saf PVA kullanılarak hazırlanan membranın yüzeyi pürüzsüz ve homojen bir yapıya sahip olduğu

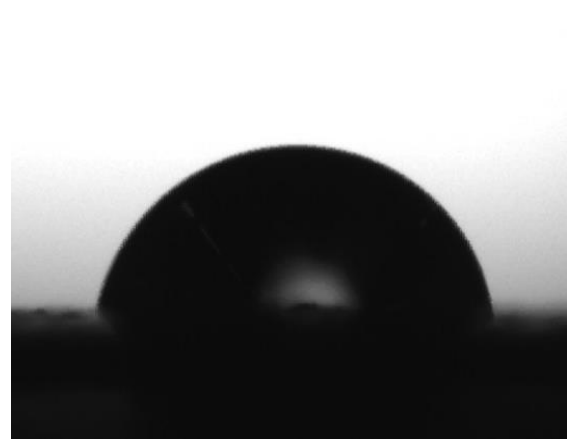
Şekil 3'deki SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Membranın kesit görüntüsünde tek bir polimer tabakasından oluştuğu gözükmemektedir. Amberlit IRA 743 katkı PVA membranın üzerinde Amberlit IRA 743 reçinesine ait tanecikler gözlenmektedir. Bu membranların da saf PVA gibi yoğun ve gözeneksiz olduğu Şekil 3'deki SEM görüntülerinde görülmektedir. Şekil 3'de membranın yüzey ve kesit görüntülerine bakıldığında Amberlit IRA 743'ün membran içerisinde kümeleşmeler oluşturduğu gözükmemektedir.

#### Temas açısı (Contact angle)

PVA kullanılarak hazırlanan membranlara ait temas açısı sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.



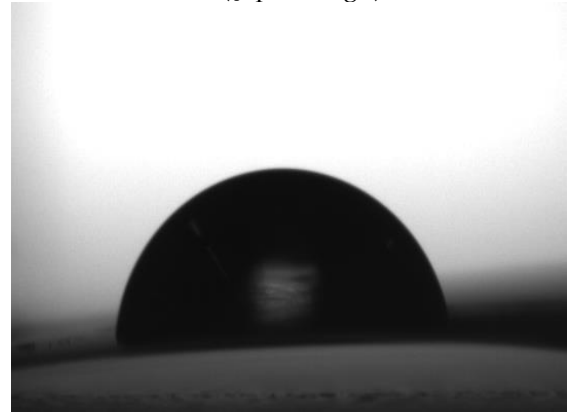
Saf PVA (çapraz bağımsız)-48.68°



Saf PVA (çapraz bağlı)-76.36°



%0,2 Amberlit IRA 743 katkı PVA (çapraz bağımsız)-48.89°



%0,2 Amberlit IRA 743 katkı PVA (çapraz bağlı)-77.54°

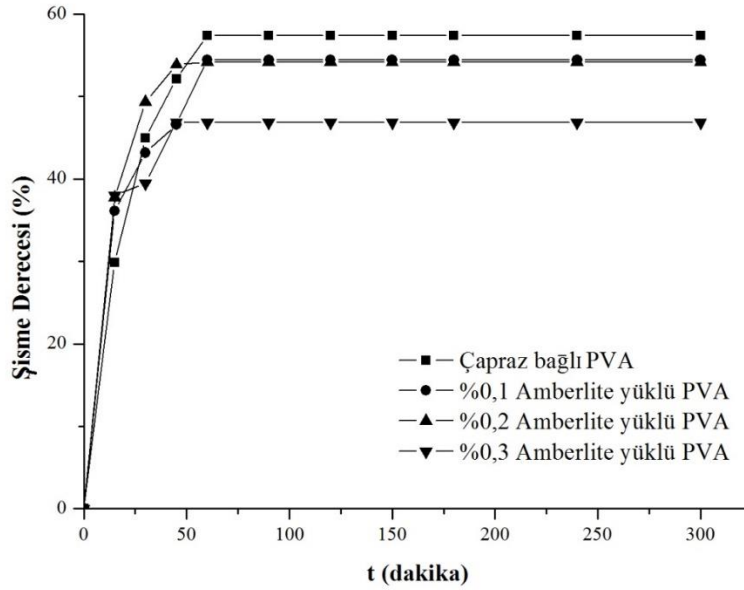
Şekil 4. PVA membranlarına ait temas açısı sonuçları

Figure 4. Contact angle results for PVA membranes

Çapraz bağlanmayan membranların suya karşı ilgisi daha fazla olduğundan temas açıları 48° olduğu görülürken, çapraz bağlanan membranlarda ise temas açısı 76° olarak tespit edilmiştir. Çapraz bağlanan membranların temas açısı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Membranlar glutaraldehitte çapraz bağlandığında PVA yapısında bulunan -OH grupları azalır, dolayısıyla hidrofilitiklik de azalır (Zhang ve diğ., 2019). Amberlit IRA 743 polimer yapısına eklendiğinde PVA matrisinin kimyasal yapısında bir değişiklik meydana getirmediği FTIR analizi ile belirlenmiştir. Bağ yapısında bir değişim olmaması dolayısıyla PVA'nın hidroksil grupları etkilenmemiş, bu nedenle Amberlit IRA 743 katkı ve katkısız membranların temas açıları dolayısıyla hidrofilitelerinde bir fark gözlenmemiştir. Bu sonuç FTIR sonuçlarını da destekler niteliktedir.

### Şişme Testi Sonuçları (Swelling Test Results)

Membranın şişme davranışı, kullanılan polimer yapısına ve bileşimine bağlıdır. Hazırlanan membranların su tutma kapasitesi ile membranların suya karşı olan ilgisi orantılıdır. Deneysel çalışmalarda kullanılan PVA ve farklı oranlarda Amberlit IRA 743 katkılı membranlara ait şişme derecesi Şekil 5'te verilmiştir.



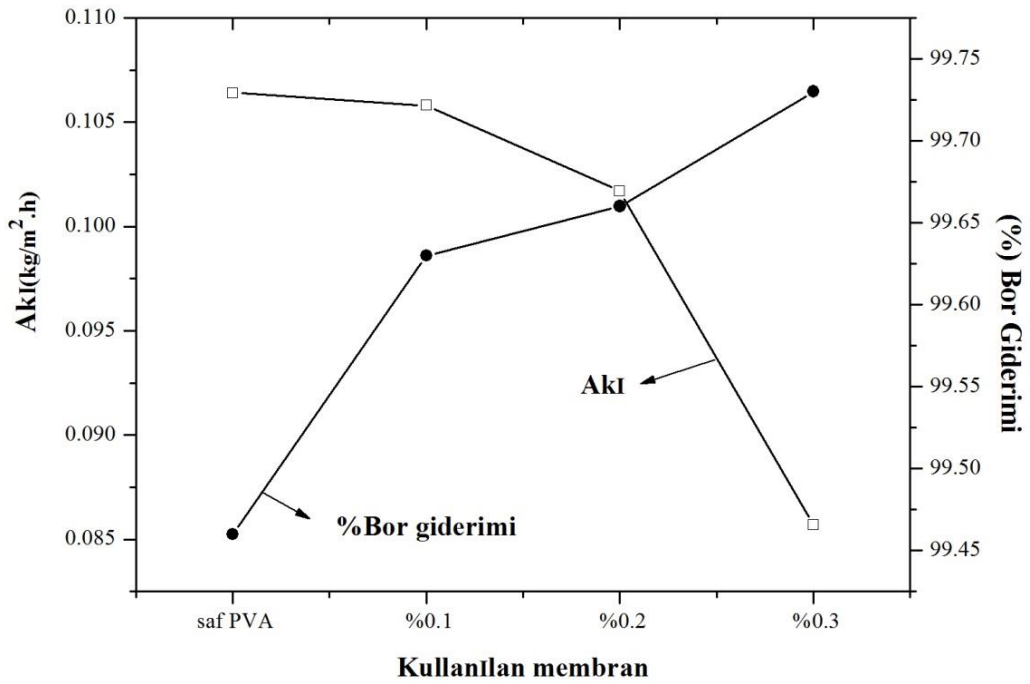
Şekil 5. PVA membranlarının su içerisindeki şişme derecesi

Figure 5. Swelling degree of PVA membranes in water

PVA molekülleri arasında su molekülleri kolayca girebilmekte ve membran çözünmektedir. Bu nedenle çapraz bağlanmamış saf PVA membranı su içerisinde kolayca şişerek membran yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Yapılan şişme testi deneylerinde de çapraz bağlanmamış saf PVA membranı 30 dakika boyunca suda dayanım göstermiş, sonra çözülmüştür. Bu nedenle Şekil 5'te çapraz bağlanmamış saf PVA membranının şişme sonucu gösterilmemiştir. Çapraz bağlanmamış saf PVA'nın şişme derecesi 30 dakika da %198 iken, çapraz bağlı membranda bu değer %57'dir. Dolayısıyla elde edilen bu değerler, çapraz bağlama işleminin, membranın su molekülleri tarafından şişmesini azalttığını gösterir. PVA yapısında bulunan -OH gruplarından dolayı hidrofilik bir polimer malzemesidir (Yilman ve diğ., 2019). Çapraz bağlamada PVA yapısında bulunan hidroksil grupları ile glutaraldehit arasında reaksiyon gerçekleşir. Bu durum PVA yapısında bulunan hidroksil gruplarında azalmaya sebep olur. Bu yüzden çapraz bağlı membranlarda meydana gelen şişme derecesi çapraz bağlı olmayan saf membrandan daha düşüktür (Unlu, 2020; Rudra ve diğ., 2015). Çapraz bağlama işlemiyle membranların suda çözünmeleri engellenmiştir. Amberlit IRA 743 katkılı membranların saf PVA membranına kıyasla şişme derecesi daha düşüktür. Amberlit IRA 743, hidrofobik yapıda olan stiren ve n-metil glukamin içermektedir (Lobinski ve Marczenko, 1999). Dolayısıyla hidrofobik karakterden dolayı Amberlit IRA 743 miktarının artmasıyla birlikte membranda suyun tutulma oranı düşmüş, şişme derecesi de azalmıştır.

### Pervaporasyon Deneysel Sonuçları (Pervaporation Experiment Results)

PVA ve Amberlit IRA 743 kullanılarak hazırlanan membranlarla, oda sıcaklığında yapılan deneylere ait akı ve bor giderim sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.

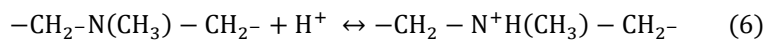
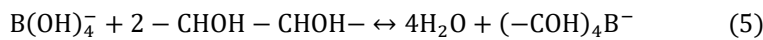
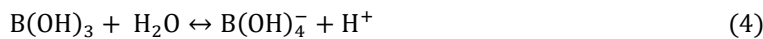


Şekil 6. Amberlit IRA 743 miktarının bor giderimi ve akıya etkisi

Figure 6. Effect of Amberlit IRA 743 te amount on boron removal and flux

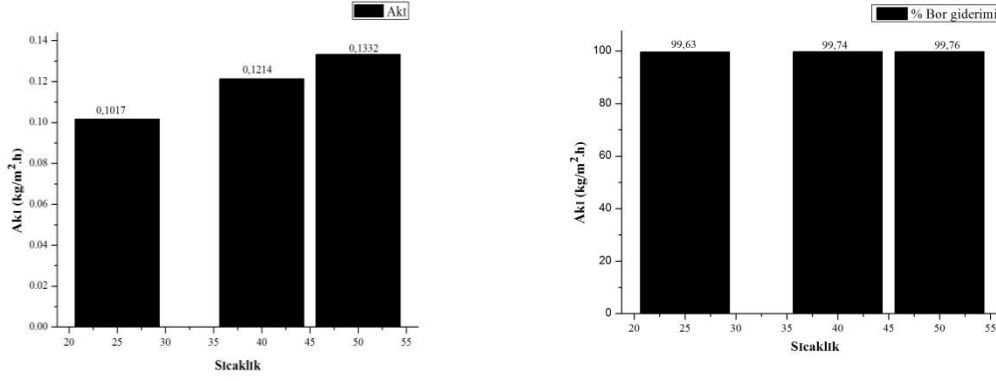
Şekil 6'da görüldüğü gibi 5 saat süreyle gerçekleştirilen deneylerde analiz edilebilecek miktarda numune elde edilmiştir. Bunun yanı sıra yapılan analizler sonucunda hedeflenen ayırma verimine ulaşıldığı için deneyler 5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.

PVA hidroksil gruplarına sahip olduğu için hidrofilik bir polimerdir. Dolayısıyla suyla hidrojen bağı yaparak etkileşim kurar ve su geçişine izin verir (Nigiz, 2018; Tırnakçı ve diğ., 2020). Veriler incelendiğinde katılan Amberlit IRA 743 miktarı arttıkça bor giderimi artarken akı düşmektedir. %0.2'den fazla Amberlit IRA 743 kullanıldığında akıda daha fazla azalma meydana gelmiştir. Kullanılan Amberlit IRA 743, hidrofobik doğası gereği, membrandan su geçişini engelleyerek, akıda azalmaya sebep olmuştur. PVA membranı kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en yüksek bor giderimi %99.73 olup, %0.3 Amberlit IRA 743 katkılı membranda gerçekleşmiştir. Membranda Amberlit IRA 743 konsantrasyonu arttıkça sudan uzaklaştırılan bor miktarı da artmıştır. Bu durum, toplam yüzey alanı ve reçine üzerinde borun bağlandığı bölge sayısının artmasıyla açıklanabilir (Darwish ve diğ., 2015). Amberlit IRA 743 reçinesi kullanılarak borun giderim mekanizması Eşitlik 4-6'da verilmiştir. Borat iyonları reçinede bulunan sorbitol ile kompleks oluşturur. Zayıf bir bazik anyon değiştirici olarak davranan n-metil glukamin yapısında bulunan tersiyer amin grupları ayrışma reaksiyonu sırasında serbest bırakılan protonu yakalayıp çözelti pH'ını kontrol eder (Darwish ve diğ., 2015; Simonnot ve diğ., 2000; Yılmaz ve diğ., 2005).



%0.1 Amberlit IRA 743 ve %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membranda akı değerleri sırasıyla 0.1058 ve 0.1017 kg/m<sup>2</sup>h olarak belirlenmiştir. %0.3 Amberlit IRA 743 katkılı membranda ise akı 0.0857 kg/m<sup>2</sup>h

olarak tespit edilmiştir. Hem akı hem de bor giderimi göz önünde bulundurulduğunda % 0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membran kullanılarak sıcaklığın bor giderimi ve akı üzerine etkisi incelenmiştir. Sıcaklığın etkisinin incelenmesi 25°C, 40°C ve 50°C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Sıcaklığın akı ve bor giderimi üzerine etkisi

Figure 7. Effect of temperature on flux and boron removal

Şekil 7 incelendiğinde sıcaklığın artması, suyun akısını artırırken bor giderimine önemli bir etkisi olmamıştır. Pervaporasyon işleminde itici güç besleme basıncı ile çözünen arasındaki kısmı buhar basıncı farkıdır. Artan sıcaklıkla birlikte besleme tarafındaki suyun buhar basıncı da artar. Besleme tarafındaki basınç arttığında ürün akım tarafındaki buhar basıncı sabit kaldığı için itici güç artar. Dolayısıyla suyun akısı da artar. Aynı zamanda, artan sıcaklıkla birlikte polimer zincirlerinin hareketliliği artarak daha esnek hale gelir ve polimer matrisinde daha fazla serbest hacim bölgesi oluşur. Serbest hacim teorisine göre, amorf bir bölgedeki polimer zincirlerinin termal hareketi ile anlık serbest hacimler yaratılır. Sıcaklığın artmasıyla zincir hareketlerinin artmasına dolayısıyla polimerin serbest hacim bölgesinin büyüyen su moleküllerinin daha kolay difüze olmasına olanak sağlar (Zhang ve diğ., 2019; Peters ve diğ., 2006; Xie ve diğ., 2011). Sıcaklık 40 °C’den 50 °C’ye artırıldığında suyun akısı 0.1214 kg/m²h’den 0.1332 kg/m²h’ye artış göstermiştir. %0.2 Amberlit IRA 743 kullanılarak elde edilen membranlar ile oda sıcaklığı (25±2 °C) , 40°C ve 50 C’de yapılan deneylerde bor giderimi sırasıyla %99.66, %99.74 ve %99.76 olarak bulunmuştur. Çalışılan sıcaklık aralığında sıcaklığın bor giderimi üzerine önemli bir etkisi olmamıştır.

Saf PVA membranı ve Amberlit IRA 743 katkılı membranlar kullanılarak yapılan ayırma işlemlerinde geçen akımda bulunan su içerisindeki bileşenler ve konsantrasyonları Çizelge 2’de verilmiştir.



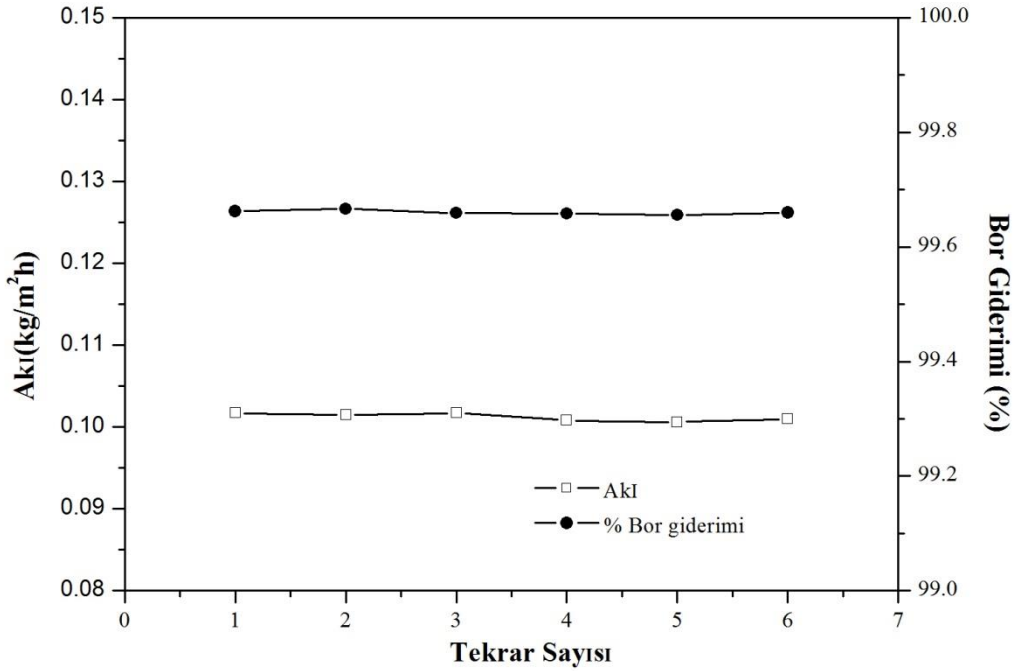
**Çizelge 2.** Endüstriyel atık su ile geçen suyun deneysel sonuçlarının karşılaştırılması*Table 2. Comparison of experimental results of permeate water with industrial wastewater*

<b>Analiz (mg/L)</b>	<b>B</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Na</b>	<b>R<sub>B</sub> (%)</b>	<b>R<sub>Ca</sub> (%)</b>
Atıksu	2900	317.95	325	6.25	0.06	0.08	-	-
Saf PVA geçen su	15.6	2.2	-	-	-	-	99.46	99.31
%0.1 Amberlit IRA 743 katkılı PVA geçen su	10.7	2.12	-	-	-	-	99.63	99.33
%0.2 Amberlit IRA 743 katkılı PVA geçen su	9.8	2.13	-	-	-	-	99.66	99.33
%0.3 Amberlit IRA 743 katkılı PVA geçen su	7.78	2.2	-	-	-	-	99.73	99.31
%0.2 Amberlit IRA 743 katkılı PVA geçen su- 40 °C	7.55	1.94	-	-	-	-	99.74	99.39
%0.2 Amberlit IRA 743 katkılı PVA geçen su- 50 °C	7.02	1.86	-	-	-	-	99.76	99.42

Yapılan deneylerde Amberlit IRA 743 oranı arttıkça bor gideriminin arttığı görülmektedir. Yapılan bu çalışmada, bor ile birlikte atıksu içerisinde bulunan diğer iyonların da ayrılması proses açısından büyük bir önem taşımaktadır. Endüstriyel atık sulardaki Mg, Si, Fe, Na iyonları da pervaporasyon prosesi ile atıksudan tamamen uzaklaştırılmıştır.

Yeniden kullanılabilirliğin ayırma performansına etkisi, %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membran kullanılarak incelenmiştir. Membran aynı deney koşullarında 6 kez kullanılmıştır. Tekrar deneylerinde elde edilen akı ve bor giderimi Şekil 8'de verilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre birinci kullanımdan altıncı kullanıma kadar benzer akı ve bor giderimi gözlemlenmiş olup, ilk kullanımda akı ve bor giderimi sırasıyla 0.1017 kg/m<sup>2</sup>h ve %99.66 olarak elde edilirken altıncı kullanımdan sonra %99.65 bor giderimi ve 0.1010 kg/m<sup>2</sup> h akı elde edilmiştir. Şekil 8'de verildiği gibi elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Yapılan bu tekrarlanabilirlik testiyle hazırlanan %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membranın iyi bir mekanik ve kimyasal stabilite sergilediği belirlenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda 2900 mg/L bor konsantrasyonunun %99 seviyesinde giderilmesi elde edilmiştir. Yapılan tekrarlanabilirlik testi sonucunda membranların rejenerasyonuna gerek olmadığına karar verilmiştir. Tekrarlanabilirlik testlerinde sistemde kullanılan membran herhangi bir muamale uygulanmadan tekrar kullanılmış, ancak ayırma performansında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bu da membranın rejenerasyona ihtiyaç duymadığını göstermiştir.



Şekil 8. %0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membranın tekrar kullanılabilirliği

Figure 8. Reusability of 0.2% Amberlit IRA 743 doped membrane

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Endüstriyel atık sudan borun giderilmesi için PVA ve Amberlit IRA 743 katkılı PVA hibrit membranları hazırlanmıştır. Sentezlenen membranlarla 2900 mg/L Bor içeren endüstriyel atık sudan borun %99'dan daha fazlası giderilmiştir. Artan Amberlit IRA 743 miktarıyla birlikte bor gideriminin arttığı tespit edilmiştir. Bor giderimi % 0.2 Amberlit IRA 743 katkılı membranda besleme sıcaklığı 50 °C'de %99.76 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan membranlar ayrıca endüstriyel atık suyun içerisinde bulunan diğer iyonların da giderilmesini sağlamıştır. Yapılan deneysel çalışmada yüksek bor giderimi değerleri elde edilmesi ile beraber, düşük akı değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın bu yönü geliştirilmeye açıktır. Yapılan bu çalışma, endüstriyel atık sulardan borun gideriminde pervaporasyon prosesinin kullanılabilirliğini ortaya koymuş, ayrıca yeni bir membran geliştirilmesi ile literatüre katkıda bulunmuştur.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 191N015 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Assabumrungrat, S., Phongpatthanapanich, J., Praserttham, P., Tagawa, T. and Goto, S., 2003, "Theoretical study on the synthesis of methyl acetate from methanol and acetic acid in pervaporation membrane reactors: effect of continuous-flow modes", Chemical Engineering Journal, Vol. 95, No.(1-3), pp. 57-65.
- Ateş, Ç., Bayraktar, B., Bilen, M., 2018, "Yanıt yüzey yöntemi ile bir bor fabrikası atık suyu kimyasal

- artırma sürecinde optimum koşulların belirlenmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Vol. 33, No.1, pp. 267-278.
- Belessiotis, V., Kalogirou, S., Delyannis, E., 2016, Thermal solar desalination: Methods and systems,, Joe Hayton publication, Chennai, India.
- Busch, M., Mickols, W. E., 2004, “Reducing energy consumption in seawater desalination”, Desalination, Vol. 165, pp. 299-312.
- Celik, Z. C., Can, B. Z., Kocakerim, M. M., 2008, “Boron removal from aqueous solutions by activated carbon impregnated with salicylic acid”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 152, No.1, pp. 415-422.
- Cengeloglu, Y., Arslan, G., Tor, A., Kocak, I., Dursun, N., 2008, “Removal of boron from water by using reverse osmosis”, Separation and Purification Technology, Vol. 64, No.2, 141-146.
- Darwish, N. B., Kochkodan, V. Hilal, N., 2015, “Boron removal from water with fractionized Amberlite IRA 743 resin”, Desalination, Vol. 370, pp.1-6.
- DSÖ, 2011, “Guidelines for drinking-water quality”. WHO chronicle, Vol. 38, No.4, pp. 104-108.
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, 2016, Faaliyet Raporu 2016 yılı, Erişim adresi: <https://www.etimaden.gov.tr/storage/Etik%20Komisyon/2016Yili%20Etik%20FR.pdf>.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S., de Melo, J. V., Martínez-Huitle, C. A., 2017, “Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other Technologies”, Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 801, pp. 267-299.
- Glueckstern, P., Priel, M., 2003, “Optimization of boron removal in old and new SWRO systems”. Desalination, Vol. 156, No.1-3, pp. 219-228.
- Hou, D., Dai, G., Wang, J., Fan, H., Luan, Z., Fu, C., 2013, “Boron removal and desalination from seawater by PVDF flat-sheet membrane through direct contact membrane distillation”, Desalination, Vol. 326, pp. 115-124.
- Huang, R.Y.M., 1991, Pervaporation Membrane Separation Processes,, Elsevier Science Publishers BV: Amsterdam.
- Isa, M. H., Ezechi, E. H., Ahmed, Z., Magram, S. F., Kutty, S. R. M., 2014, “Boron removal by electrocoagulation and recovery”, Water research, Vol. 51, pp. 113-123.
- Kabay, N., Sarp, S., Yuksel, M., Arar, Ö., Bryjak, M., 2007, “Removal of boron from seawater by selective ion exchange resins”, Reactive and Functional Polymers, Vol. 67 No.12, 1643-1650.
- Kabay, N., Sarp, S., Yuksel, M., Kitis, M., Koseoğlu, H., Arar, O., Semiat, R., 2008, “Removal of boron from SWRO permeate by boron selective ion exchange resins containing N-methyl glucamine groups”, Desalination, Vol. 22, 3 No.1-3, pp. 49-56.
- Kavak, D., 2009, “Removal of boron from aqueous solutions by batch adsorption on calcined alunite using experimental design”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 163 No.1, pp. 308-314.
- Lobinski, R., Marczenko, Z., 1996, Comprehensive Analytical Chemistry, Elsevier Publisher.
- Meng, J., Li, P., Cao, B., 2019, “High-flux direct-contact pervaporation membranes for desalination”. ACS applied materials & interfaces, Vol. 11, No. 31, pp. 28461-28468.
- Nigiz, F. U., 2018, “Dahili Membran Reaktörde Kullanılmak Üzere Yüksek Performanslı Polivinil Alkol Membran Üretimi ve Etanol-Propiyonik Asit Esterleşme Reaksiyonunda Uygulaması”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Vol. 22, No. 2, pp. 1095-1103.
- Öztürk, N., Kavak, D., 2004, “Boron removal from aqueous solutions by adsorption on waste sepiolite and activated waste sepiolite using full factorial design”, Adsorption, Vol. 10, No. 3, 245-257.
- Öztürk, N., Kavak, D., Köse, T. E., 2008, “Boron removal from aqueous solution by reverse osmosis”, Desalination, Vol. 223, No.1-3, pp. 1-9.
- Pastor, M. R., Ruiz, A. F., Chillon, M. F., Rico, D. P., 2001, “Influence of pH in the elimination of boron by means of reverse osmosis”, Desalination, Vol. 140, No.2, 145-152.
- Peters, T. A., 2006, Catalytic pervaporation membranes for close integration of reaction and separation.

- Phd Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Peters, T. A., Poeth, C. H. S., Benes, N. E., Buijs, H. C. W. M., Vercauteren, F. F., Keurentjes, J. T. F., 2006, "Ceramic-supported thin PVA pervaporation membranes combining high flux and high selectivity; contradicting the flux-selectivity paradigm", *Journal of Membrane Science*, Vol. 276, No.1-2, pp.42-50.
- Prihatiningtyas, I., Gebreslase, G. A., Van der Bruggen, B., 2020, "Incorporation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> into cellulose triacetate membranes to enhance the performance of pervaporation for desalination of hypersaline solutions", *Desalination*, Vol. 474, No. 114198.
- Rudra, R., Kumar, V. and Kundu, P. P., 2015, "Acid catalysed cross-linking of poly vinyl alcohol (PVA) by glutaraldehyde: effect of crosslink density on the characteristics of PVA membranes used in single chambered microbial fuel cells" *RSC advances*, Vol. 5, No.101, 83436-83447.
- Salehi, M. A., Rostamani, R., 2013, "Review of membrane distillation for the production of fresh water from saline water", *Journal of Novel Applied Science*, Vol. 2, pp.1072-1077.
- Seiler, H. G., Sigel, H., Sigel, A., 1988, *Handbook on toxicity of inorganic compounds*, New York: Elsevier.
- Simonnot, M. O., Castel, C., Nicolai, M., Rosin, C., Sardin, M., Jauffret, H., 2000, "Boron removal from drinking water with a boron selective resin: is the treatment really selective", *Water Research*, Vol.34, No.1, pp. 109-116.
- Tirnakci, B., Salt, Y., Salt, İ., Keyf S., 2020, "Klinoptilolit Dolgulu PVA Membranların Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Pervaporasyon ile Desalinasyon Çalışması", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Vol. 18, pp. 711-718.
- Tortora, F., Innocenzi, V., di Celso, G. M., Vegliò, F., Capocelli, M., Piemonte, V., Prisciandaro, M., 2018, "Application of micellar-enhanced ultrafiltration in the pre-treatment of seawater for boron removal", *Desalination*, Vol. 428, pp. 21-28.
- Unlu, D., Hilmioglu, N. D., 2016, "Pervaporation catalytic membrane reactor study for the production of ethyl acetate using Zr(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O coated chitosan membrane", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 91, No. 1, pp. 122-130.
- Ünlü D., 2020, "Biyoyakıt Bütanolün Metal Organik Kafes (MOF) içeren Karışık Matrisli UiO-66/PVA Membranlar Kullanılarak Pervaporasyon Prosesi ile Dehidrasyonu", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 10, No.1, pp. 275-285.
- Xie, Z., Ng, D., Hoang, M., Duong, T., Gray, S., 2011, "Separation of aqueous salt solution by pervaporation through hybrid organic-inorganic membrane: effect of operating conditions", *Desalination*, Vol. 273, No.1, pp. 220-225.
- Yilman, B., Nigiz, F. U., Aytaç, A. and Hilmioglu, N. D., 2019, "Multi-walled carbon nanotube doped PVA membrane for desalination", *Water Supply*, Vol. 19, No.4, pp.1229-1237.
- Yılmaz, A. E., Boncukcuoglu, R., Yılmaz, M. T., Kocakerim, M. M., 2005, "Adsorption of boron from boron-containing wastewaters by ion exchange in a continuous reactor". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 117, No.2-3, pp. 221-226.
- Yılmaz, A. E., Boncukcuoglu, R., Bayar, S., Fil, B. A., Kocakerim, M. M., 2012, "Boron removal by means of chemical precipitation with calcium hydroxide and calcium borate formation", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 29, No.10, pp. 1382-1387.
- Zhang, R., Liang, B., Qu, T., Cao, B., Li, P., 2019, "High-performance sulfosuccinic acid cross-linked PVA composite pervaporation membrane for desalination", *Environmental technology*, Vol. 40, No. 3, pp. 312-320.



## ATMOSFERİK BRÜLÖRDE ENJEKTÖR ÇAPLI, ENJEKSİYON HIZI VE HAVA GİRİŞ DELİKLERİ SAYISININ HAVA-YAKIT KARIŞMASINA ETKİSİNİN NÜMERİK İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Seyda ÖZBEKTAŞ , <sup>2</sup>Bilal SUNGUR , <sup>3</sup>Bahattin TOPALOĞLU 

<sup>1,3</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun, TÜRKİYE

<sup>1</sup>seyda.ozbektas@omu.edu.tr, <sup>2</sup>bilal.sungur@samsun.edu.tr, <sup>3</sup>btopal@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 07.06.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.10.2021)

**ÖZ:** Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil kökenli kaynaklardan karşılanmaktadır. Ancak fosil enerji kaynaklarının giderek azalması, araştırmacıları mevcut kaynaklara alternatif olabilecek yeni yakıt arayışlarına ve eldeki kaynakları daha verimli kullanmaya yöneltmiştir. Ayrıca enerji üretilirken genelde bir yakma sisteminden faydalanılır ve yakma sisteminin verimi yanma kalitesiyle yakından ilgilidir. Gaz yakıtın durgun hava içine enjekte edildiği ve gereken yakma havasını emmek suretiyle yakma havasını yakıtın kendisinin temin ettiği yakıcılar atmosferik yakıcılar olarak bilinir ve bu yakıcılarda hava-yakıt karışma oranları yanma kalitesini belirlemede önemli bir paya sahiptir. Bu çalışmada örnek bir atmosferik brülörde enjektör çapının ve enjeksiyon hızının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında iki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımların brülördeki hava/yakıt karışmasına etkisi incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modellenmesinde Standard k-ε modeli kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, enjeksiyon hızının artması sürüklenen hava hızını arttırıcı yönde etki göstermiş, artan enjeksiyon hızıyla birlikte oluşan girdapların da boyutlarının büyüdüğü görülmüştür. Ayrıca hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak λ değerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artışın önemli seviyelerde olmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atmosferik brülör, Enjektör, Nümerik modelleme

### Numerical Investigation of the Effect of Injector Diameter, Injection Velocity and Air Inlet Hole Numbers on Air-Fuel Mixing In Atmospheric Burner

**ABSTRACT:** The world's energy needs are mostly supplied from fossil sources. However, the gradual decrease in fossil energy resources has led researchers to search for new fuels that can be an alternative to existing resources and to use the available resources more efficiently. In addition, a combustion system is generally used when generating energy and the efficiency of the combustion system is closely related to the combustion quality. Burners in which gaseous fuel is injected into still air and the combustion air supplied by the fuel itself by sucking the required combustion air are known as atmospheric burners, and air-fuel mixing ratios in these burners have an important role in determining the combustion quality. In this study, the effect of injector diameter and injection velocity on air-fuel mixing in a sample atmospheric burner was investigated numerically. Additionally, the effect of designs with two, four, eight and infinite air inlet holes on the air/fuel mixing in the burner was investigated. Calculations were made at three dimensional conditions. Standard k-ε model was used as turbulence model. Results showed that the increase in the injection velocity increased the entrained air velocity, and with the increasing injection velocity vortices size increased. In addition, it has been observed that with the increase in the number of

air intake holes, the air penetrates more and consequently the  $\lambda$  value increases. However, it was determined that this increase was not significant.

**Key Words:** Atmospheric burner, Injector, Numerical modeling

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, günlük yaşamın vazgeçilmez bir unsurudur ve gün geçtikçe artan nüfus ve teknolojiye paralel olarak enerji ihtiyacı da artmaktadır. Bununla birlikte enerji üretiminde kullanılan kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklı yakıtlar giderek tükenmektedir ve bu kaynaklar çevreye zararlı emisyonlar yaymaktadır.

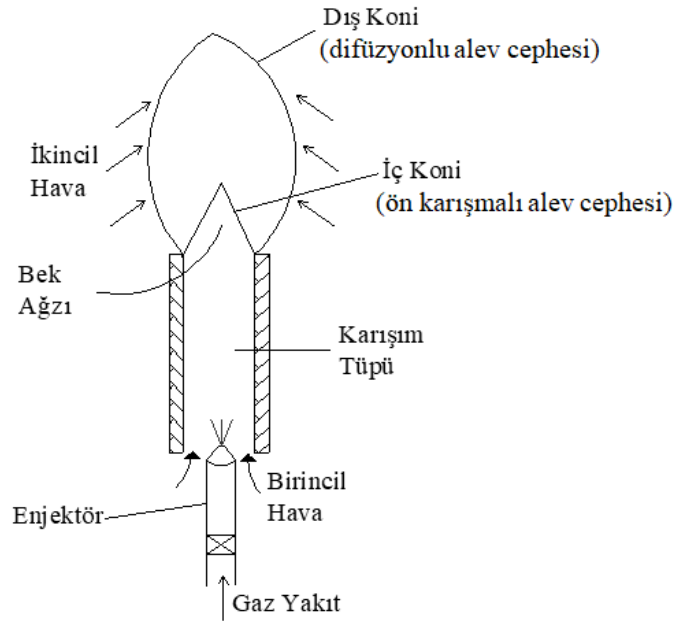
Gaz yakıtlar denildiğinde akla ilk gelen ve en çok kullanılan yakıt doğalgazdır. Özellikle son yıllarda konut, sanayi ve sosyal tesislerde doğalgaz kullanımı yaygınlaşmıştır. Doğal gaz kullanımının artmasıyla birlikte karbon emisyonlarında da artış beklenmektedir. Ayrıca enerji fiyatlarının her geçen gün artması da doğalgazın uygun sistemlerle verimli bir şekilde kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

Gaz yakıtlı brülörlerde, brülör geometrisi, yakıt tipi, birincil ve ikincil hava miktarları, hava fazlalık katsayısı gibi pek çok parametre değiştirilerek verim artışı sağlanabilir. Tüm bu parametrelerin deneysel olarak incelenebilmesi oldukça pahalı ve zaman alıcıdır. Bu nedenle bu tarz problemlerin çözümünde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) programlarından yararlanılabilir. Özellikle son yıllarda bilgisayar teknolojisinde olan hızlı ilerlemeler HAD programlarını daha cazip hale getirmiştir ve yanma gibi kompleks problemlerin çözümünde oldukça tercih edilir.

Yanma veya alev çeşitleri yakıtla oksijenin karıştırılmasına göre ön karıştırmalı, kısmen ön karıştırmalı ve sonradan karıştırmalı şeklinde sınıflandırılabilir. Gaz yakıtın durgun hava içine enjekte edildiği ve gereken yakma havasını emmek suretiyle yakıtın kendisinin temin ettiği yakıcılar atmosferik yakıcılar adıyla bilinir. Böylece bir fana gerek kalmamaktadır. Şekil 1’de bir atmosferik gaz yakıcısının şematik gösterimi verilmiştir. Enjektörden gelen gaz jeti etrafında negatif basınç oluşturur. Bu negatif basınç nedeniyle, ortam havası yakıt jeti etrafında sürüklenir. Yakıt jeti ile birlikte sürüklenen birincil hava karışım tüpüne girer. Daha sonra birincil hava ve gaz karıştırma odasında karışır. Elde edilen karışım, karışım tüpünden çıkar ve ikincil hava ile karşılaşır. İlk kıvılcım verildikten sonra yanma işlemi gerçekleşir. Bu durumda yakıt ve hava yanmadan önce (en azından kısmen) karışmakta ve yanma ortamında tutuşarak yanmaktadır. Bunlar (kısmen) ön karışmalı alevlerdir (Topaloglu ve diğ., 2020).

Ön karıştırmalı alevler seyrek uygulanmakla birlikte basit olmaları açısından önemlidir. En fazla görülen ön karıştırmalı yakıcı Bunsen brülörüdür. Bu alette gaz yakıtla hava önceden karıştırılır ve borunun ağzından yakılır. Böyle birkaç yakıcı bir araya getirilerek bir ocak elde edilebilir. Karışma borusuna giren (birincil) hava minimum (stokiyometrik) hava miktarının altındadır. Bu nedenle Şekil 1’de görüldüğü gibi genellikle ön karışmalı yanmanın üzerinde difüzyon alevi oluşur. Alevin çevresindeki hava (eksik) yanma ürünleri içine difüzyonla karışarak yanmayı tamamlar. Mutfaklarda kullanılan gaz yakıtlı ocaklar bu prensiple çalışmaktadır.

Hava ve yakıt karışımının önemli olduğu alanlardan birisi de gaz motorlarıdır ve bu motorlarda gaz karıştırıcı adı verilen ve hava-yakıt gazını karışmasını sağlayan önemli bir eleman vardır. Venturi gaz karıştırıcıları, bir sıvının (havanın) basınç enerjisini boğazdaki hız enerjisine dönüştürerek bir düşük basınç bölgesi oluşturan ve Bernoulli’nin yakınsak-uzaklaşan nozül ilkesinin özel bir örneği olan cihazlardır. Bu düşük basınç bölgesi, yakıtın karışma odasına sürüklenmesine neden olur ve hava ile karışımı sağlar. Üretilen karışımın hava-yakıt oranı belirli bir aralıkta olmalıdır aksi takdirde düşük performans ve yüksek egzoz emisyonları oluşabilir. Hava veya yakıt gazı girişinde ek basınç yoksa, karıştırıcının hava-yakıt oranı yalnızca karıştırıcı tasarımına bağlı olacaktır ve bu nedenle karıştırıcı tasarımı oldukça önemlidir.



Şekil 1. Bir atmosferik gaz yakıt yakıcısının şeması (Topaloglu ve diğ., 2020)

Figure 1. A schematic view of atmospheric burner

Emisyon değerlerini azaltmak ve verimli yanma sağlamak için yanma işlemi sırasında yeterli miktarda birincil hava alınmalıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde hava ile yakıtın karışmasına etki eden geometrik faktörler üzerine yoğunlaşıldığı tespit edilmiştir. Venturi karıştırıcısının hava-yakıt oranı ve basınç kaybı venturi boğaz çapı, venturi boğaz alanı, boğaz konumu, gaz giriş alanı, gaz giriş yeri ve gaz delikleri sayısı gibi çeşitli özelliklerden etkilendiğini belirten çalışmalar mevcuttur (Baylar ve diğ., 2009, 2010, 2007; Danardono ve diğ., 2011). Danardono ve diğ. (2011) hava ile sentetik gazı karıştırmak amacıyla venturi karıştırıcısı geliştirmişlerdir. Boğaz çapı, gaz odası kalınlığı ve gaz çıkış çapının karıştırıcı özellikleri ve performansı üzerindeki etkisini araştırmak ve analiz etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanmışlardır. Romańczyk ve Elsner (2019), bir venturi gaz karıştırıcısında karıştırma kalitesinin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Karışma sürecini iyileştirmek ve gaz ile hava arasındaki karıştırma süresini arttırmak için venturi borusuna silindirik türbülötör şeklinde elemanlar yerleştirmiş ve türbülötörlerin karışmaya olan etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Türbülötör eklenmesinin karışma sürecini olumlu etkilediğini ancak basınç kayıplarını arttırdığını ifade etmişlerdir. Pritchard ve diğ. (1977) birincil hava sürüklenme seviyesini hesaplamak için basitleştirilmiş bir teorik formülasyon önermiştir. Elde ettikleri sonuçlar, birincil hava sürüklenmesinin yakıt gazı akış hızı, yakıt gazı tipi, enjektör geometrisi, karıştırma borusu geometrisi ve brülör delik geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Singh ve diğ. (1999) sonlu elemanlar modeli kullanarak soğuk test durumu şartlarında birincil hava sürüklenme seviyesini tahmin etmişlerdir. Yakıt yoğunluğu yüksek olduğunda birincil hava sürüklenmesinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Singh ve diğ. (2003) daha sonra soğuk test durumunun birincil hava sürüklenmesini belirlemek için deneysel bir çalışma da gerçekleştirmiştir. Brülör çıkışının enjektör deliği çapına oranı arttığında ölçülen birincil hava sürüklenmesinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ayrıca ölçülen birincil hava sürüklenmesi değerlerinin teorik sonuçlarla iyi uyum sağladığını belirtmişlerdir. Namkhat ve Jugjai (2010) atmosferik brülörün birincil hava sürüklenme özelliklerini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Birincil hava sürüklenmesinin, yakıt debisi, yakıt tipi, enjektör geometrisi, karıştırma borusu geometrisi ve brülör deliği geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Birincil hava sürüklenme seviyesinin, yakıtın artan momentum oranıyla arttığını ifade etmişlerdir. Milivojevic ve diğ. (2020), düşük güçlü atmosferik brülörlerin performansının optimizasyonu süreci ile ilgili teorik ve deneysel çalışma yapmışlardır. Teorik çalışmalarının ana hedefi olarak, düşük güçlü atmosferik gaz brülöründe brülör geometrisi, birincil ve

ikincil hava etkisi ve farklı gaz karışımlarının etkisini incelemek olduğunu ifade etmişlerdir. Teorik olarak elde ettikleri sonuçlar ile deneysel sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir. Jugjai ve diğ. (2001) ve Hou ve diğ. (2007) yakıt olarak LPG kullanan atmosferik brülörlerin ısı performanslarının iyileştirilmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Alevin akış şeklini radyal bir akıştan dönen (swirl) bir akışa değiştirerek termal verimliliğin artırılabilirliğini elde etmişlerdir. Hemidi ve diğ. (2009) süpersonik ejektörlerde hava sürüklenmesini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Tüm çalışma koşulları aralığında, genel sapmanın  $k-\epsilon$  modeli için % 10'un altında olduğunu, ancak  $k-\omega$ -sst modelleri için sonuçların daha az uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Zhu ve diğ. (2009) birincil nozul çıkış konumu ve karıştırma bölümünün yakınsak açısı gibi iki önemli ejektör parametresinin performansa etkisini nümerik olarak araştırmışlardır. Liu ve diğ. (2013) ön karıştırmalı yanma teorisine dayanan düşük  $\text{NO}_x$  brülör ejektörü geliştirmişlerdir. Ejektörün akış ve karıştırma işlemlerine odaklanan yeni tasarlanmış brülörün performansını nümerik ve deneysel olarak kıyaslamışlardır. Şener ve diğ. (2019), ev tipi ocaklarda verim artışını hedeflemişlerdir. Bu kapsamda ocaktan brülör kafasına olan mesafeyi ve brülör çapını değiştirerek hilal şeklinde alev kanallarına sahip bir ev tipi brülörün ısı verimini sayısal olarak hesaplamışlardır. Yakıt olarak metan kullanmışlardır ve üç farklı çap ve mesafe parametrelerinde hesaplamalar yapmışlardır. Sonuç olarak ocak çapı ve mesafe parametresinin artmasıyla yüzey sıcaklığının ve yanmamış CO, NO ve HC emisyon değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir. Önal ve Ağra (2017), birincil hava sürüklenmesini etkileyen parametrelerden enjektör geometrisini incelemişlerdir. Bu bağlamda enjektör ağzının çapını sabit tutmuş enjektör ağzının çıkış açısını değiştirilmişler ve nümerik hesaplamalar yapmışlardır. Sonuç olarak enjektör çıkış açısının artması ile daha çok havanın içeriye sürüklendiğini belirtmişlerdir.

Daha önce belirtildiği gibi literatürde yapılan çalışmalarda hava-yakıt karışması genellikle venturi tipinde irdelenmiştir ve venturi boğaz çapı, venturi boğaz alanı, boğaz konumu, gaz giriş alanı, gaz giriş yeri ve gaz delikleri sayısı gibi parametreler üzerine odaklanılmıştır. Ancak atmosferik brülörlerde enjektör çapının, hızının ve hava giriş delikleri sayısının hava-yakıt karışmasına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Ayrıca bu üç parametrenin (enjektör çapı, hızı ve hava giriş delikleri sayısı) birlikte incelendiği çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, örnek bir atmosferik brülörde enjektör çapının, enjeksiyon hızının ve hava giriş delikleri sayısının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modeli olarak Standard  $k-\epsilon$  modeli kullanılmıştır. Enjektör çapı ve enjeksiyon hızına göre oluşan hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Gaz yakıtlar genelde birçok saf bileşenin karışımından oluşmaktadır. Bu bileşenlerin yanması kolayca temel reaksiyonlarla hesaplanabilir. Yanma işleminin analizinde Hava-Yakıt karışım oranı ( $H/Y$ ) ile tanımlanan bir parametre sıklıkla kullanılır ve yakıt-hava miktarlarını sayısal olarak ifade etme kısmında oldukça önemlidir.

$$H/Y = \frac{\text{Hava Miktarı}}{\text{Yakıt Miktarı}}$$

Bir yakıtın tam yanması için gereken hava miktarına stokiyometrik (minimum) hava ihtiyacı ( $H_{\min}$ ) adı verilir. Gaz yakıtların bileşimi hacimsel olarak verilir. Bu durumda, stokiyometrik hava/yakıt oranını da hacimsel olarak belirlemek daha pratik olacaktır. Uygulamada yanmanın tam olmasını sağlamak için gerekenden biraz fazla hava ( $H_{\text{gerçek}}$ ) verilir:

$$H_{\text{gerçek}} = \lambda * H_{\min}$$

Bu eşitlikle tanımlanan  $\lambda$  hava fazlalık katsayısıdır. Genel olarak tam yanma için  $\lambda > 1$  seçilir. Ancak atmosferik brülörlerin karışma borusunda  $\lambda < 1$  olur.



Herhangi bir yakma sisteminde hava fazlalık miktarı arttıkça (bu artış çok aşırı olmadığı takdirde) karbonmonoksit ve yanmamış hidrokarbonların baca gazındaki oranı azalmaktadır. Ancak yanma veriminin hava fazlalığındaki artış ile belirli bir noktaya kadar arttığı ve daha sonra düştüğü bilinmektedir. Sisteme beslenen aşırı hava yanma sıcaklığını düşürerek yanmanın tamamlanmamasına neden olabilir. Bu nedenle yakıt ve yakma sisteminin bir fonksiyonu olarak optimum bir yanma havası miktarının belirlenmesi faydalı olacaktır. Böylece hem hava kirliliği önlenmiş olur hem de verimli bir yanma sağlanır. Mutfak ocağı, bunsen brülörü gibi yakıcılarda ise yanma işlemi kısmen ön karışmalı olarak gerçekleşir. Daha önce belirtildiği gibi bu tip yakıcılarda karışım borusu içerisinde  $\lambda < 1$  seçilir ve genellikle metan için bu değer yaklaşık olarak 0.5 civarındadır. Daha sonra çevreden emilen ikincil taze hava ile birlikte  $\lambda$  değeri artar ve yanma işlemi tamamlanır.

Bilgisayar alanında yaşanan gelişmeler ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümünde nümerik yöntemler oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Temel olarak akış problemlerinin çözümünde, analitik, deneysel ve nümerik yöntemler uygulanabilir. Belirtilen yöntemler ayrı ayrı kullanılabilirdiği gibi, birlikte de kullanılabilirler. Bu çalışmada nümerik yöntemleri kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı olan Fluent paket programı kullanılmıştır (Ansys Fluent, 2017) ve programda kullanılan modellerin detayları hakkında bilgiler verilmiştir.

En genel halde genel korunum denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) = S_{\Phi} \quad (1)$$

Bu denklemde  $\Phi$  bağımlı değişkeni,  $\Gamma_{\Phi}$   $\Phi$  değişkeninin taşınım katsayısını ve  $S_{\Phi}$   $\Phi$  değişkeninin kaynak terimini ifade etmektedir.  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  and  $S_{\Phi}$  ifadelerinin anlamı Tablo 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.**  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  ve  $S_{\Phi}$  ifadelerinin açıklama gösterimi

*Table 1.* Peprsentation of the expressions of  $\Phi$ ,  $\Gamma_{\Phi}$  ve  $S_{\Phi}$

Eşitlik	$\Phi$	$\Gamma_{\Phi}$	$S_{\Phi}$
Süreklilik	1	0	0
Momentum	$v$	$\mu_e$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_j} \left( \mu_e \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i$
Türbülans kinetik enerji	$k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \epsilon$
Yutulma	$\epsilon$	$\frac{\mu_e}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon)$
Türlerin kütle korunumu	$Y_k$	$\frac{\mu_e}{\sigma_h}$	

Türbülanslı akışı simüle etmek için birçok türbülans modeli mevcuttur ve Standard k- $\epsilon$  modeli bunlardan birisidir. Standard k- $\epsilon$  model ısı transferi ve akışkan akış analizi için yaygın olarak tercih edilen bir modeldir (Choi ve diğ., 2011; Danardono ve diğ., 2011) ve bu nedenle bu çalışmada da Standard k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Standard k- $\epsilon$  model, türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve yutulma ( $\epsilon$ ) için taşınım eşitliklerini modellemeye dayanan yarı ampirik iki eşitlikli bir modeldir. Bu modelde türbülans viskozitesinin, türbülans hızı ve uzunluk ölçeği ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu hız ve uzunluk ölçekleri  $k$  ve  $\epsilon$ 'dan elde edilir (Özdoğan ve diğ., 2016). Türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve yutulma ( $\epsilon$ ) aşağıdaki eşitliklerden elde edilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_{\epsilon} \quad (3)$$

Bu denklemlerde  $G_k$  ortalama hız gradyentinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi,  $G_b$  kaldırma kuvvetleri etkisinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi,  $Y_M$  toplam yutulma oranına sıkıştırılabilir türbülanstaki çalkantı ayrılmasından dolayı oluşan katkı,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ve  $C_{3\varepsilon}$  sabitlerdir.  $\sigma_k$  ve  $\sigma_\varepsilon$ ,  $k$  ve  $\varepsilon$  için türbülans Prandtl sayıları,  $S_k$  ve  $S_\varepsilon$  kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir. Standard k- $\varepsilon$  modelde kullanılan sabitlerin değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

**Çizelge 2.** Standard k- $\varepsilon$  modelde kullanılan sabitler ve değerleri

*Table 2. The values of the constants used in the Standard k- $\varepsilon$  model*

Sabit	Değer
$C_{1\varepsilon}$	1.44
$C_{2\varepsilon}$	1.92
$C_\mu$	0.09
$\sigma_k$	1.0
$\sigma_\varepsilon$	1.3

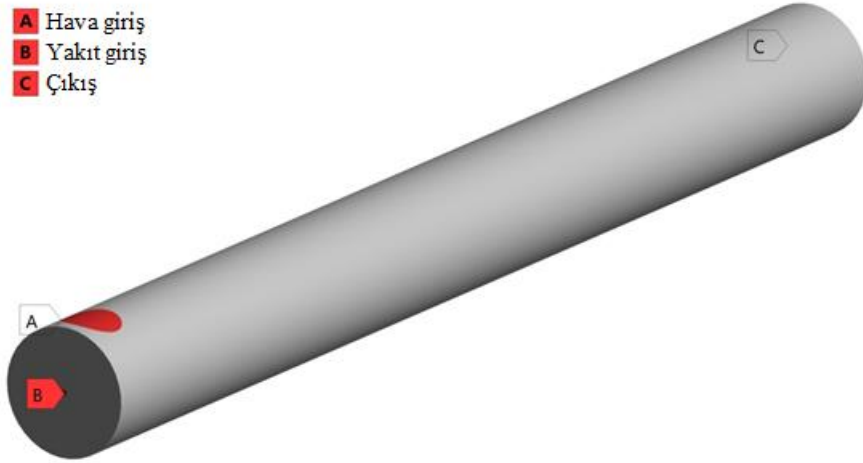
Basınç-hız çiftinin çözümünde SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Çözümlerde basınç denklemlerinin dışındaki denklemlerin ayrıklaştırılması için birinci dereceden Upwind Şema kullanılmıştır. Çözümlemelerin tümünde süreklilik ve diğer yakınsama kriterleri,  $10^{-6}$  mertebesine yakınsayana kadar iterasyonlar sürdürülmüştür.

Hesaplamalar sonucu elde edilen hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### **Enjektör Çapı ve Enjeksiyon Hızı (Injector Diameter and Injection Velocity)**

Çalışmanın bu kısmında uygulamada kullanılan iki hava giriş delikli Bunsen brülörü için enjektör çapının ve enjeksiyon hızının hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda enjektör çapları 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm olmak üzere üç ayrı çap değerinde seçilmiştir. Ayrıca her çap değeri için 50 m/s, 70 m/s ve 90 m/s olmak üzere üç ayrı hız değeri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Her durum için karışma borusunun uzunluğu 100 mm, çapı ise 10 mm alınmış olup, hava giriş deliklerinin çapı bu durum için 4.46 mm olarak belirlenmiştir.

Yapılan hesaplamalarda çıkış bölgesi basınç çıkışı (pressure outlet), yakıt girişi hız girişi (velocity inlet), hava girişi ise basınç girişi (pressure inlet) olarak alınmıştır. Şekil 2’de brülör geometrisinin izometrik görünümü ve sınır adlandırmaları verilmiştir. Yakıt olarak metan girilmiştir. Duvarlarda yapışma şartı (hız sıfır) kabul edilmiştir.



Şekil 2. Brülör geometrisinin izometrik görünümü ve sınır şartları

Figure 2. Isometric view of the burner geometry and boundary conditions

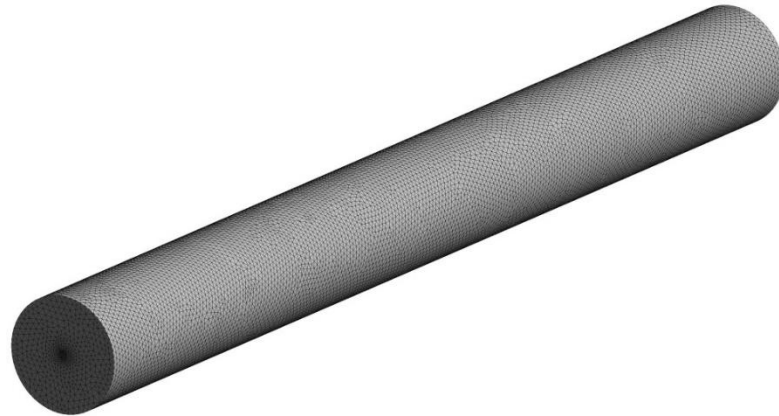
Hesaplamaların yapılabilmesi için geometrinin bir ağ ile örülmesi gerekmektedir. Fiziksel büyüklüklerin hızla değiştiği bölgeler (enjektör çevresi) daha sık ağ yapısı ile donatılmıştır. Ayrıca çözümün ağ yapısından bağımsızlığını test etmek amacıyla daha sık ve daha kaba olmak üzere toplamda altı farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağdan bağımsızlaştırma çalışmasında hava fazlalık katsayısının değişimi göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3'te gösterilmiştir. Çözümün ağdan bağımsızlık kıyaslaması yapıldığında Ağ-5 adlı ağ yapısının uygun olduğu belirlenmiş ve tüm hesaplamalarda bu ağ yapısı tercih edilmiştir.

Çizelge 3. Ağ yapılarının karşılaştırılması

Table 3. Comparison of mesh structures

Ağ yapısı	Eleman sayısı	Nokta sayısı	Hava fazlalık katsayısı( $\lambda$ )
Ağ-1	17999	4036	0.436
Ağ-2	18501	4130	0.543
Ağ-3	19506	4318	0.583
Ağ-4	27251	5766	0.646
<b>Ağ-5</b>	<b>265798</b>	<b>52618</b>	<b>0.650</b>
Ağ-6	885030	170138	0.653

Ağ-5 ile örülmüş brülör geometrisinin izometrik görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ağ yapısı izometrik görünümü

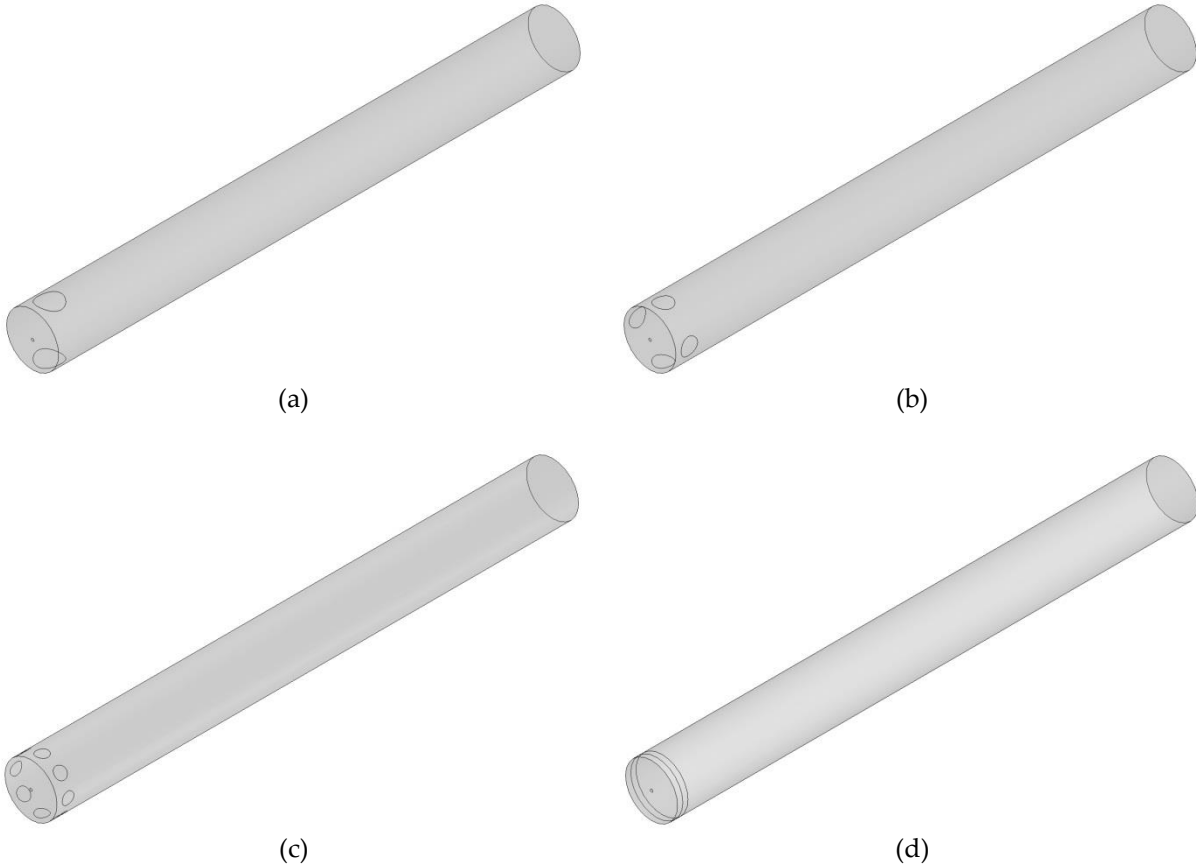
Figure 3. Isometric view of the mesh structure

#### Hava Giriş Delikleri Sayısı (Number of Air Inlet Holes)

Bu kısımda iki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımların brülördeki hava/yakıt karışmasına etkisi incelenmiştir. Brülöre giren yakıt hızı 50 m/s ve giriş çapı 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Yakıt olarak metan seçilmiştir. Sonsuz hava giriş delikli durumda hava girişi halka şeklinde modellenmiş olup halkanın genişliği 1 mm olarak alınmıştır. Hava giriş alanları tüm geometriler için aynı tutulmuştur. Böylece 2 girişli durumda hava giriş delik çapı 4.46 mm, 4 girişli durumda 3.16 mm, 8 girişli durumda 2.24 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4'te farklı hava giriş delik sayılarına sahip brülör geometrilerinin izometrik görünümü verilmiştir.

Oluşturulan geometrilerin nümerik hesaplamalarının yapılabilmesi için bir ağ ile örülmeleri gerekliliği daha önce belirtilmişti. Enjektör çevresi gibi fiziksel büyüklüklerin hızla değiştiği bölgeler daha sık ağ yapısı ile donatılmıştır ve Şekil 3'teki ağ yapısına benzer bir ağ yapısı oluşturulduğundan ayrıca verilmemiştir.

Yapılan hesaplamalarda çıkış bölgesi basınç çıkışı (pressure outlet), yakıt girişi hız girişi (velocity inlet), hava girişi ise basınç girişi (pressure inlet) olarak alınmıştır. Duvarlarda yapışma şartı (hız sıfır) kabul edilmiştir.



**Şekil 4.** Brülör geometrilerinin izometrik görünümü, (a) İki hava girişli, (b) Dört hava girişli, (c) Sekiz hava girişli, (d) Sonsuz hava giriş delikli

*Figure 4.* Isometric views of burner geometries, (a) Two air inlets, (b) Four air inlets, (c) Eight air inlets, (d) Infinite air inlets

## BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

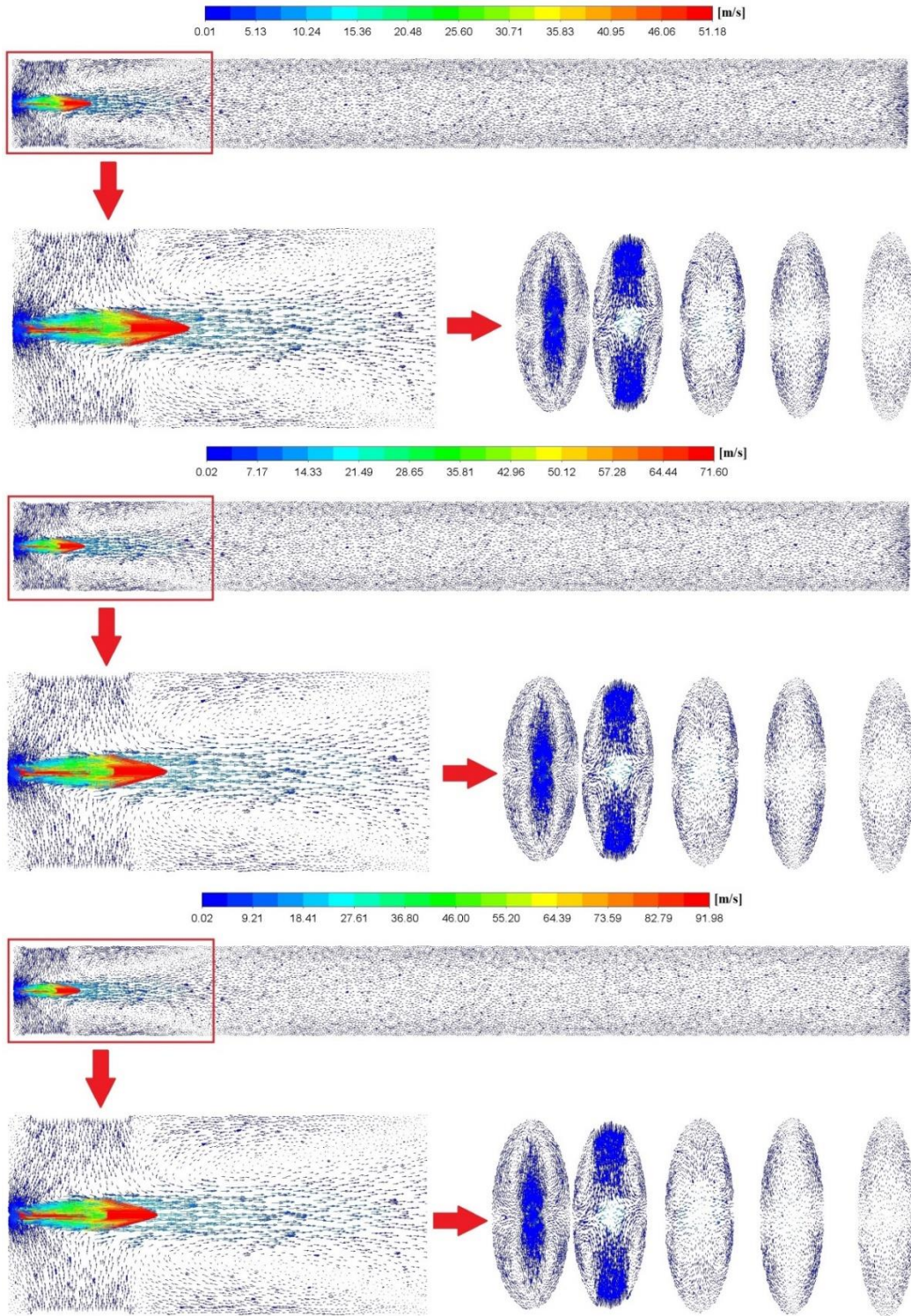
### Enjektör Çapı ve Enjeksiyon Hızının Etkisi (Effect of the Injector Diameter and Injection Velocity)

Bu bölümde enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri, akım çizgileri ve  $CH_4$  mol konsantrasyonları dağılımları gösterilmiştir. Hesaplanan diğer enjektör çap değerlerinde (0.75 ve 1 mm) anılan parametreler için benzer görüntüler elde edildiğinden bunlar ayrıca verilmemiştir.

Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yakıt giriş hızlarının artmasıyla birlikte yakıt tarafından sürüklenen hava hızlarının da arttığı görülmektedir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız vektörleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akışa dik yönde, hız vektörleri akım yönünde zayıflamaktadır.

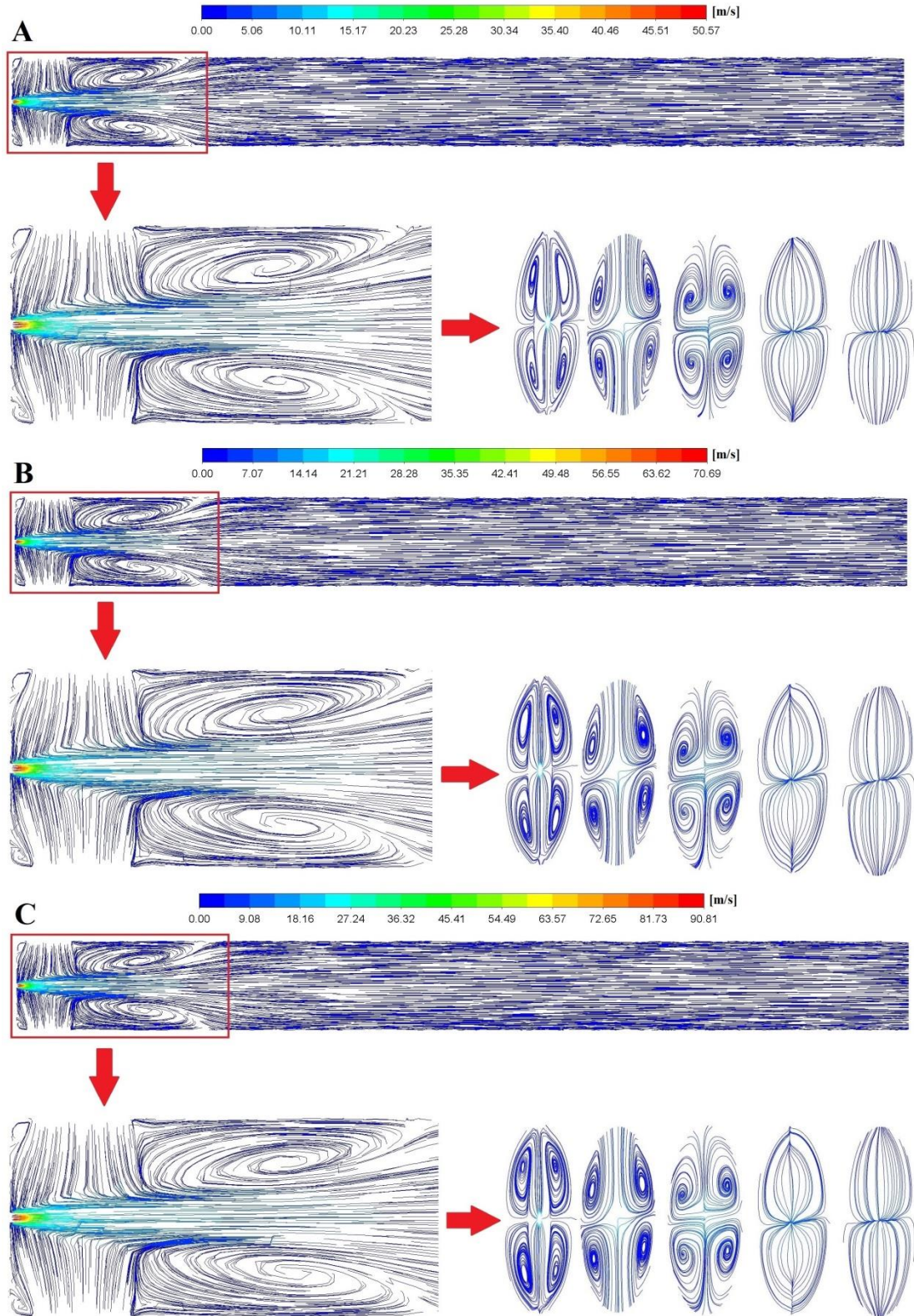
Şekil 6'da enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen akım çizgilerinin konturları verilmiştir. Hava girişi ile yakıt-hava karışımının boru duvarına ulaştığı kesit arasında girdapların oluştuğu görülmektedir. Yakıt giriş hızlarının artmasıyla birlikte girdap dönüş hızları da artmakta, ancak girdap boyutları fazla değişmemektedir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki akım çizgileri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akışa dik yönde, ikincil akımlara bağlı olarak iki çift girdap oluşmakta, bunlar daha sonra akım yönünde zayıflamakta ve kaybolmaktadır.

Şekil 7'de enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen  $CH_4$  mol konsantrasyonlarının konturları verilmiştir. Şekilde ayrıca sağ altta akış yönünde enjeksiyon noktalarından itibaren sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki konsantrasyon konturları da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi akış yönünde ve akışa dik yönde oluşan girdaplı akımlar sonucu yakıt ve hava hızla karışmakta ve homojen bir karışım ortaya çıkmaktadır. Artan yakıt hızıyla birlikte havanın sürüklenme hızının da artmasının etkisiyle birlikte artan türbülans nedeniyle karışma hızının da arttığı, böylece karışma mesafesinin toplamda fazla değişmediği söylenebilir.



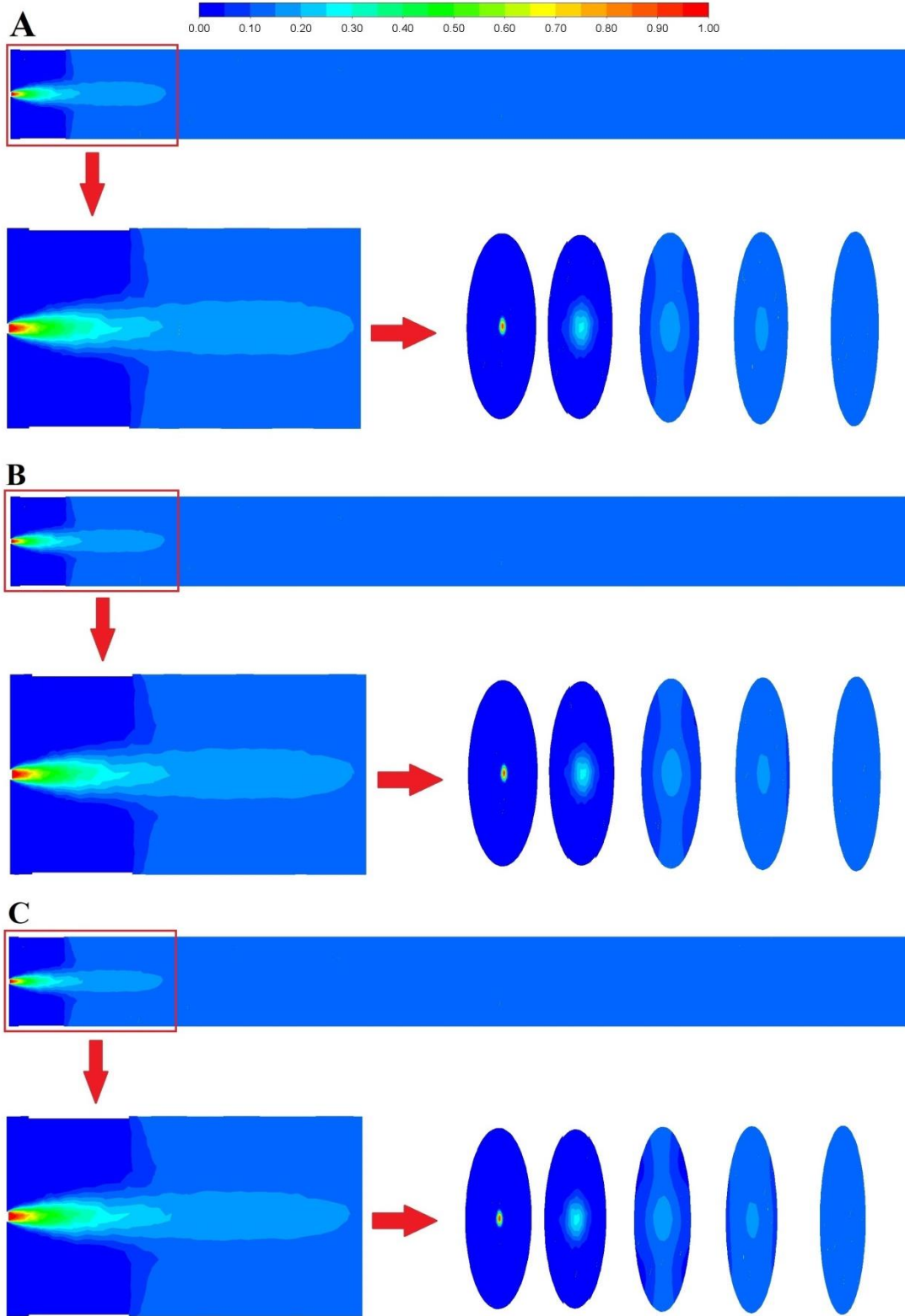
**Şekil 5.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız vektörleri: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız vektörleri

*Figure 5.* In the case of 0.5 mm injector diameter, the velocity vectors obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, velocity vectors in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right



**Şekil 6.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen hız akım çizgileri: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki hız akım çizgileri

**Figure 6.** In the case of 0.5 mm injector diameter, the velocity streamlines obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, velocity streamlines in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right

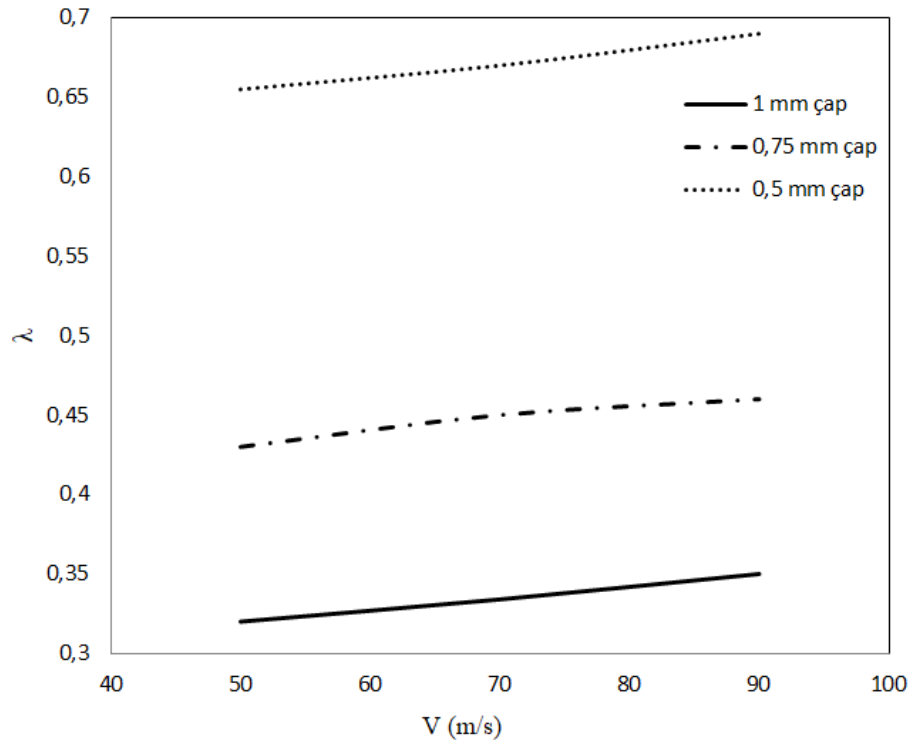


**Şekil 7.** Enjektör çapının 0.5 mm olması durumunda farklı yakıt giriş hızlarına bağlı olarak elde edilen CH<sub>4</sub> mol konsantrasyonları: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki mol konsantrasyonları

*Figure 7.* In the case of 0.5 mm injector diameter, the mole concentrations of CH<sub>4</sub> obtained depending on different fuel inlet velocities: A:50 m/s, B:70 m/s, C:90 m/s. For all three cases, mole concentrations in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right



Farklı enjektör çapı ve farklı yakıt giriş hızları sonucunda elde edilen  $\lambda$  değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm durumlarda artan yakıt hızı ile birlikte  $\lambda$  değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak yakıt hızının artışıyla gerçekleşen  $\lambda$  değerlerinin artışı fazla değildir. Enjektör hızının 50 m/s’den 90 m/s’ye artması durumunda  $\lambda$  değeri, enjektör çapı 0.5 mm durumunda %5.5, 0.75 mm durumunda %7.2, 1 mm durumunda ise %9.6 oranında artmıştır. Diğer taraftan enjektör çapının büyümesi ile  $\lambda$  değerleri azalmıştır. Aslında bu durumda emilen hava miktarı mutlak olarak artmaktadır. Buna göre emilen hava debisi birim yakıt debisine oranla azalmıştır. Ayrıca Şekil 8’de görüldüğü gibi  $\lambda$  değerleri 0.32-0.68 arasında elde edilmiştir. Böylece daha önce belirtildiği gibi uygulamada kullanılan Bunsen brülörü karışma borusu içerisinde metan için hedeflenen  $\lambda \approx 0.5$  civarında değerlere ulaşılmaktadır.

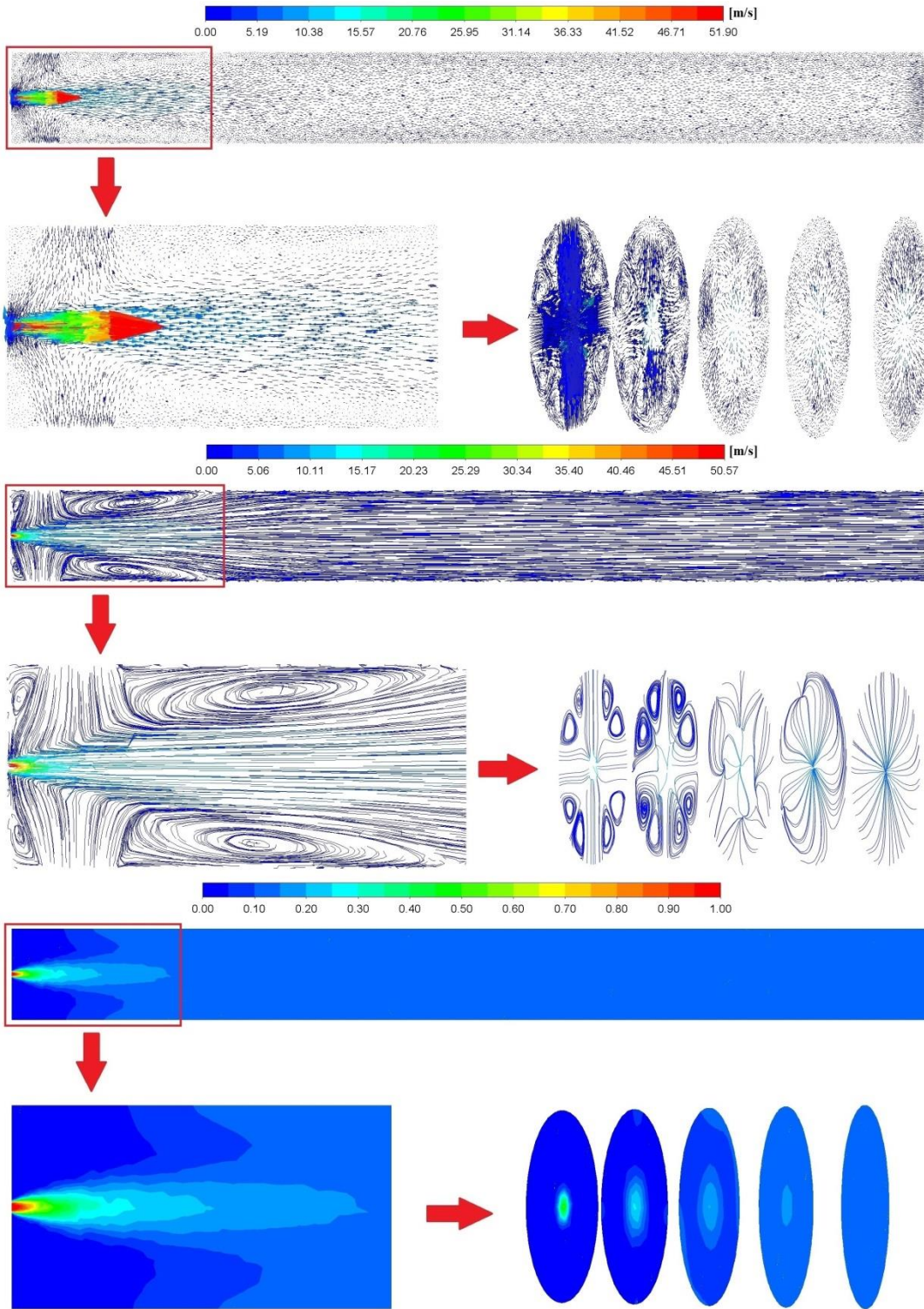


Şekil 8.  $\lambda$  – Yakıt giriş hızı grafiği  
Figure 8. The graph of  $\lambda$  – fuel inlet velocity

#### Hava Giriş Delik Sayısının Etkisi (Effect of the Number of Air Inlet Holes)

İki, dört, sekiz ve sonsuz hava giriş delikli tasarımlar için hesaplamalar karşılaştırıldığında asıl akış yönünde benzer görüntüler oluştuğu görülmüştür. Ancak akışa dik yöndeki ikincil akımlar nedeniyle oluşan girdapların sayısı ve boyutları değişmektedir. İki hava giriş delikli durumda iki çift girdap oluşurken (Şekil 6), dört delikli durumda dört çift (Şekil 9), sekiz delikli durumda sekiz çift girdap ortaya çıkmaktadır.

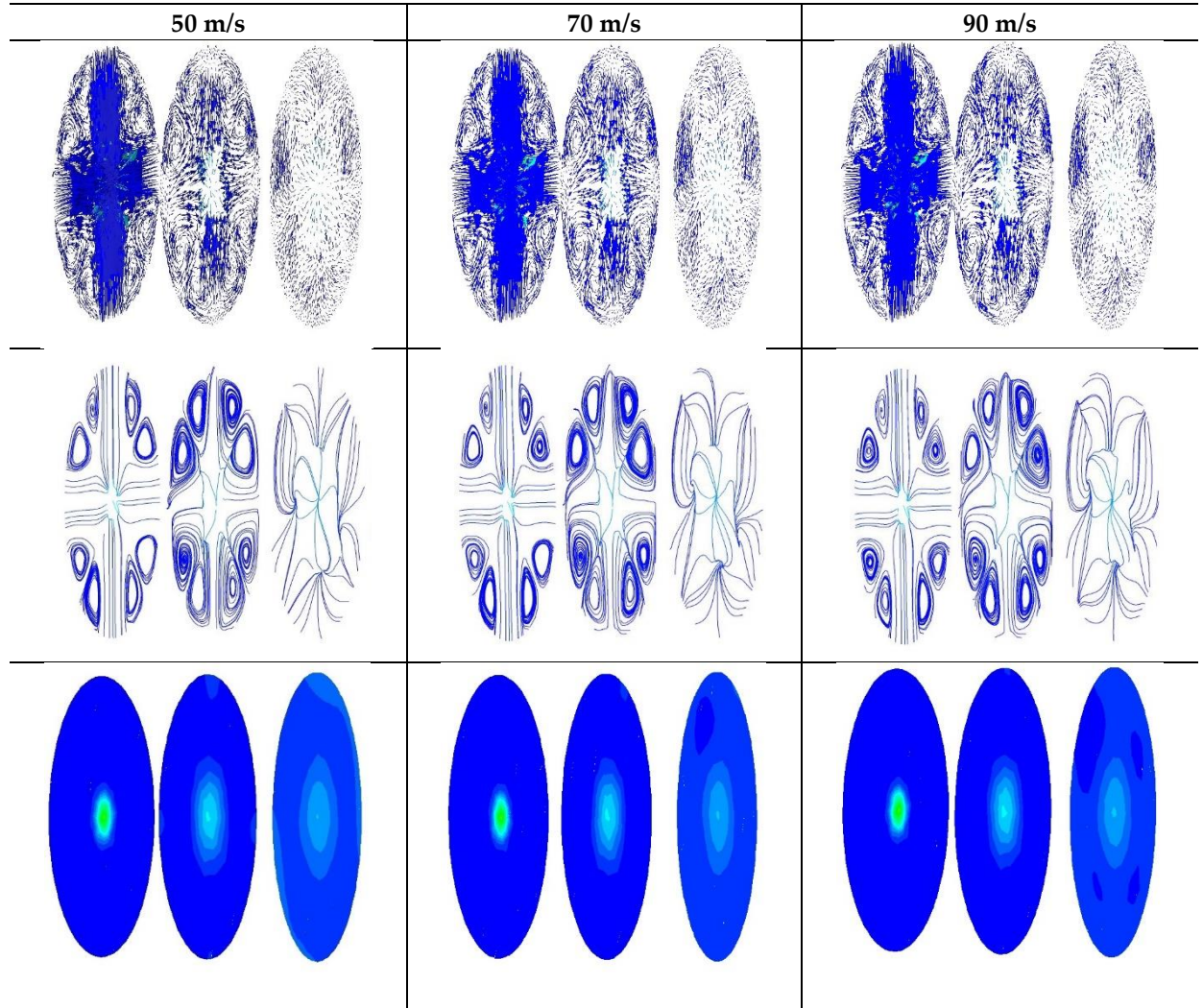
Şekil 9’da enjektör çapının 0.5 mm, enjeksiyon hızının 50 m/s ve hava giriş delik sayısının dört olması durumunda elde edilen hız vektörleri, hız akım çizgileri ve  $CH_4$  mol konsantrasyonları dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 9. Enjektör çapının 0.5 mm, enjeksiyon hızının 50 m/s ve hava giriş delik sayısının dört olması durumunda elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve  $\text{CH}_4$  mol konsantrasyonları (altta). Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki değişim

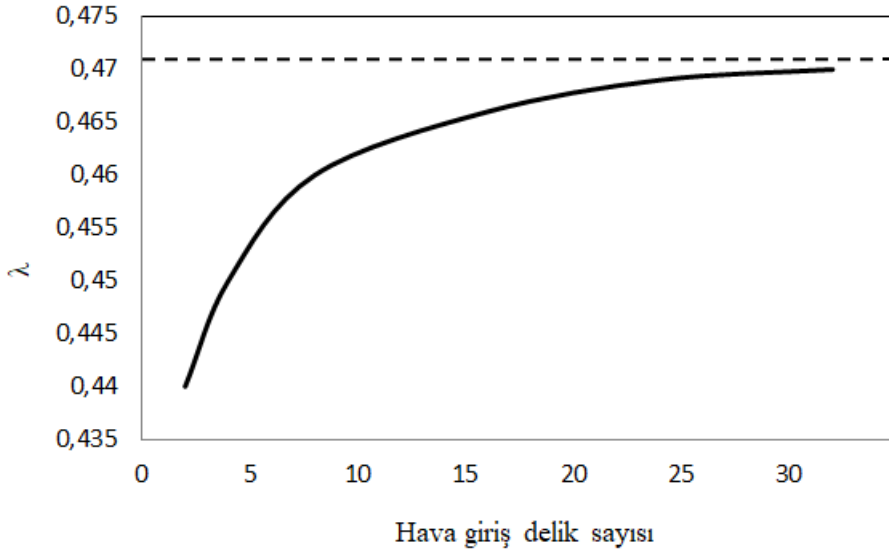
Figure 9. Velocity vectors (top), velocity streamlines (middle) and  $\text{CH}_4$  mole concentrations (bottom) obtained when the injector diameter is 0.5 mm, the injection rate is 50 m/s, and the number of air inlet holes is four. For all three cases, change in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10, 15, 20$  mm distances, respectively, at the bottom right

Şekil 10'da 0,5 mm enjektör çapında ve farklı enjeksiyon hız değerlerinde elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve CH<sub>4</sub> mol konsantrasyonları (altta) bir arada gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm hız değerlerinde benzer görüntüler elde edilmiştir ve bu nedenle hesaplanan diğer enjektör çap ve enjeksiyon hız değerlerinde anılan parametreler ayrıca verilmemiştir. Bu anlamda sekiz delikli durum için de benzer görüntüler elde edildiğinden hız ve konsantrasyon dağılımları ayrıca verilmemiş olup, hava giriş delik sayılarının yakıt-hava ön karışmasına etkisi Şekil 11'de verilen 0.75 mm enjektör çapında  $\lambda$ -delik sayısı grafiği üzerinden değerlendirilmiştir.



**Şekil 10.** Enjektör çapının 0.5 mm, hava giriş delik sayısının dört olması durumunda farklı enjeksiyon hızlarında elde edilen hız vektörleri (üstte), hız akım çizgileri (ortada) ve CH<sub>4</sub> mol konsantrasyonları (altta). Her üç durum için, sağ altta sırasıyla  $x=0.5, 5, 10$  mm mesafelerinde akışa dik kesitlerdeki değişim  
*Figure 10.* Velocity vectors (top), velocity streamlines (middle) and CH<sub>4</sub> mole concentrations (bottom) at different injection rates obtained when the injector diameter is 0.5 mm, and the number of air inlet holes is four. For all three cases, change in cross-sections perpendicular to the flow at  $x=0.5, 5, 10$  mm distances, respectively, at the bottom right

Şekil 11 incelendiğinde hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak  $\lambda$  değerinin arttığı görülmüştür. Ancak bu artışın önemli seviyelerde olmadığı görülmektedir. İki delikli durum referans alındığında  $\lambda$  artışı dört delikli durumda %2.1, sekiz delikli durumda %4.4, sonsuz delik durumunda ise yaklaşık %7 seviyelerindedir.



Şekil 11.  $\lambda$  –Hava giriş delik sayısı grafiği

Figure 11. The graph of  $\lambda$  – air inlet hole number

## SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, örnek bir atmosferik brülörde farklı enjektör çaplarının (0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm), enjeksiyon hızlarının (50 m/s, 70 m/s ve 90 m/s) ve hava giriş delikleri sayısının (iki, dört, sekiz ve sonsuz delikli) hava-yakıt karışmasına etkisi nümerik olarak incelenmiştir. Hesaplamalar üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Türbülansın modellenmesinde Standard k- $\epsilon$  modeli kullanılmıştır. Enjektör çapı ve enjeksiyon hızına göre oluşan hız vektörleri, akım çizgileri, hava-yakıt karışım oranları incelenerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde:

- Enjeksiyon hızının artması sürüklenen hava hızını arttırıcı yönde etki göstermiştir.
- Artan enjeksiyon hızıyla birlikte oluşan girdapların da boyutlarının büyüdüğü görülmüştür.
- Yakıt hızının artmasıyla birlikte sürüklenen hava miktarı artmıştır. Ancak  $\lambda$  değerleri ve buna bağlı olarak sürüklenen hava miktarı yakıt oranla fazla artmamıştır. Örneğin, 50 m/s ve 90 m/s enjektör hızı arasında  $\lambda$ , enjektör çapı 0.5 mm için %5.5, 0.75 mm için %7.2, 1 mm için %9.6 oranında artış göstermiştir.
- Enjeksiyon çapının artmasıyla birlikte sürüklenen hava miktarı artmıştır, ancak  $\lambda$  değerleri küçüldüğünden sürüklenen hava miktarı yakıt oranla azalmıştır.
- Hava giriş delik sayısının artmasıyla birlikte havanın içeri daha fazla nüfuz ettiği ve buna bağlı olarak  $\lambda$  değerinin arttığı görülmüştür. Bu artış iki delikli duruma göre dört delikli durumda %2.1, sekiz delikli durumda %4.4, sonsuz delikli durumda ise yaklaşık %7 seviyelerindedir.

İlerdeki çalışmalarda hava giriş deliklerinin pozisyonu ve boyutları, karışımdan sonra oluşacak yanmanın modellenmesi gibi konuların incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

## SEMBOLLER (SYMBOLS)

$C_1$ : Türbülans model sabiti

$C_2$ : Türbülans model sabiti

$G_b$ : Kaldırma kuvveti nedeniyle türbülans kinetik enerji oluşumu

$G_k$ : Ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerji oluşumu

H: Hava

H/Y: Hacimsel hava /yakıt oranı

$H_{gerçek}$ : Gerçek hava ihtiyacı

$H_{min}$ : Stokiyometrik (minimum) hava ihtiyacı

$k$ : Türbülans kinetik enerjisi

$S_{\phi}$ : Bağımlı değişkenin kaynak terimi

$v$ : Hız

$x$ : Asıl akış yönündeki koordinat

$Y$ : Yakıt

$\Gamma_{\phi}$ : Bağımlı değişkenin taşınım katsayısı

$\epsilon$ : Yutulma

$\lambda$ : Hava fazlalık katsayısı

$\mu_e$ : Efektif viskozite

$\rho$ : Yoğunluk

$\sigma_k$ : Türbülans kinetik enerji için türbülanslı Prandtl sayısı

$\sigma_{\epsilon}$ : Türbülans kinetik enerjinin dağılma oranı için türbülanslı Prandtl sayısı

$\Phi$ : Bağımlı değişken

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baylar, A., Aydın, M. C., Unsal, M., Ozkan, F. 2009. "Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2". *Mathematical and Computational Applications* .
- Baylar, A., Ozkan, F., Unsal, M. 2010. "Effect of air inlet hole diameter of venturi tube on air injection rate". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(4), 489–492.
- Baylar, A., Unsal, M., Ozkan, F. 2007. "Determination of the Optimal Location of the Air Hole in Venturi Aerators". *CLEAN – Soil, Air, Water*, 35(3), 246–249.
- Choi, J. T., Kwon, O. K., Cha, D. A. 2011. "A numerical study of the heat transfer and fluid flow of micro-channeled water block for computer CPU cooling". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(10), 2657.
- Danardono, D., Kim, K.-S., Lee, S.-Y., Lee, J.-H. 2011. "Optimization the design of venturi gas mixer for syngas engine using three-dimensional CFD modeling". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(9), 2285.
- Fluent User's Guide, Fluent 18 version, 2017, Fluent Incorporated.
- Hemidi, A., Henry, F., Leclaire, S., Seynhaeve, J.-M., Bartosiewicz, Y. 2009. "CFD analysis of a supersonic air ejector. Part I: Experimental validation of single-phase and two-phase operation". *Applied Thermal Engineering*, 29(8), 1523–1531.
- Hou, S.-S., Lee, C.-Y., Lin, T.-H. 2007. "Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame". *Energy Conversion and Management*, 48(5), 1401–1410.
- Jugjai, S., Tia, S., Trewetaskorn, W. 2001. "Thermal efficiency improvement of an LPG gas cooker by a swirling central flame". *International Journal of Energy Research*, 25(8), 657–674.
- Liu, F.-G., You, X.-Y., Wang, Q., Zhang, R. 2013. "On optimal design and experimental validation of household appliance burner of low pollutant emission". *Energy Conversion and Management*, 76, 837–845.
- Milivojevic, A., Adzic, M., Gojak, M., Stamenic, M., Adzic, V. 2020. "Analysis of the performance of a low-power atmospheric burner for gas appliances for households and their impact on the emission and stability of the burner". *Thermal Science*, 25, 302.
- Namkhat, A., Jugjai, S. 2010. "Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner: Model and experiments". *Energy*, 35(4), 1701–1708.
- Önal, M., Ağra, Ö., "The Effect of Injector Geometry on Primary Air Entrainment", *International*

- Conference on Energy and Thermal Engineering, YTU, Istanbul, 1-6, 25-28 April 2017.
- Özdoğan, M., Sungur, B., Namlı, L., Topaloğlu, B., Durmuş, A. 2016. "A Comparative Study of Turbulence Model Effects in Numerical Analyzing Flow around the Buildings Having Various Aspect Ratios / Farklı En-Boy Oranlarına Sahip Binaların Etrafındaki Akışın Sayısal Çözümünde Türbülans Modellerinin Etkisinin Karşılaştırmalı ". Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.
- Pritchard, R., Guy, J. J., Connor, N. 1977. "Handbook of industrial gas utilization: Engineering principles and practice".
- Romańczyk, M., Elsner, W. 2019. "Effect of Cylindrical Turbulators on the Mixing Process in Basic Venturi Gas Mixer Using OpenFOAM". MATEC Web of Conferences, 252, 4004.
- Singh, G., Sharma, L. D., Ahmad, A. H., Singh, S. P. 1999. "Fenvalerate Induced Dermal Toxicity in Buffalo Calves". Journal of Applied Animal Research, 16(2), 205–210.
- Singh, G., Sundararajan, T., Bhaskaran, K. A. 2003. "Mixing and Entrainment Characteristics of Circular and Noncircular Confined Jets". Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 125(5), 835–842.
- Şener, R., Ozdemir, M., Yangaz, M. 2019. "Effect of the Geometrical Parameters in a Domestic Burner with Crescent Flame Channels for an Optimal Temperature Distribution and Thermal Efficiency". Journal of Thermal Engineering, 171–183.
- Topaloğlu, B., Özcan, H., Sungur, B., 2020, Yakma Sistemleri (1.basım), Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, Türkiye.
- Zhu, Y., Cai, W., Wen, C., Li, Y. 2009. "Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors". Applied Thermal Engineering, 29(5), 898–905.



## KALÇA PROTEZİ İÇİN UHMWPE – HAp KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

<sup>1</sup>Gözde Fatma ÇELEBİ EFE , <sup>2</sup>Tuba YENER 

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>gcelebi@subu.edu.tr, <sup>2</sup>tcerezci@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 25.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.10.2021)

**ÖZ:** Uzun süreli kullanım sonucunda kalça protezlerinde meydana gelen aşınma problemlerinin çoğu liner (yuva) kısmında gerçekleşmektedir. Bu çalışmada total kalça protez implantlarının asetabuler liner parçasının (kalça eklemi yuvası) geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla kalça protezi asetabuler liner olarak kullanılan Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilene (UHMWPE) ağırlıkça %1, 2 ve 3 oranında hidroksiapatit (HAp) tozları ilave edilerek UHMWPE-HAp toz karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan toz karışımları 200 °C'de 30 dakika boyunca 1 ton yük altında sıcak preslenerek UHMWPE-HAp kompozitleri üretilmiştir. Kompozit numunelerin morfolojisi SEM ile incelenmiş, elementel analiz için SEM-EDS kullanılmıştır. Faz analizi XRD ile gerçekleştirilmiştir. XRD analiz sonuçlarına göre takviye artışının %2'ye ulaşması ile HAp takviyesinin varlığı belirlenmiştir. Kompozitlerin kırık yüzey incelemelerinde HAp partiküllerinin matris içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Sertlik analizleri Vickers indentasyon tekniği ile gerçekleştirilmiş olup; en yüksek sertlik değeri %2 HAp takviyeli UHMWPE-HAp kompozitinde 5,28HV olarak elde edilmiştir. Tüm katkı oranları, kompozitin sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. DSC analizi ile hem UHMWPE numunesinin hem de UHMWPE kompozitlerinin ergime sıcaklıkları yaklaşık 140 °C olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** UHMWPE – HAp Kompozitleri, Sertlik, DSC, Isıl Analiz, Total Kalça Protezi

### Production and Characterization of UHMWPE - HAp Composites for HIP Prosthesis

**ABSTRACT:** Most of the wear problems occur in hip prostheses because of long-term use in the liner (socket) part. In this study, the aim was to develop the acetabular liner part of total hip replacement implants. For this purpose, UHMWPE-HAp (hydroxyapatite) composites have been developed by reinforcing UHMWPE, which is used as hip prosthesis acetabular liner, by biomimetic HAp powders at a ratio of 1, 2, and 3% by weight. The morphology of the samples was examined by SEM. SEM-EDS was used for elemental analysis. Phase analysis was carried out by XRD technique. According to the experimental results, HAp addition was detected when the reinforcement level was at least 2%. Hardness analyses were performed by Vickers indentation technique, and the highest hardness value of 5.28HV was obtained at 2% HAp reinforcement. All additive levels contributed positively to hardness values. The melting temperatures of both the UHMWPE and the UHMWPE-HAp composites were determined to be approximately 140 °C by DSC analysis.

**Key Words:** UHMWPE - HAp Composites, Hardness, DSC, Thermal Analysis, Total Hip Prosthesis

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Total kalça eklem protezi (TKP) implantlarının, uzun ve devam eden bir inovasyon geçmişi vardır. İmplantın vücuda yerleştirilmesi, günümüzde yerleşik bir cerrahi prosedür olarak kabul edilmektedir. Bu işlemde hasarlı kalça başı, mekanik bir protezle değiştirilir (genellikle metal veya seramik bir femur (uyluk kemiği) başı ile birleştirilmiş plastik bir kaptan oluşur). Bu ortopedik implant, hastaların yaşam kalitesini artırır (Ruggiero ve diğ., 2020; Burn ve diğ., 2020). Her geçen gün total kalça protezine gereksinim duyan hasta sayısı artmakla birlikte, yaş sınırı da geriye doğru gelmektedir. TKP uygulaması artık işlevini yerine getiremeyen kısmın kalıcı olarak değiştirilmesidir (Yadav vd.).

TKP, ağrının giderilmesini ve uzwun rahat bir şekilde kullanılmasını amaçlar. Doğru bir tedavi ve uygun bir protez kullanılmasıyla işlem başarılı bir şekilde yapılabilir. Burada önemli olan nokta başarının artması için uygun bir tasarımın yapılması ve mümkün olduğunca uzun ömürlü bir malzeme seçilmesidir (Burn vd.). Yine ağrı ve acı gibi hastanın, hastanede kalma süresini azaltmaya yönelik talebi karşılamalıdır (Ursavaş ve Yaradılmış, 2020). Günümüze kadar pek çok farklı grupta malzeme denenmiş ve inovasyon tekniği kullanılmıştır (Nadzadi vd.; Toh vd.). Geliştirilen bu protezlerin hepsinin temel çıkış amacı uzun ömürlü olması ve makul fiyatlara temin edilebilmesidir. Uygulamayı yapacak cerrah açısından tasarım çok önemlidir. Operasyon sırasında zorluk çıkarmamalı ve kalıcı bir çözüm olmalıdır.

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), bir polietilen grubudur. Yoğunluğu 0.930–0.935 g/cm<sup>3</sup> arasında değişir ve molekül ağırlığı 2-6 milyon aralığındadır. UHMWPE, termoplastik polietilenin bir alt kümesidir. Yüksek modüllü polietilen (HMPE) olarak da bilinir, genellikle 3,5 ila 7,5 milyon amu arasında bir moleküler kütleyle sahip, son derece uzun zincirlere sahiptir. Uzun zincir, moleküller arası etkileşimleri güçlendirerek yükü daha fazla polimer omurgasına aktarmaya yarar. Uzun zincir yapısından dolayı UHMWPE, en yüksek darbe dayanımına ve sertliğe sahip termoplastikler arasındadır (He ve Benson, 2011).

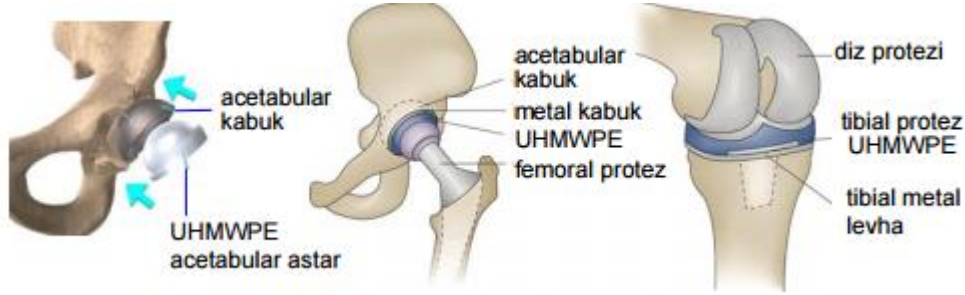
UHMWPE; biyouyumluluk, düşük yoğunluk, düşük sürtünme katsayısı, üstün mekanik özellikler, kimyasal direnç, yüksek aşınma direnci, yüksek darbe dayanımı ve üretim kolaylığı gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle total eklem protezlerinde çok sık kullanılan bir malzemedir (Balani vd.) 2014; (Hussain vd.) 2021; Kilgour ve Elfick, 2009). UHMWPE'nin tribolojik ve mekanik özelliklerini arttırmak amacıyla karbon, karbon nanotüp, metal oksit partikülleri (bin Ali vd.), grafen ve hidroksiapatit (Macuvele vd.) gibi birçok takviye bileşenleri UHMWPE'ye ilave edilmiştir (Salari vd.) 2019; Mirsalehi ve diğ., 2015; Gong ve diğ., 2008).

Bunlar arasında hidroksiapatit (HAp) kalsiyum esaslı, biyouyumluluğu çok yüksek ve yüksek adsorbsiyona sahip bir seramik malzemedir (Dastjerdi ve Montazer, 2010). Diş ve ortopedik implantlar gibi biyomedikal uygulamalar için ilgi çekici malzemelerden biri olan hidroksiapatit (Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>), kemik matrisinin biyouyumlu, biyoaktif, emilebilir ve ana mineral bileşenidir. Hidroksiapatit canlı dokularla düz biyokimyasal bağlar oluşturur ve insan iskelet sisteminde doğal olarak var olan apatit ile benzer kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahiptir (Pylypchuk ve diğ., 2016; Cruz ve diğ., 2016(Çelebi Efe vd.). Hidroksiapatit (HAp), vücut ile uyumlu biyomalzeme üretmek için laboratuvar ortamında biyolojik koşulları taklit eden (biyomimetik) yöntemlerin kullanımı son yıllarda ilgi odağı olmuştur. Böylece biyomimetik koşullarda üretilmiş kalsiyum fosfat biyomalzemelerinin, biyolojik koşulların kısmen de olsa oluşturulduğu ortamda üretildiği için hücreler tarafından kolaylıkla kabul edilebileceği düşünülmektedir. Nano boyutlu hidroksiapatit, mikron boyutundakilere göre çok daha yüksek biyoaktivite (Sadat-Shojai vd.) 2013(Balasundaram vd.) ve geliştirilmiş emilebilirlik (Balasundaram vd.) 2006(Sui vd.) göstermektedir. Nano boyutlu hidroksiapatitte kalsiyum iyonlarının salınımı aynı zamanda doğal hidroksiapatitten ve temelde büyük taneli kristallerden daha hızlıdır (Sadat-Shojai vd.).

Bu çalışmada UHMWPE'nin mekanik özelliklerini geliştirmek amacı ile matris malzemesi UHMWPE'ye ağırlık oranında HAp partikülleri ilave edilerek UHMWPE-HAp kompozitleri üretilmiştir. Takviye oranları kompozit üretimi takviye mukavemet sınırları göz önüne alınarak çok sayıda literatür incelemesi ve deney sonrası belirlenmiştir. Elde edilen kompozit malzemeler mikroyapısal ve mekanik olarak incelenmiştir. Bu iki önemli malzeme grubunun kompozit oluşumuyla, polietilen linere



bağlı olarak protezde meydana gelebilecek problemler ortadan kaldırılarak/ geciktirilerek; tüm yaş ve kilodaki hastalar için daha uzun ömürlü protezlerin elde edilmesi hedeflenmiştir.



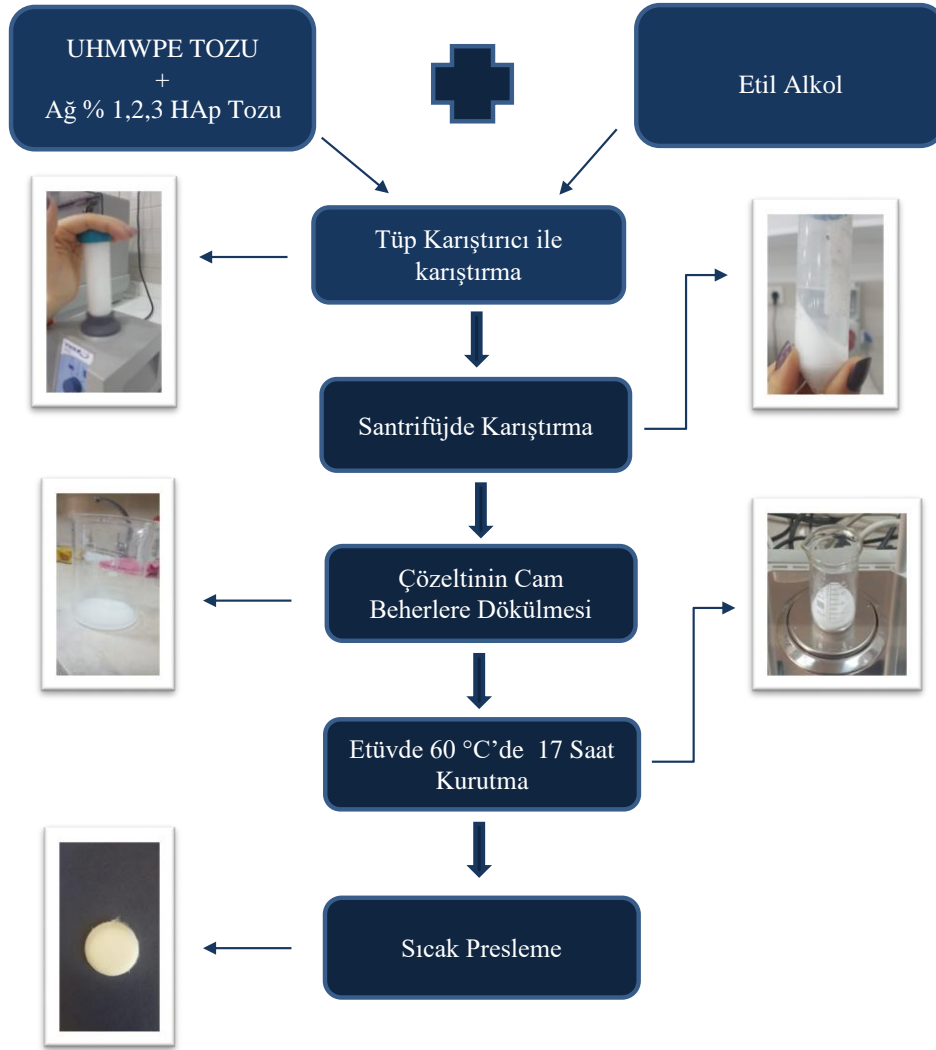
**Şekil 1.** Yapay kalça ve diz UHMWPE bağlantılarının şematik görünümü  
([http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page\\_719.html](http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_719.html))

*Figure 1. Schematic drawing of artificial hip and knee UHMWPE materials*

#### DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada matris malzemesi olarak ortalama UHMWPE tozu, takviye elemanı olarak da yaklaşık 50 nm boyutundaki HAp tozları kullanılmıştır. Ticari olarak Sigma Aldrich firmasından temin edilen UHMWPE tozu ve biyometik yöntemle biyomedikal laboratuvarında üretilmiş olan HAp tozu, sıvı ortamda alkol içerisinde homojen bir şekilde önce tüp karıştırıcıda sonrasında ise santrifüjde farklı sürelerde çevrimli olarak karıştırılmıştır. Ağırlıkça %1, %2 ve %3 HAp içeren UHMWPE-HAp toz karışımları yaklaşık olarak 60 °C’de 17 saat süresince açık atmosferli etüvde kurutulmuştur. Kurutulan tozlar 25 mm çapındaki silindirik bir kalıp içerisinde yaklaşık 200 °C’de, 1 ton yük altında, 30 dakika süre ile sıcak presleme ile pişirilmiştir. UHMWPE-HAp kompozitlerinin üretim prosesini gösteren akım şeması Şekil 2’de verilmiştir.

Çalışmada üretilen numunelerin mikroyapısı ve kimyasal kompozisyonu JEOL JSM-6060 LV model SEM ve EDS tekniği ile analiz edilmiştir. D/MAX-B/2200/PC, Rigaku Co., Japan X-Ray difraktometresinde Cu-K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak faz analizi gerçekleştirilmiştir. UHMWPE-HAp kompozitlerinin sertlikleri Leica WMHT-Mod Vickers indantasyon tekniği ile, ergime sıcaklıkları NETZCH-2014 model termal analiz cihazı ile tespit edilmiştir.



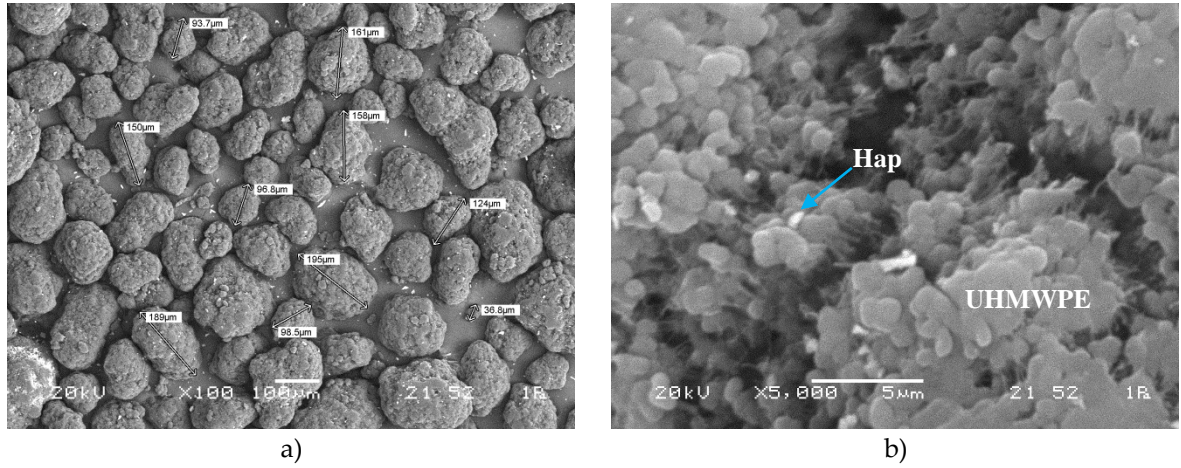
Şekil 2. UHMWPE-HAp kompozitlerinin üretim akım şeması

Figure 2. Flow chart of UHMWPE-HAp composites production

## DENEYSSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

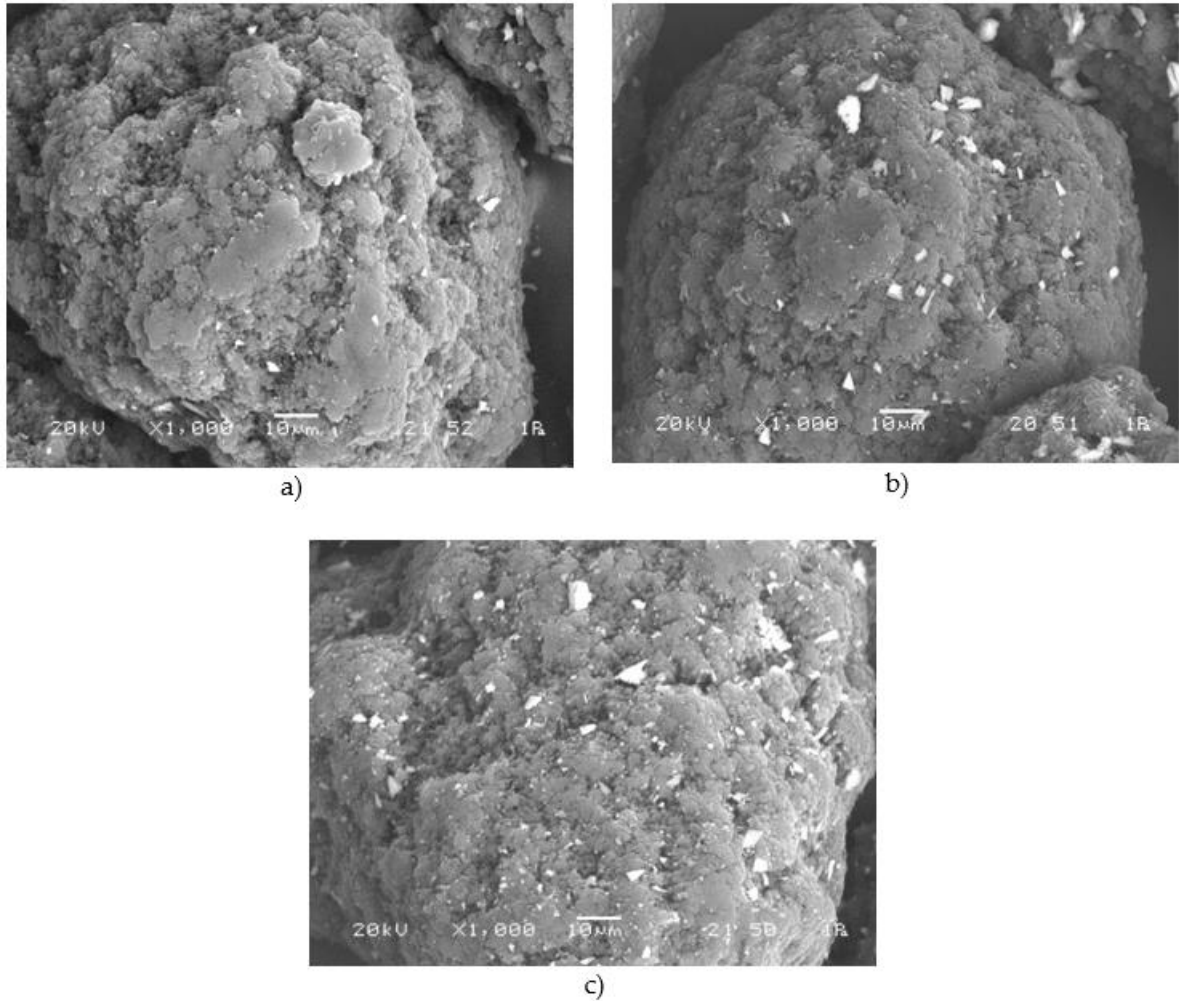
### SEM-EDS İncelemesi (SEM-EDS ANALYSIS)

UHMWPE ve ağırlıkça %1 HAp içeren toz karışımının SEM fotoğrafları Şekil (a-b)'de verilmiştir. Şekil 3a'dan UHMWPE tozlarının küresel şekilli olup; yaklaşık 100µm büyüklüğünde agregatlardan oluştuğu görülmektedir. Bu agregatlar yüksek büyütmede incelendiğinde UHMWPE tanelerinin yaklaşık 0,5-1 µm boyut aralığında olduğu gözlenmiştir. HAp taneleri beyaz renkte, UHMWPE taneleri gri renkte gözükmemektedir. (Şekil 3b).



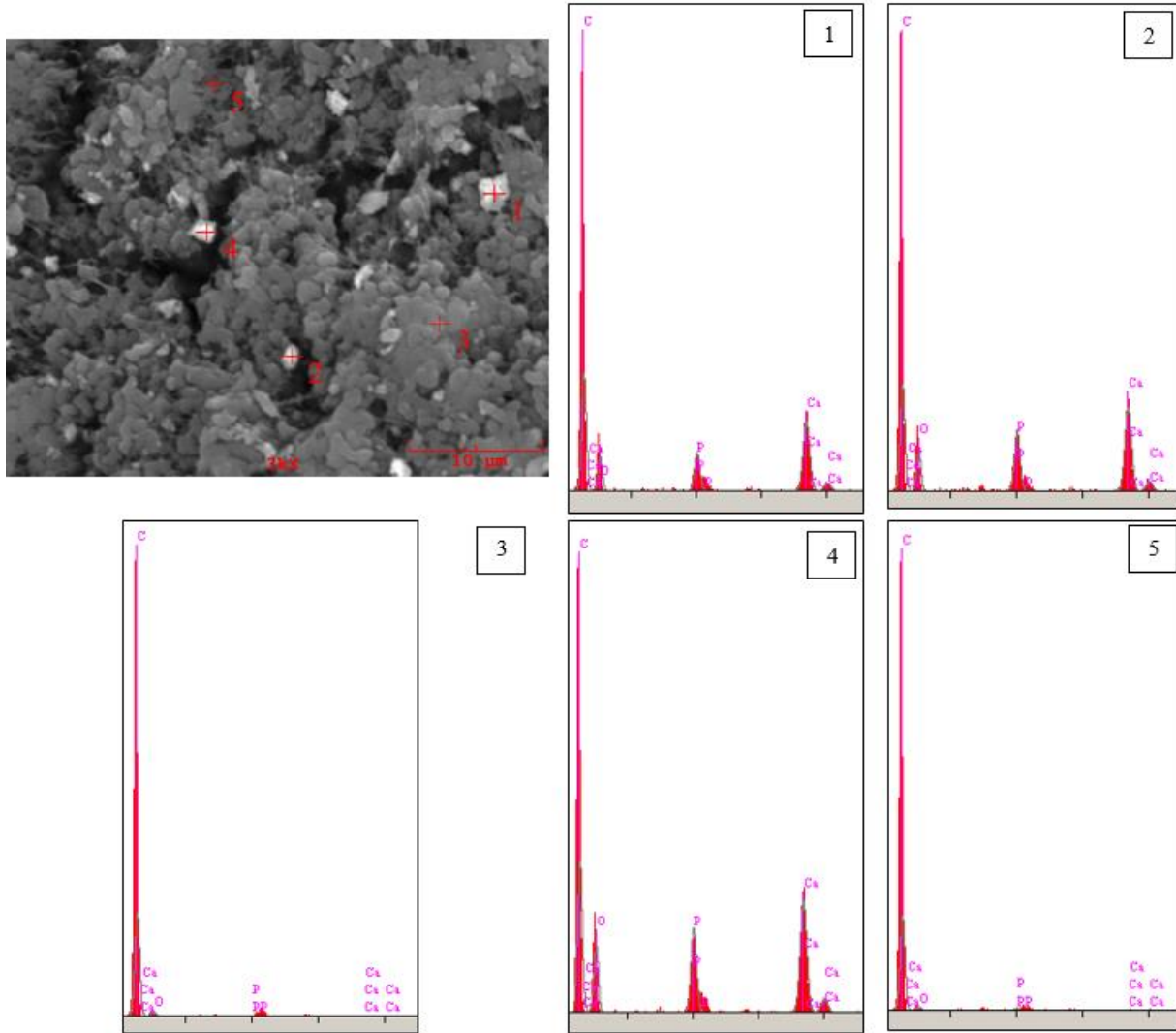
**Şekil 3.** (a,b) UHMWPE-ağ. %1 HAp toz karışımının farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri  
*Figure 3.* SEM images of UHMWPE-1 wt.% HAp powder mixture at different magnification.

Şekil 4'te UHMWPE-ağ. %1, 2 ve 3 HAp kompozitlerinin aynı büyütmedeki SEM mikrografları verilmiştir. SEM mikrograflarından küresel olarak agregelmiş UHMWPE tanelerinin üzerinde bulunan, beyaz renkte gözükten HAp tanelerinin, UHMWPE matris içerisinde homojen olarak dağıldığı ve miktarları arttıkça beyaz renkli kısımların arttığı gözükmektedir.



**Şekil 4.** (a-c) UHMWPE-ağ. %1-2-3 HAp toz karışımının SEM görüntüleri  
*Figure 4.* SEM images of UHMWPE-1-2-3wt.% HAp powder mixtures.

Şekil 5'te UHMWPE-HAp toz karışımlarının SEM-EDS analizinde, beyaz renkte gözükten partiküllerde Ca, P ve O tespit edilmiş olup; HAp'a ait olduğunu ispatlamaktadır. UHMWPE tanelerinin HAp tanelerini kuşatarak; aralarında mekanik bir bağlanma olduğu görülmektedir. HAp miktarındaki artışla beraber artan bağ sayıları ve homojen yapı, kompozitin yüksek mekanik özellik ve yüksek kristalinite özelliklerini sergileyeceğinin bir göstergesidir.



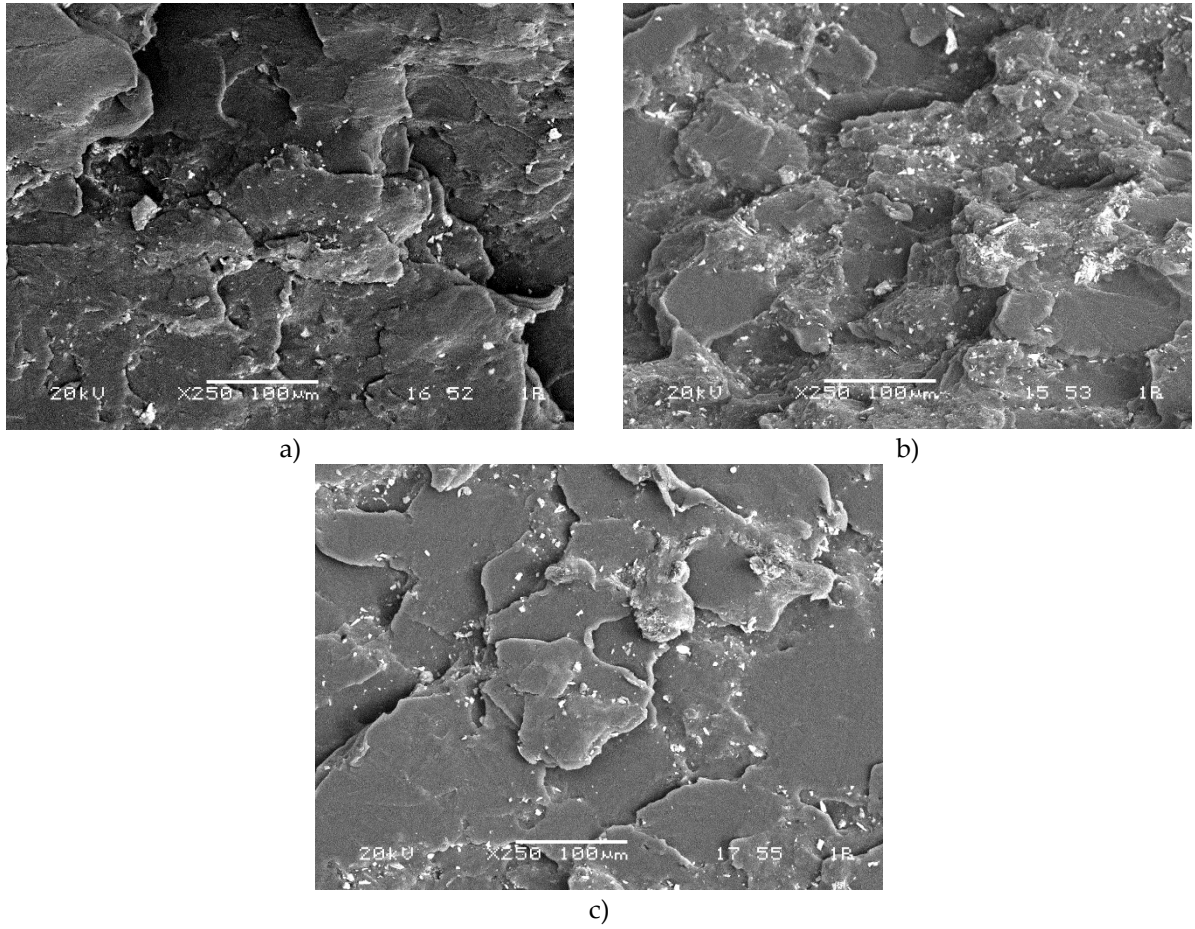
Şekil 5. UHMWPE-ağ. %2 HAp toz karışımının SEM-EDS analizi

Figure 5. SEM-EDS analysis of UHMWPE-2 wt.% HAp powder mixture.

#### UHMWPE – HAp Kompozit Kırık Yüzeylerinin SEM-EDS İncelemesi (SEM-EDS Observations of Fracture Surfaces of UHMWPE-Hap Composites)

Sıcak preslenmiş UHMWPE-HAp kompozitleri içerisindeki HAp partiküllerinin dağılımını ve matris ile ara yüzeyini görebilmek için kompozitler sıvı azot içerisinde bekletilerek kırılmıştır ve numunelerin kırık yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kompozitlerin kırık yüzey mikroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Numunelerin kırık yüzey mikroyapı incelemeleri sonucunda kırılmaların agregat tane sınırları boyunca gevrek karakterde olduğu gözlemlenmiştir. Beyaz renkte gözükten HAp tanelerinin sadece UHMWPE agregat sınırlarında değil, UHMWPE tanelerinin içerisine de dağıldığı görülmektedir. HAp miktarı arttıkça kırık yüzeyleri daha pürüzlü hale gelmiştir. HAp taneleri matris içerisine gömülü

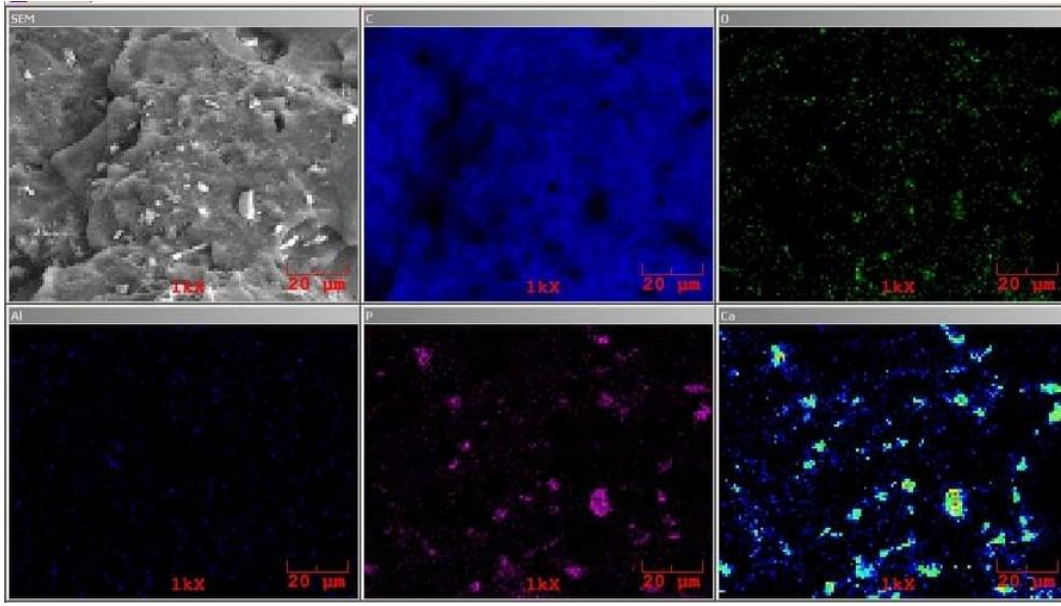
olup; UHMWPE ile aralarında iyi bir bağlanma olduğu söylenilebilir.



Şekil 6. (a-c) UHMWPE-ağ. %1-2-3 HAp kompozitlerinin kırık yüzey mikrografları

*Figure 6. Fracture surfaces of UHMWPE – 1-2- 3 wt.% HAp composites.*

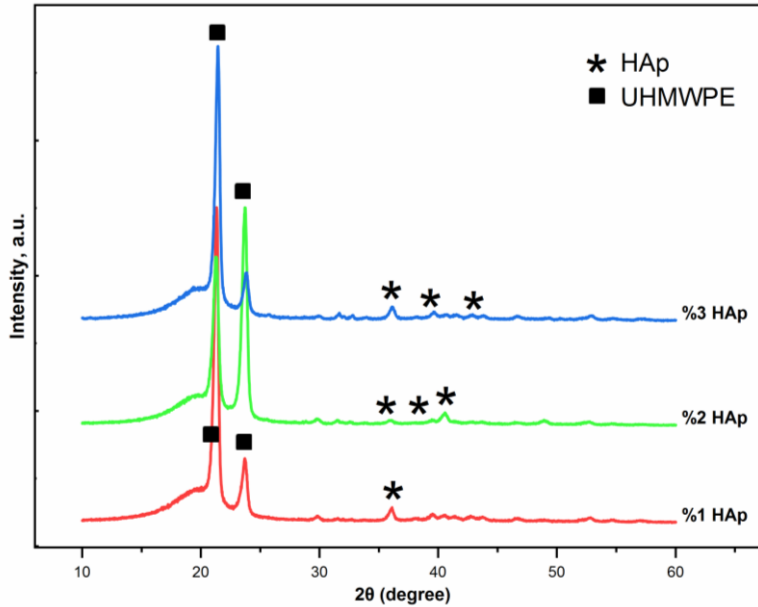
En yüksek takviye oranına sahip UHMWPE-ağ. %3 HAp kompozitin SEM-EDS haritalama analizi Şekil 7'de verilmiştir. SEM-EDS haritalama analizinde C, O, Al, P ve Ca taraması yapılmıştır. SEM resminde beyaz renkte gözükten kısımlarda Ca, P ve O'nun birlikte bulunduğu gözükmemektedir ve HAp varlığını ispat etmektedir.



Şekil 7. UHMWPE-ağ. %3 HAp takviyeli kompozitin kırık yüzeyinin SEM-EDS haritalama analizi  
 Figure 7. SEM-MAP analysis of fracture surfaces of UHMWPE – 3 wt.%HAp composite

#### XRD Analizi (XRD Analysis)

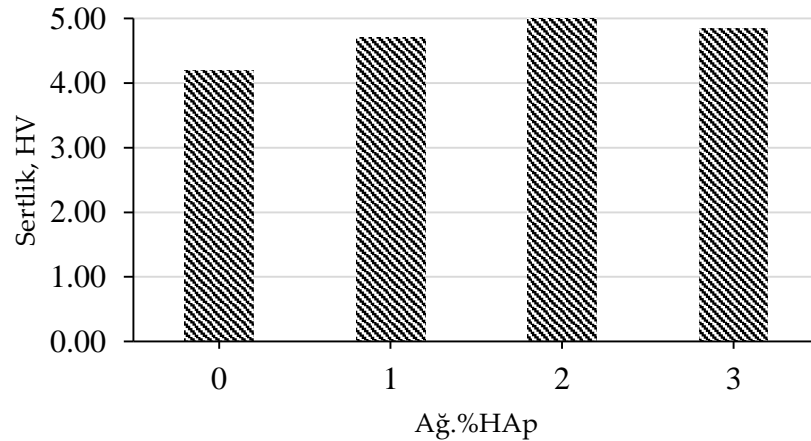
UHMWPE-HAp kompozitlerindeki kristalin ve hakim fazları görebilmek için XRD analizi yapılmıştır. UHMWPE-ağ. %1, 2 ve 3 HAp kompozitlerinin XRD analiz sonuçları Şekil 8.'de verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen piklerin matris fazı UHMWPE ve takviye fazı HAp'a ait olduğu görülmektedir. UHMWPE'ye ait litaretürdeki mevcut piklerin hepsi tespit edilmiştir. XRD cihazı ağırlıkça %5'in altını belirleyemediğinden dolayı takviye fazı HAp'a ait pikler ağ. % 2 HAp ilavesinden sonra görünür hale gelmiştir.



Şekil 8. Ağ. % 1-2-3 HAp içeren UHMWPE-HAp kompozitlerinin XRD paterni  
 Figure 8. XRD patterns of UHMWPE and UHMWPE – 1-2-3 wt.% HAp composites

### Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

UHMWPE ve UHMWPE-HAp kompozitlerinin sertlik değerleri Vickers sertlik cihazında, Vickers indentasyon yöntemiyle en az beş farklı bölgeden ölçülmüştür. Ağ.%1, %2, %3 HAp içeren UHMWPE-HAp kompozitlerinin ve katkısız UHMWPE'nin ortalamaları alınan Vickers sertlik değerleri Şekil 9'da verilmiştir. Grafikte UHMWPE matrise ilave edilen HAp miktarı ağırlıkça %3'e kadar arttıkça sertlik de artış göstermiş, ağ.%3 HAp ilavesinde ise sertlikte düşüş görülmüştür. Kang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada UHMWPE'ye ağ.%5, 10, 15 ve 20 oranında HAp ilave etmiş ve maksimum 2,21HV sertlik değerine ulaşmıştır (Kang vd.). Bu çalışmada saf UHMWPE için 4,20HV olarak tespit edilen sertlik değeri %2 HAp ilavesi ile 5,28HV'ye yükselmiş olup; literatürde elde edilen değerlerden oldukça yüksektir. Bu sertlik artışı üretim prosesine bağlı olarak gelişmiştir. HAp tanelerinin uzun polietilen zincirleri arasında çapraz bağlanmayı sağlayarak; kompozitin kristalinitesini ve buna bağlı olarak da sertliğini arttırmaktadır (Shahemi vd.). Ağ.%3 HAp ilavesinde zincirler arasındaki bağlanma artmamıştır. Tüm bu sonuçlar DSC analizleri ile desteklenmiştir. Ayrıca polimer matrise ilave edilen takviye tozlarının kompozit matris içerisinde homojen dağılımı kompozitin performansı açısından oldukça büyük öneme sahiptir (Pang vd.). UHMWPE'ye ilave edilen nano boyutta partiküllerin kompozitin tribolojik özelliklerini arttırdığı bilinmektedir (Gaot ve Mackley), 1992; (Slouf Miroslav) (Å ve Elfick). Galetz ve arkadaşları yaptıkları çalışmada UHMWPE'ye karbon nanotüplerin ilavesi ile kompozitin sünekliğinden bir kayıp olmazken; sertlik, elastik modül, akma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin arttığını ve bunun da doğru orantılı olarak aşınma dayanımlarını arttığını tespit etmişlerdir (Norton vd.). Matrise ilave edilen nano partiküller, polimer içerisinde heterojen çekirdekleyici görevi görmekte ve kompozitin kristalinite değerini arttırmaktadır. Artan kristalinite değeri, kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmektedir (Sui vd.) 2009;(Balani vd.) 2014(Peng Chang vd.) 2015(Xie vd.).



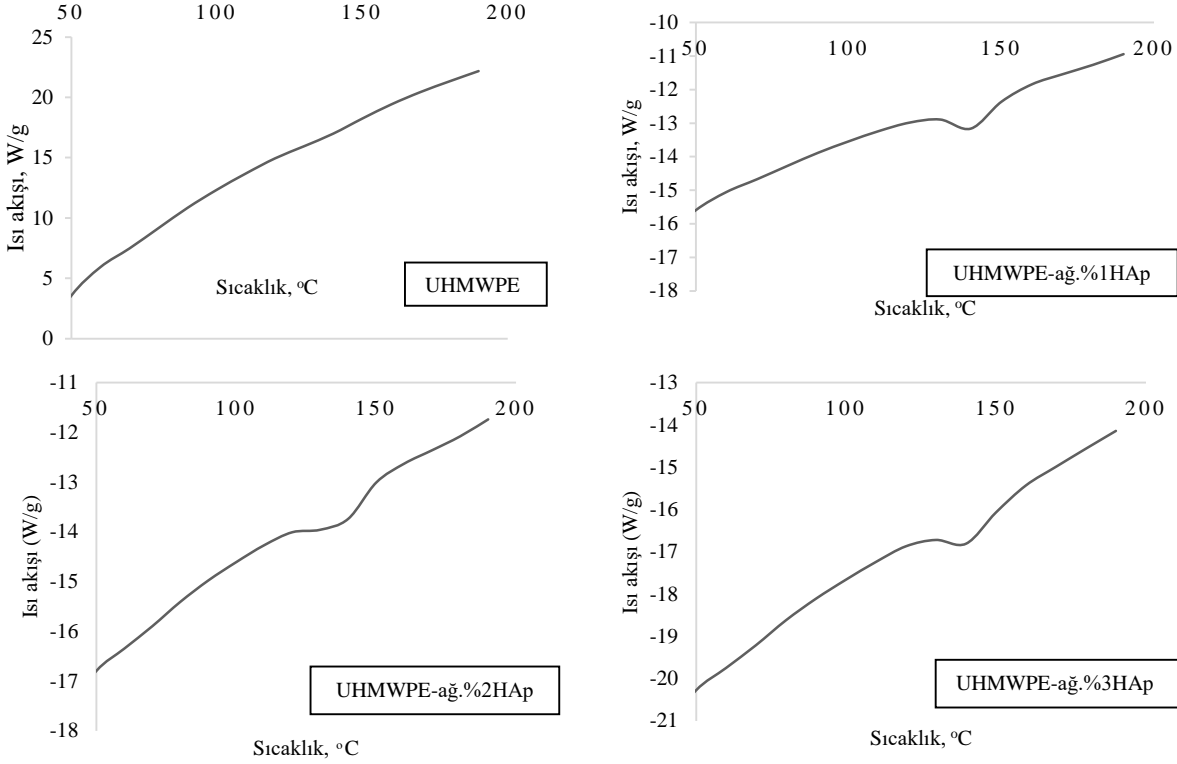
Şekil 9. Ağ. % 1-2-3 HAp içeren UHMWPE-HAp kompozitinin Vickers sertlik değerleri

Figure 9. Hardness results of UHMWPE and UHMWPE – 1-2-3 wt.% HAp composites

### DSC Analizi Sonuçları (Thermal Analysis (DSC) Results)

UHMWPE ve UHMWPE-HAp kompozitlerin, 10 °C/dk ısıtma oranında, oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar olan DSC eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. DSC eğrilerindeki endotermik pikler, numunenin ergime sıcaklığını ( $T_{erg}$ ) vermektedir ve tüm numuneler için 140 °C olarak tespit edilmiştir. Piklerin altındaki alan ergime entalpisini ( $\Delta H$ ) vermektedir (Wang vd.). Bu değer malzemenin kristalinitesiyle orantılıdır. Polimerlerin kristalinite oranı; akma gerilmesi, elastik modül, ve darbe direnci gibi mekanik özelliklerin

tespit edilebilmesinde önemli bir etkidir (Demirel ve diğ., 2011). DSC analizi ise kristalinite oranının hesaplanmasında tercih edilen bir yöntemdir (Kong ve Hay, 2002; (Bin vd.) 2001; Turell ve Bellare, 2004).



**Şekil 10.** UHMWPE ve UHMWPE – Ağ. %1-2-3 HAp kompozitinin DSC analizi  
*Figure 10.* DSC analysis of UHMWPE and UHMWPE – 1-2-3 wt.% HAp composites

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1- UHMWPE-HAp kompozitleri sıcak presleme yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- 2- SEM mikroyapılarında UHMWPE matris gri renkte gözükmemektedir. Matris içerisine gömülmüş beyaz renkli bölgeler HAp partiküllerini göstermektedir. HAp partikülleri matris içerisinde homojen olarak dağılmıştır. Polimer matris ve HAp partikülleri arasında iyi bir bağlanma olduğunu söylemek mümkündür. SEM mikrograflarında yüksek büyütmelelerdeki incelemelerde ara yüzeylerde herhangi bir kusur olmadığı görülmüştür.
- 3- EDS analizlerinde beyaz renkte gözüken partiküllerin HAp'a, gri renkli bölgenin ise UHMWPE matrise ait olduğu tespit edilmiştir. Kompozit numunelerin yüzeylerinde beyaz renkte ve daha yüksekte gözüken bölgelerden alınan analiz sonuçlarında kalsiyum ve fosfora rastlanmıştır. Bu sonuç HAp varlığını doğrulamaktadır.
- 4- XRD analizi sonucunda elde edilen piklerin (kristal olmayan malzemede zaten pik olmaz, o nedenle "kristalin pik" ifadesi doğru bir kullanım değildir) matris fazı UHMWPE'ye ve takviye fazı HAp'a ait olduğu belirlenmiştir. HAp'a ait pikler HAp miktarı arttıkça daha şiddetli hale gelmiştir.
- 5- Katkısız UHMWPE'nin sertliği 4,2 HV olarak tespit edilmiş; HAp ilavesi ile birlikte UHMWPE-HAp kompozitlerinin sertliği 5,28 HV değerlerine yükselmiştir. Genel olarak, en fazla %2 HAp ilavesine kadar ilave ile sertlik değerleri artış göstermiştir.



- 6- UHMWPE-HAp kompozitlerinin ergime sıcaklıkları DSC analizi ile 140 °C olarak tespit edilmiştir.
- 7- Bütün deneysel çalışmalar sonucunda total kalça protezinin asetebular yuva ve liner kısımlarında kullanılacak malzeme seçiminde UHMWPE-ağ%2 HAp kompozitinin uygun olabileceği belirlenmiştir.



#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Annas B., A., et al. 2018, "Tribological investigations of UHMWPE nanocomposites reinforced with three different organo-modified clays". *Polymer Composites*, Vol. 39, No: 7, pp. 2224–31.
- Antônio E., C., M., et al. 2016, "Calcium carbonate hybrid coating promotes the formation of biomimetic hydroxyapatite on titanium surfaces". *Applied Surface Science*, Vol. 370, pp. 459–68.
- Balani, K., et al. 2014, "Biosurfaces: Amaterials Science and Engineering Perspective", <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17343486>.
- Balasundaram, G., et al. 2006, "Using hydroxyapatite nanoparticles and decreased crystallinity to promote osteoblast adhesion similar to functionalizing with RGD". *Biomaterials*, Vol 27, No: 14, pp. 2798–805.
- Çelebi Efe, G., et al. 2021, "Characterization of UHMWPE- HAp coating produced by dip coating method on Ti6Al4V alloy". *Surface and Coatings Technology*, Vol. 418, pp. 127091.
- Dastjerdi, R., ve Montazer, M., 2010, "Colloids and Surfaces B : Biointerfaces A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles : Focus on anti-microbial properties". *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, Vol. 79, No: 1, pp. 5–18.
- Demirel, B., et al. 2011, "Crystallization Behavior of PET Materials". *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt*, Vol. 13, No:1, pp. 26–35.
- Edward, B., et al. 2020, "Threshold for Computer- and Robot-Assisted Knee and Hip Replacements in the English National Health Service". *Value in Health*, Vol. 23, No:6, pp. 719–26.
- Gaot, P., Mackley M. R., 1992, *Surface treatment of ultra high molecular weight polyethylene to enhance adhesion and conductivity properties\**. Vol. 33, No: 19, pp. 4075–80.
- Gong, S., et al., 2008, "Zirconium complexes with versatile b -diketiminat ligands : Synthesis , structure , and ethylene polymerization". *Journal of Organometallic Chemistry*, Vol. 693, No:23, pp. 3509–18.
- Hussain, O., 2021, "Tribological performance of biomedical grade UHMWPE/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Vitamin-C hybrid composite for cartilage replacements". *Materials Letters*, Vol. 291, Elsevier B.V., pp. 129515.
- Kang, X., 2016, "Mechanical properties study of micro- and nano-hydroxyapatite reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites". *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 133, No:3,
- Kilgour, A., Elfick, A., 2009, "Tribology International Influence of crosslinked polyethylene structure on wear of joint replacements". *Tribology International*, Vol. 42, No:11–12, Elsevier, pp. 1582–94.
- Kong, Y., Hay, J. N., 2002, *The measurement of the crystallinity of polymers by DSC*. Vol. 43, pp. 3873–78.
- Macuvele, D.L. P., et al. 2017, "Advances in ultra high molecular weight polyethylene/hydroxyapatite composites for biomedical applications: A brief review". *Materials Science and Engineering C*, Vol. 76, pp. 1248–62.
- Mirsalehi, S. A., et al. 2015 "Tensile and biocompatibility properties of synthesized nano-hydroxyapatite reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposite". *Journal of Composite Materials*, Vol. 50, No:13, pp. 1725–37.
- Nadzadi, M.E., et al. 2002, "Effects of acetabular component orientation on dislocation propensity for small-head-size total hip arthroplasty". *Clinical Biomechanics*, Vol. 17, No:1, pp. 32–40.
- Norton, K.A., et al. 2015, "Heterogeneity of chemokine cell-surface receptor expression in triple-negative breast cancer". *American Journal of Cancer Research*, Vol. 5, No:4, pp. 1295–307.
- Pang, W., et al. 2015, "Mechanical and thermal properties of graphene oxide/ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposites". *RSC Advances*, Vol. 5, No:77, Royal Society of Chemistry, pp. 63063–72.
- Peng C.B., et al. 2015, "Optimization on wear performance of UHMWPE composites using response surface methodology". *Tribology International*, Vol. 88, pp. 252–62.

- Pylypchuk, I. V., et al. 2016, "Formation of biomimetic hydroxyapatite coatings on the surface of titanium and Ti-containing alloys". *Surface Chemistry of Nanobiomaterials*, pp. 193–229,
- Ruggiero, A., et al. 2020, "In silico total hip replacement wear testing in the framework of ISO 14242-3 accounting for mixed elasto-hydrodynamic lubrication effects". *Wear*, Vol. 460–461.
- Sadat-Shojai, M., et al. 2013, "Synthesis methods for nanosized hydroxyapatite indiverse structures". *Acta Biom aterialia*, Vol. 9, pp. 7591–621.
- Salari, M., et al. 2019, "Improved wear, mechanical, and biological behavior of UHMWPE-HAp-zirconia hybrid nanocomposites with a prospective application in total hip joint replacement". *Journal of Materials Science*, Vol. 54, No:5, pp. 4259–76.
- Shahemi, N., et al. 2018, "Long-term wear failure analysis of uhmwpe acetabular cup in total hip replacement". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 87, pp. 1–9.
- Slouf M., 2012, *Monitoring and minimization of UHMWPE wear in total joint replacements*.
- Sui, G., et al., 2009, *Structure , mechanical properties and friction behavior of UHMWPE / HDPE / carbon nanofibers*. Vol. 115, pp. 404–12.
- Toh, S. M. S., et al. 2021, " Computational method for bearing surface wear prediction in total hip replacements". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 119, pp. 104507.
- Turell, M. B, Anuj B., 2004, "A study of the nanostructure and tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene". *Biomaterials*, Vol. 25, No:17, pp. 3389–98.
- Ursavaş, F. ., Yaradılmış Y. U., 2020, "Relationship Between Pain Beliefs and Postoperative Pain Outcomes After Total Knee and Hip Replacement Surgery". *Journal of Perianesthesia Nursing*, W.B. Saunders
- Wang, H., et.al, 2016, "Improving the creep resistance and tensile property of UHMWPE sheet by radiation cross-linking and annealing". *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 125, pp. 41–49,
- Wei, He., Benson, R., 2011, "10 Polymeric Biomaterials". *Applied Plastics Engineering Handbook*,
- Xie, X. L., et al. 2003, *Wear performance of ultrahigh molecular weight polyethylene / quartz composites*. Vol. 24, pp. 1889–96.
- Yadav, A., et al., 2021, "YouTube – An unreliable source of information for Total hip replacement". *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, Vol. 13, pp. 82–84.
- Yuezhen, B., et al. 2001, "Ultra-drawing of low molecular weight polyethylene D ultra-high molecular weight polyethylene blend ® lms prepared by gelation / crystallization from semi-dilute solutions". Vol. 42, pp. 8125–35.



## PIRINKAYALAR TÜNELİ (ERZURUM, TÜRKİYE) GİRİŞ VE ÇIKIŞ PORTALLARININ SAYISAL MODELLENMESİ: ÖRNEK VAKA ÇALIŞMASI

<sup>1,\*</sup>Alaattin SAKCALI , <sup>2</sup>Muhammed Said KAYA , <sup>3</sup>Muhammet ESER 

<sup>1</sup>Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Çimberton Hazır Beton ve Prefabrik Yapı Elemanları San. ve Tic. A.Ş., Malatya, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Kırtur Turizm İnş. Taah. Elek. San. ve Tic. Ltd. Şti, Erzurum, TÜRKİYE

<sup>1</sup> [alaattinsakcali@atauni.edu.tr](mailto:alaattinsakcali@atauni.edu.tr), <sup>2</sup> [m.saidkaya31@gmail.com](mailto:m.saidkaya31@gmail.com), <sup>3</sup> [muheser@gmail.com](mailto:muheser@gmail.com)

(Geliş/Received: 12.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 31.10.2021)

**ÖZ:** Kaya kütlesi sınıflama sistemleri kaya kütlelerinin mekanik davranışını karakterize etmek için kullanılmasının yanı sıra tünel kazısında kullanılacak tahkimat tasarımı için de öneriler sunmaktadır. Geçmişten günümüze birçok tünel projesinde kaya kütlesi sınıflama sistemlerindeki önerilerle tahkimat tasarımı yapılmıştır. Tünel deformasyonlarının sürekli olarak izlenmesi ve tahkimat durumunun tespiti, uygulayıcılar için zor ve maliyetli olabilmektedir. Pirinkayalar tüneli Doğu Karadeniz'i Doğu Anadolu'ya bağlayan Artvin-Erzurum karayolu üzerindeki tünellerden biri olup tahkimat tasarımında NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi) ile önerilmiş tahkimat sistemi kullanılmıştır. Proje aşamasında planlanan tahkimat sistemi kazı sırasında bazı bölgelerde yine kaya kütlesi sınıflama sistemine bağlı olarak değiştirilmiştir. Tünellerde giriş ve çıkış portallarının kazısı ve tercih edilen tahkimat sisteminin analizi muhtemel sorunların önlenmesini sağlayacaktır. Bu çalışmada, Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portalları sonlu farklar yöntemine dayalı olarak analiz gerçekleştiren FLAC3D programı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Gerçekleştirilen bu örnek vaka çalışması ile, bir tünelde ampirik yöntemle tasarlanan tahkimat sisteminin durumu hakkında bilgi edinmek için yardımcı araç olarak kullanılan sayısal modelleme sonuçlarına değinilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kaya kütlesi sınıflama sistemleri, Kazı, Sayısal modelleme, Tahkimat tasarımı, Tünel

### Numerical Modelling of Entrance and Exit Portals in Pirinkayalar Tunnel (Erzurum, Turkey): A Case Study

**ABSTRACT:** Rock mass classification systems are used to characterize the mechanical behavior of the rock mass, as well as suggestions for the support design to be used in tunnel excavation. In many tunnel projects from past to present, the support has been designed with the suggestions in the rock mass classification systems. Continuous monitoring of tunnel deformations and determination of support condition can be difficult and costly for practitioners. Pirinkayalar tunnel is one of the tunnels on the Artvin-Erzurum highway that connects Eastern Black Sea to Eastern Anatolia and the support system proposed with NATM (New Austrian Tunneling Method) was used. The support system planned at the project stage was changed again depending on the rock mass classification system during the excavation. Analysis of the excavation and preferred support system in the entrance and exit portals of tunnels prevent possible problems. In this study, the entrance and exit portals of the Pirinkayalar tunnel are modeled in 3D using the FLAC3D based on the finite difference method. With this case study, numerical modeling results, which are used as an auxiliary tool to obtain information about the state of the empirically designed support system in a tunnel, are mentioned.

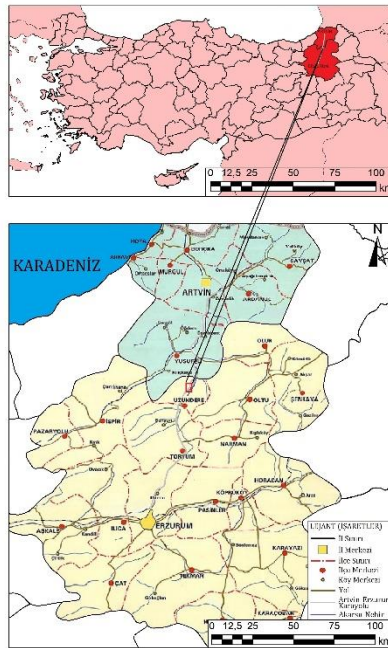
**Key Words:** Rock mass classification systems, Excavation, Numerical modelling, Support design, Tunnel

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişten günümüze farklı amaçlar doğrultusunda birçok tünel açılmıştır. Tünel kazısında farklı yöntemler kullanılsa da temel amaç deformasyonu mümkün olduğunca engellemektir. Kendini tutabilen kaya kütlelerinde tahkimat ihtiyacı olmamasına rağmen kendini tutamayan kaya kütlelerinde deformasyonu engellemek için tahkimat sistemleri kullanılmaktadır. Tünel kazısında kullanılan tahkimat tercihi için farklı yöntemler kullanılsa da pratik oluşu nedeniyle kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde önerilen tahkimat sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Barton ve diğ. (1974) tarafından önerilen Q, Bieniawski (1989) tarafından önerilen RMR (Rock Mass Rating), Palmström (1995) tarafından önerilen RMi (Rock Mass index), Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen GSI (Geological Strength Index) kaya kütlesi sınıflama sistemleri en yaygın olarak kullanılanlarıdır. Bu sınıflama sistemlerinin bazılarında tüneller için tahkimat tasarım önerileri de sunulmaktadır. Ayrıca, NATM (New Austrian Tunneling Method) bir kazı yöntemi olmasının yanı sıra kaya kütlelerinin sınıfı ve tahkimat tasarımı önerisinde de bulunmaktadır (ÖNORM B 2203, 1994).

Doğu Karadeniz boyunca uzanan engebeli topoğrafya bu bölgede birçok tünel açılmasına neden olmuştur. Doğu Karadeniz'i Doğu Anadolu'ya bağlayan önemli yollardan biri olan Artvin-Erzurum karayolu üzerinde 50'den fazla tünel açılmasına rağmen rahat bir seyahat için halen tünel gereksinimi duyulmaktadır. Tortum kıyısı boyunca uzanan Çağdet dağı etekleri ulaşımı zorlaştırmaktadır. Pirinkayalar tüneli bu etekler boyunca geçilecek yolu kısaltarak ulaşımı rahat hale getirmek için planlanmıştır. Modifiye at nalı kesitli açılacak tünelin kazı genişliği 12 m, kazı yüksekliği ise 9 m'dir. Nihai tünelin üst yarıçapı 5,3 m olacaktır. Uzundere'nin kuzey doğusu için planlanan Pirinkayalar tünelinin yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Pirinkayalar tünelinin yer bulduru haritası

Figure 1. Location map of Pirinkayalar tunnel

Pirinkayalar tünelinin proje aşamasında alınan sondaj numuneleri kullanılarak kaya kütlesi farklı sınıflama sistemlerine göre karakterize edilmiştir. Tünel için planlanan güzergâh engebeli olduğu için çok fazla sondaj yapılamamıştır. Bu nedenle kazı sırasında alınan numuneler kullanılarak kaya kütlelerinin kalitesi yeniden belirlenmiş ve bu sınıflama göz önünde bulundurularak tasarlanan yeni tahkimat sistemi kullanılmıştır. Tahkimat tasarımı uygulayıcılar tarafından Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) teknik şartnamesine göre gerçekleştirilmiştir (KGM, 2013).

Sınıflama sistemleri ön tahkimat tasarımı için iyi bir araçtır. Fakat tercih edilen tahkimatlı kazı sonrası tünel çevresinde oluşacak deformasyonun belirlenmesi ve tahkimat durumu hakkında bilgi edinmek için modellemenin bir araç olarak kullanılması uygulayıcıya büyük fayda sağlayacaktır. Bunun yanı sıra tünel giriş ve çıkış portallarında tünel çevresindeki kaya kütlesi ve uygulanacak tahkimat sisteminin davranışı iyi analiz edilerek olası problemlerin önüne geçilebilecektir. Tünel kazısı ve tahkimat sistemlerinin davranışı sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi farklı analiz yöntemleri kullanılarak modellenebilir. Literatürde ön tahkimat tasarımında kaya kütlesi sınıflama sisteminin kullanıldığı ve tünel çevresindeki kaya kütlelerinin ve tercih edilen tahkimat sisteminin davranışının sayısal olarak modellendiği birçok çalışma vardır.

Kontogianni ve Stiros (2002) çalışmalarında Yunanistan'da açılan 5 farklı tünel projesini ele alarak farklı kaya kütlelerinde açılan tünel kazılarını sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak modellemişlerdir. Modellerden elde edilen deformasyon değerlerini tünellerden alınan ölçüm değerleriyle karşılaştırarak tünel kazısında deformasyon tahmini için modellemenin güvenli olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır. Sari ve Pasamehmetoglu (2004) çalışmalarında Bilecik-İstanbul karayolu üzerinde bulunan Kaletepe tüneli güzergâhındaki kaya kütlelerini Q ve RMR ile karakterize etmişler ve bu sistemlerle yapılan önerileri kullanarak ampirik ön destek tasarımı yapmışlardır. Önerilen bu destek sistemleri ile gerçekleştirilen tahkimatlı tünel kazısını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemişler ve tünel çevresindeki yenilme derecesi ve deformasyon davranışlarını tahkimatsız tünel kazısı modelleri ile karşılaştırmışlardır. Basarir (2006) çalışmasında Ankara'nın kuzeydoğusundaki Sulakyurt barajı için açılacak derivasyon tüneline kazısında kullanılacak ön tahkimat sisteminin tasarımında Q sistemi ile sunulmuş öneriler tercih edilmiştir. Tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak açılacak tünel ve bu tünellerin tahkimatsız olarak açılması durumunda tünel çevresinde oluşacak gerilme, deformasyon dağılımı ve plastik zon yarıçapı değişimi sonlu elemanlar ile yapılan modeller üzerinden incelenmiştir. Çalışmada tünel kazıları için tahkimat tasarımında ampirik, analitik ve sayısal modelleme yöntemlerinin birleştirilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Gurocak ve diğ. (2007) çalışmalarında Malatya'nın kuzeyindeki Boztepe baraj sahasındaki bir derivasyon tüneline kazısında tercih edilecek tahkimat sisteminin tasarımında RMR ve Q sisteminin önerilerini göz önünde bulundurmışlardır. Tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği gerilme, deformasyon ve plastik zon yarıçapı gibi parametreler üzerindeki etkisini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemi ile tahkimatlı ve tahkimatsız tünel kazısını modellemişlerdir. Tahkimat tasarımının güvenilirliği için ampirik, analitik ve sayısal modellemenin birlikte kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Genis ve diğ. (2007) çalışmalarında Yenicaga-Zonguldak karayolundaki Dorukhan tüneli güzergâhındaki kaya kütlesi sınıfına göre tercih edilecek tahkimat sistemini Q, RMR, R<sub>Mi</sub> ve NATM ile inceleyip kazı ve tahkimat sistemi önerileri sunmuşlardır. Önerilen destek sistemlerinin performanslarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sari ve diğ. (2008) çalışmalarında Bilecik-İstanbul karayolu üzerinde inşa edilen bir tüneli ele alarak ampirik yöntemle tasarlanan tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği deformasyon ve yenilme üzerindeki etkilerini sayısal modeller ile analiz etmişlerdir. Sayısal analiz sonuçlarının ampirik değerlerle desteklendiğinde mantıklı ve güvenilir olduğu sonucuna varmışlardır. Sopaci ve Akgun (2008) çalışmalarında Samsun-Ordu-Giresun hattı üzerinde yer alan ve Ordu çevre yolunda ikiz tünel olarak planlanan Boztepe tüneli güzergâhındaki kaya kütlelerini sondaj verileriyle karakterize etmiş ve Q sistemine göre tercih edilen tahkimat sistemini kullanarak modelleme yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı gerçekleştirdikleri tahkimatlı ve tahkimatsız kazı modelleri ile deformasyon dağılımlarına tahkimat sisteminin etkisini incelemişlerdir. Özsan ve diğ. (2009) Ankara metrosunun Mecidiye ve Gazino istasyonları arasındaki tünel kazısında Q, RMR ve NATM'a göre tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresindeki deformasyon dağılımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemine dayalı modelleme çalışmaları yapmışlardır. Tahkimat tasarımında ampirik yöntemin sayısal modelleme ile desteklenmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Gurocak (2011) tarafından Malatya'nın doğusundaki Kapıkaya baraj sahasındaki bir derivasyon tüneli için RMR ve R<sub>Mi</sub> sınıflama sistemlerine bağlı olarak önerilen tahkimat sisteminin plastik zon değişimi üzerindeki etkisi sonlu elemanlar ile modellenerek analiz edilmiştir. Akgun ve diğ. (2014) tarafından Giresun'da Karadeniz kıyısı boyunca uzanan

karayolunun iyileştirilmesi amacıyla inşa edilen Giresun-Tirebolu arasındaki Geçilmez tüneline Q, RMR ve NATM ile gerekli tahkimat sisteminin önerildiği tünel bölümleri sonlu elamanlara dayalı olarak modellenmiştir. Tahkimatlı ve tahkimatsız kazı modelleri ile ampirik olarak tercih edilen tahkimat sisteminin deformasyon dağılımı ve yenilmeler üzerindeki etkisine bakılmıştır. Yalcin ve diğ. (2015) çalışmalarında Malatya-Elazığ arasındaki ikiz tünel olarak planlanan Kömürhan karayolu tüneline RMR ve RMI ile tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak gerçekleştirilen tünel kazısını modellemişlerdir. Tahkimatlı ve tahkimatsız olarak gerçekleştirdikleri tünel modelleri ile tercih edilen tahkimat sistemlerinin plastik zon üzerindeki etkisine bakmışlardır. Agan (2016) çalışmasında Suruç su tüneline çevresindeki kaya kütlelerinin sıkışma potansiyelini ampirik, analitik ve sayısal modelleme yöntemi ile incelemiştir. Kanik ve Gurocak (2018) Trabzon-Gümüşhane karayolu üzerindeki ikiz tünel olarak açılan Maçka tüneline için Q, RMR ve RMI ile ampirik ön tahkimat tercihleri sunmuşlardır. Tercih edilen tahkimat sistemlerinin plastik zon ve maksimum deformasyon üzerindeki etkisini görmek için tünel kazılarını tahkimatlı ve tahkimatsız olarak modellemişlerdir. Optimum tahkimat sisteminin tasarımında ampirik ve sayısal modelleme yöntemlerinin birlikte kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır. Kaya ve Bulut (2019) çalışmalarında Artvin'in Hopa-Borçka ilçeleri arasında planlanan Cankurtaran karayolu tüneline kullanılacak tahkimat sistemini Q sınıflama sistemine göre tasarlamışlardır. Tercih edilen bu tahkimat sisteminin deformasyon ve plastik zon etkisine bakmak için tahkimatlı ve tahkimatsız tünel kazıları sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak 2 ve 3 boyutlu modellenmiştir. Kaya ve Sayin (2019) çalışmalarında Rize'nin güneyinde bulunan Rize çevre yolu ile Küçükçayır karayolunu birleştirmek amacıyla planlanan Salarha tüneline için Q sınıflama sistemine bağlı tahkimat sistemi tasarlamışlardır. Tercih edilen tahkimat sisteminin plastik zon ve maksimum deformasyon üzerindeki etkisini 2 ve 3 boyutlu modelleme çalışmaları ile incelemişlerdir. Sayısal modellemeyi ampirik yöntemle yapılan tahkimat tasarımının etkisini incelemek için bir yardımcı araç olarak kullanmışlardır.

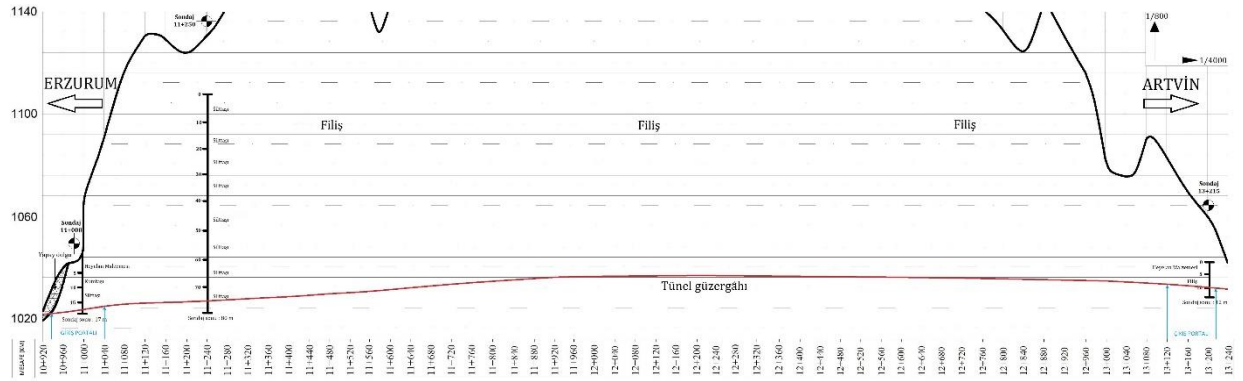
Bu çalışmada, Pirinkayalar tüneline giriş ve çıkış portalları ele alınmış ve bu bölümler sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Modelleme çalışmalarında uygulanan tünel kazısı ve tercih edilen tahkimat sistemi bire bir uygulanmıştır. Tahkimatlı tünel kazısı modelinde giriş ve çıkış portallarındaki tünel çevresindeki deformasyon dağılımlarının yanı sıra zonların blok durumu ve maksimum asal gerilme konturları da incelenmiştir. Giriş ve çıkış portallarındaki uzunlamasına deformasyon profillerinin (LDP) incelenmesi için ise bu bölümler tahkimatsız olarak modellenmiştir. Ayrıca, çalışma içerisinde çıkış portalında belirlenen bir noktada tünel kazısı yapılırken 22 gün boyunca alınan tavandaki deformasyon ölçümlerine yer verilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### Pirinkayalar Tüneline Jeolojik ve Geoteknik Özellikleri (Geological and Geotechnical Properties of Pirinkayalar Tunnel)

Tortum gölü kıyısı boyunca uzanan yolun kısaltılması ve daha rahat bir yolculuk için düşünülen Pirinkayalar tüneline kazısının Çağdet dağı altından geçmesi planlanmıştır. Pirinkayalar tüneline güzergâhının Erzurum tarafındaki giriş portalının yakınlarında sedimenter kökenli karbonatlı kireçtaşı ihtiva eden Olurdere formasyonu ile karşılaşmaktadır. Fakat tünel güzergâhının tamamı ana oluşumu sedimenter kökenli pelajik kireçtaşı olan Berdiga formasyonundan oluşmaktadır. Çağdet dağı'nın üst bölgelerinde ise heyelan malzemesi bulunmaktadır (Kopar ve Çakır, 2013; MTA GeoScience Map Viewer and Drawing Editor, 2019).

Zorlu topoğrafik koşullar nedeniyle sadece 3 farklı yerde sondaj yapılabilmiş ve alınan bu sondaj verileri kullanılarak tünel kazısı ve tahkimat sistemi ampirik olarak planlanmıştır. Erzurum tarafı olan tünel giriş portalı 10+940 ile 11+040 km arası tanımlanmış olup 11+000'dan alınan sondaj verilerinden RMR değeri 64; Q değeri 2,5; GSI değeri ise 52 olarak belirlenmiştir. Artvin tarafındaki tünel çıkış portalı (13+120 ile 13+225 km) için 13+215 km'de yapılan sondaj verileri değerlendirilmiş ve kaya kütlelerinin RMR değeri 57; Q değeri 1,458; GSI değeri 39 olarak belirlenmiştir (PTP, 2019). Tünel güzergâhının topoğrafik haritası ve sondaj yerleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tünel güzergâhının topoğrafik haritası ve sondaj yerleri

Figure 2. The topographic map of the tunnel route and drilling locations

### Giriş ve Çıkış Portallarının Kazısı ve Tahkimat Sistemleri (Excavation and Support Systems of Entrance and Exit Portals)

Modifiye at nalı kesitli olarak açılacak tünel üst ve alt yarı kazısı olmak üzere iki aşamada planlanmıştır. Giriş portalında kazı patlatmalı kazı olarak gerçekleştirilmekte iken çıkış portalındaki kazıda ise patlatmalı kazıya gerek duyulmamıştır. Giriş portalında üst yarıda açılan 90-100 delik ile patlatma gerçekleştirilirken alt yarıda 50 delik ile patlatmalı kazı yapılmıştır.

Tünel giriş portalının 10+940 ile 10+982 km arasında kaya sınıfı B3-Ö1 olarak tanımlanmış kazı ilerlemesi 0,5-1 m iken tahkimat sistemi olarak iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 0,5 m aralıkla 200 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 6 m'lik  $\phi 28$  SN bulon kullanılmıştır. 10+982 ile 11+028 km arasında ise kaya sınıfı B3-Ö2 olup 1-2 m'lik kazı ilerlemesinin ardından iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 1,5 m aralıklarla 140 ve 120 NPI'lık çelik iksa, püskürtme beton, 10-11 adet 4 m'lik  $\phi 28$  SN bulon tercih edilmiştir.

Çıkış portalının 13+225 ile 13+202 km arası kaya sınıfı B3-Ö1 iken 0,75 m kazının ardından iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 200 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 6 m IBO bulon kullanılmıştır. Çıkış portalının 13+202 ile 13+107 km arası kaya sınıfı B2-Ö olup 1 m'lik kazı ilerlemesi yapılmış ve iki sıra  $\phi 221/221$  çelik hasır, 120 NPI çelik iksa, püskürtme beton ve 10-11 adet 4 m  $\phi 28$  SN bulon kullanılmıştır (PTP, 2019).

### Kaya Kütleli ve Tahkimat Sistemlerinin Özellikleri (The Properties of the Rock Mass and Support Systems)

Eşitlik 1'de verilen genelleştirilmiş Hoek-Brown yenilme kriterinde kaya kütleli özellikleri  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  değeri ile tanımlanmış olup bu değerleri Hoek ve Brown (1997) tarafından önerilen Eşitlik 2-4 ile belirlemek mümkündür.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

$$m_b = m_i e^{\left( \frac{GSI-100}{28-14D_f} \right)} \quad (2)$$

$$s = e^{\left( \frac{GSI-100}{9-3D_f} \right)} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4)$$

Eşitliklerde;  $\sigma'_1$  değeri en büyük,  $\sigma'_3$  ise en küçük etkin asal gerilmeleri,  $m_b$ ,  $s$  ve  $a$  değerleri Hoek-Brown kaya kütleli sabitlerini,  $\sigma_{ci}$  değeri kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımını,  $m_i$  ise kaya

malzemesinin Hoek-Brown sabitini vermektedir. Hesaplamalarda Hoek (2007) tarafından önerilen değerler göz önünde bulundurularak kireçtaşı için  $m_i$  değeri 10 tercih edilmiştir. GSI jeolojik dayanım endeksi,  $D_f$  örselenme faktörü olup çok iyi kalitede patlatmalı kazı için hesaplamada bu değer 0 olarak alınmıştır (Hoek, 2007).

Kaya kütlelerinin deformasyon modülünün ( $E_m$ ) belirlenmesinde; Bieniawski (1978) tarafından önerilen Eşitlik 5, Grimstad ve Barton (1993) tarafından önerilen Eşitlik 6, Read ve diğ.. (1999) tarafından önerilen Eşitlik 7, Hoek ve diğ. (2002) tarafından önerilen Eşitlik 8 ve Heok (2007) tarafından önerilen Eşitlik 9 kullanılmış olup bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

$$RMR > 50 \text{ için; } E_m = 2RMR - 100 \quad (5)$$

$$Q > 1 \text{ için; } E_m = 25 \log Q \quad (6)$$

$$E_m = 0,1 \left( \frac{RMR}{10} \right)^3 \quad (7)$$

$$E_m = \left( 1 - \frac{D_f}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (8)$$

$$E_m = 100 \left( \frac{1-D_f/2}{1+e^{((75+25D_f-GSI)/11)}} \right) \quad (9)$$

Eşitliklerde; RMR, Q ve GSI ilgili sınıflandırma için değerleri,  $D_f$  örselenme faktörü,  $\sigma_{ci}$  kaya malzemesinin dayanımını vermektedir. Modellerde kaya kütleleri 'model Hoek-Brown' ile tanımlanmış olup kayma (G) ve hacimsel esneme (K) modülü sırasıyla Eşitlik 10 ve 11 ile hesaplanmıştır (Itasca, 2005). Bu çalışmada kaya kütlelerinin Poisson oranı ( $\nu$ ) ortalama bir değer olarak 0,25 alınmıştır.

$$G = \frac{E_m}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

$$K = \frac{(1+\nu)G}{(3/2)(1-2\nu)} \quad (11)$$

Erzurum tarafındaki giriş portalındaki kaya malzemesinin tek eksenli basınç dayanımı ortalama olarak 60 MPa, Artvin tarafındaki çıkış portalının tek eksenli basınç dayanımı ise ortalama 55 MPa olarak belirlenmiştir. Modellerde kullanılan kaya kütleleri özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Kaya kütlelerinin ortalama birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) ise 2.65 t/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

Giriş ve çıkış portallarında farklı tahkimat sistemleri tercih edilmiş olup tahkimat sistemlerinde kullanılan çelik iksa, çelik hasır, püskürtme beton ve kaya civatalarının özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019). Kullanılan çelik iksanın kayma (G) ve hacimsel esneme (K) modülü ise sırasıyla 80,77 MPa ve 175 MPa'dır.

**Çizelge 1.** Kaya kütlelerinin mekanik-elastik özellikleri

*Table 1. Mechanical-elastic properties of rock mass*

Portal	a	$m_b$	s	$\sigma_{ci}$ (MPa)	G (GPa)	K (GPa)
Giriş	0,50499	1,80092	0,00483	60	7,29	12,14
Çıkış	0,51217	1,13203	0,00114	55	4,06	6,76



**Çizelge 2.** Tahkimat sisteminde kullanılan elemanların özellikleri (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019)*Table 2. The properties of the elements used in the support system (Deney Raporları, 2019; PTP, 2019)*

Tahkimat elemanları	Elastisite modülü (E, GPa)	Poisson oranı (ν)	Püskürtme beton kal. (t <sub>sh</sub> , m)	Bulon kes. alanı (A, m <sup>2</sup> )	Yenilme dayanımı (σ <sub>y</sub> , MPa)	Maks. çek. dayanımı (σ <sub>tu</sub> , MPa)
120 NPI iksa	210	0,3	-	-	-	-
φ221/221 çelik hasır	210	0,3	-	-	517	650
Püskürtme beton	22	0,25	0,15	-	-	-
φ28 SN bulon	210	0,3	-	6,15E-4	490	640
R32 N IBO bulon	210	0,3	-	3,96E-4	626	723

**Sayısal Modelleme (Numerical Modelling)**

Pirinkayalar tünelinin giriş portalında 10+940 ile 11+040 km arası ortalama 30 m, çıkış portalının 13+120 ile 13+225 km arası ortalama 35 m derinlikte kazılmıştır. Derinlikle artan dikey gerilme (σ<sub>v</sub>) değeri Eşitlik 12 kullanılarak belirlenmiştir (Brown ve Hoek, 1978).

$$\sigma_v = \gamma H \quad (12)$$

Eşitlikteki; H kazı derinliği (m), γ ise dikey gerilme değişimini temsil eden kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı (MN/m<sup>3</sup>)'dir. Derinlik artışı ile hidrostatik koşullara geçme eğilimi söz konusu iken sığ derinlikler için yatay gerilme (σ<sub>H</sub>) Sheorey ve diğ. (2001) tarafından önerilen Eşitlik 13 ile hesaplanabilir (Sari ve diğ., 2008).

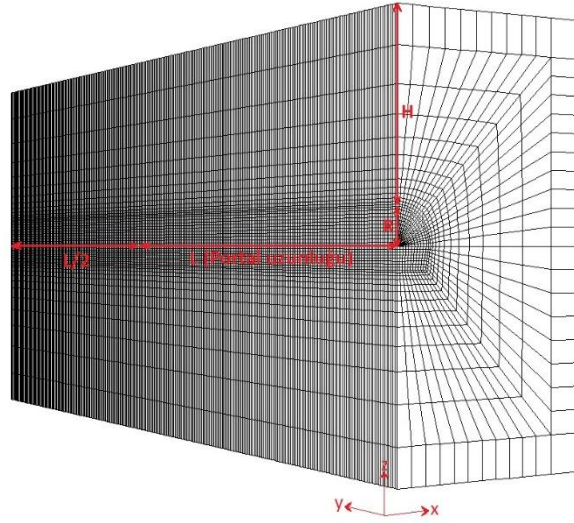
$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{\beta \cdot E_m \cdot G_H}{1-\nu} (H + 1000) \quad (13)$$

Eşitlikteki; ν Poisson oranını, β her derecede 8E-6/°C ile doğrusal bir değişim gösteren termal genleşme katsayısını, E<sub>m</sub> kaya kütlelerinin deformasyon modülünü (GPa), G<sub>H</sub> değişen derinlik için 0,024 °C/m değişim gösteren jeotermal katsayısını, H kazı derinliğini (m) vermektedir. İlk arazi gerilmesi (σ<sub>0</sub>) ise Eşitlik 14 ile belirlenebilir (Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000; Ya ve diğ., 2018).

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \quad (14)$$

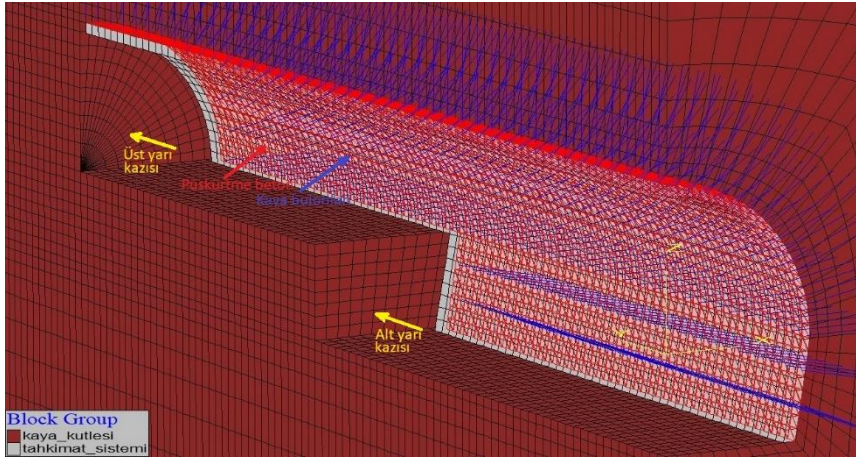
Giriş portalı için dikey (σ<sub>v</sub>), yatay (σ<sub>H</sub>) ve başlangıç gerilmesi (σ<sub>0</sub>) sırasıyla 0,795; 0,270 ve 0,532 MPa olarak belirlenmiştir. Çıkış portalı için ise bu değerler sırasıyla 0,928; 0,310 ve 0,619 MPa olarak hesaplanmıştır.

Simetrik durum söz konusu olduğu için yarı model oluşturulmuştur. Modelin sınırlarına yatay ve düşey gerilmeler uygulanmış, diğer yüzeyler dik yönde sınırlandırılmıştır. Model ağ boyutları tünelden dış yüzeye doğru artacak şekilde oluşturulmuştur. Giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen modellerin kazı öncesi zon ve grid noktası sayısı sırasıyla 245100 ve 256452'dir. Kazı öncesi model koşulları Şekil 3'de verilmiştir.



**Şekil 3.** Kazı öncesi model koşulları  
*Figure 3. Model conditions before excavation*

Sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D ver. 3.0 ile Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portallarının kazısı bire bir modellenmiştir (Itasca, 2005). Giriş ve çıkış portallarındaki kazı adımı kadar üst yarı kazısı 'model null' ile gerçekleştirilip tahkimat sistemi kurulmuştur. Tünel alt yarı kazısı tünel yüksekliğinin yaklaşık 2 katı kadar mesafe sonrası (18 m) üst yarının gerisinden gerçekleştirilmiştir. Alt yarı kazısı da gerçek duruma benzer olarak modellenmiştir. Üst yarı ve alt yarının 1 kazı adımlık ilerlemesi sonrası denge durumuna gelinceye kadar çözümlene yapılmıştır. Daha sonra diğer bir kazı adımına geçilmiş ve benzer kazı ve tahkimat döngüsü ile portal uzunluğu kadar ilerlenmiştir. Modelleme sürecinde kazı ve tahkimat sisteminin kurulum aşamaları Şekil 4'te verilmiştir.



**Şekil 4.** Model kazı ve tahkimat sistemi kurulum aşamaları  
*Figure 4. The stages of model excavation and support system installation*

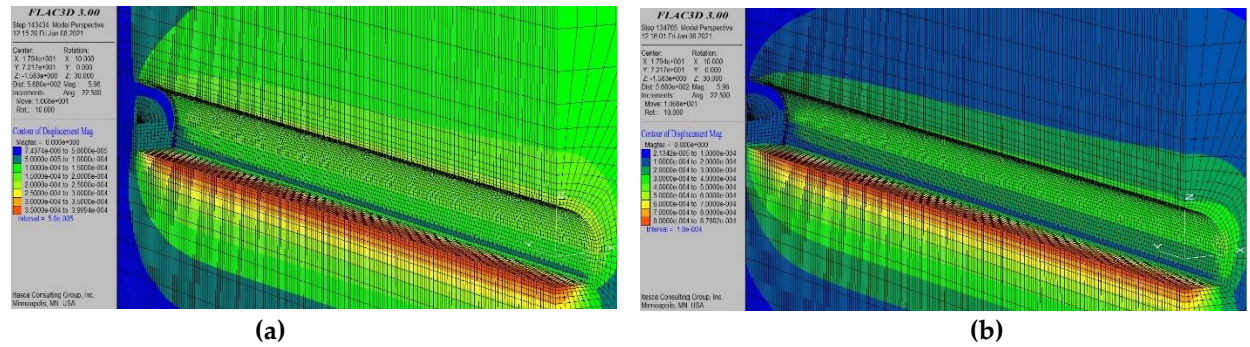
## DEĞERLENDİRMELER (ASSESSMENTS)

### Model Sonuçlarının İncelenmesi (Examining of Model Results)

Tünel projelerinde tahkimat sistemi tercihi yapılırken kaya kütlesi sınıflama sistemlerince önerilen ampirik tasarım sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle tünel giriş ve çıkış portallarında tercih edilen tahkimat sisteminin uygunluğu büyük önem taşımaktadır. Bu bölgelerde tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresindeki deformasyon dağılımı ve gerilmedeki değişiminin sayısal modelleme ile analizi pratik

oluşunun yanı sıra ekonomik olarak da fayda sağlayacaktır. Pirinkayalar tünel projesinin giriş ve çıkış portallarında tercih edilen tahkimat sistemlerinin tünel çevresindeki kaya kütlelerine etkilerinin incelenmesi amacıyla bu bölümler gerçek tünel koşullarına göre modellenmiştir.

Giriş ve çıkış portalı için gerçekleştirilen 3 boyutlu modelleme sonucu tünel aynası çevresinde oluşan deformasyon dağılımları Şekil 5'te verilmiştir. Giriş portalı için gerçekleştirilen modelin deformasyon dağılımlarına bakıldığında (Şekil 5 (a)), bu koşullardaki bir tünel kazısında tünel aynası çevresinde maksimum 0,40 mm'lik bir deformasyon beklediği görülmektedir. Tavanda gerçekleşmesi beklenen maksimum deformasyonun tercih edilen tahkimat sistemi ile engellendiği ve tünel tabanına aktarıldığı görülmektedir. Giriş portalı için yapılan model sonuçları uygulanan tahkimat sisteminin doğru bir tercih olduğunu göstermektedir.



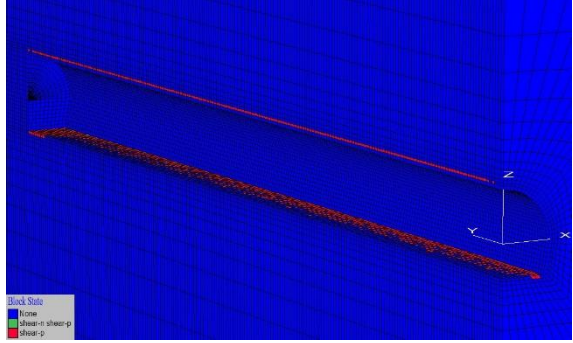
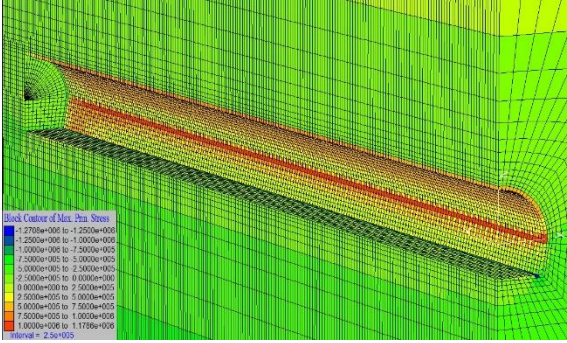
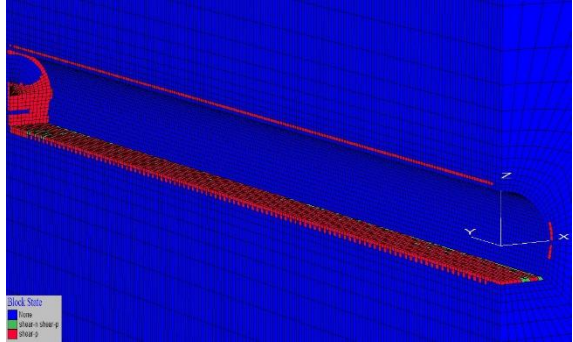
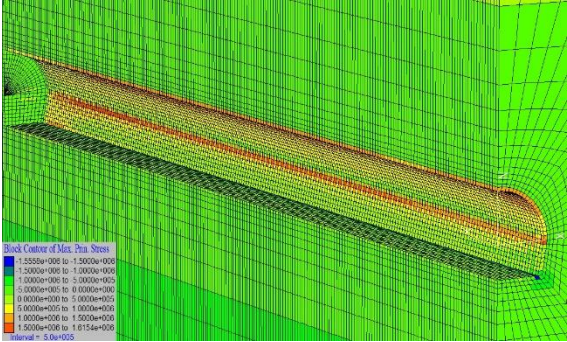
Şekil 5. Tünel aynası çevresinde deformasyon dağılımları; a) giriş portalı, b) çıkış portalı  
Figure 5. The deformation distributions around the tunnel face; a) at entrance portal, b) at exit portal

Şekil 5 (b)'den çıkış portalı için tünel aynası çevresinde oluşan deformasyon dağılımlarına bakıldığında maksimum deformasyon 0,88 mm ile tabanda meydana gelmiş olup tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde tahkimat uygulanan bölgelerdeki deformasyonları önlediği görülmektedir. Tahkimat sisteminin tabanda oluşan deformasyona ise kısmen bir etkisi söz konusu olmuştur.

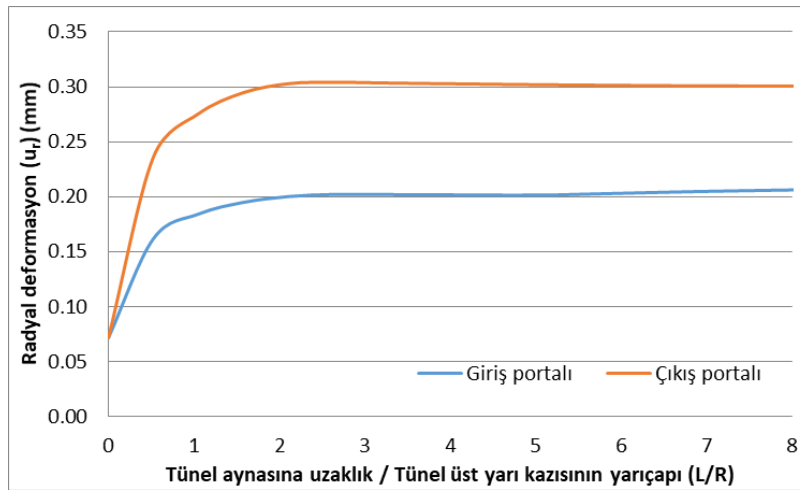
Pirinkayalar tünelinin giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen modellerden zonlardaki plastik durum ve maksimum asal gerilme konturları Çizelge 3'te verilmiştir. Giriş portalının blok durumuna bakılacak olursa makaslama kuvvetlerinden dolayı yenilme gerçekleştiği ve artık yenilme durumunun söz konusu olmadığı (shear-p) görülmektedir. Yani bu bölge için tercih edilen tahkimat sistemi ile tünel duvarında bir yenilme gerçekleşmeyecektir. Çıkış portalı için gerçekleştirilen model blok durumu ise tünel aynası çevresinde kesme yenilmesi beklenmemesine rağmen tabanda kısmi bir kesme yenilmesi söz konusu olacağını göstermektedir. Giriş portalında tünel çevresindeki maksimum asal gerilme 1,18 MPa iken çıkış portalında tünel çevresinde maksimum asal gerilme 1,62 MPa olacaktır.

**Çizelge 3.** Pirinkayalar tüneli giriş ve çıkış portallarında zonlardaki plastik durum ve maksimum asal gerilme konturları

*Table 3. The plastic state and maximum principal stress contours in zones in the entrance and exit portals of the Pirinkayalar tunnel*

Portal	Tünel aynası çevresinde zonların blok durumu	Tünel aynası çevresindeki zonlarda maksimum asal gerilme konturları
Giriş		
Çıkış		

Tünel aynasının gerisine doğru oluşan deformasyonlar uzunlamasına deformasyon profili (LDP) ile takip edilebilir. Araştırmacılar LDP'nin oluşturulmasına yönelik eşitlik önerilerinde bulunmuşlardır (Corbetta ve diğ., 1991; Panet, 1995; Carranza-Torres ve Fairhurst, 2000; Unlu ve Gercek, 2003; Vlachopoulos ve Diederichs, 2009; Basarir ve diğ., 2010; Sakcali ve Yavuz, 2019 (a)). LDP eğrisini önerilen eşitliklerle oluşturulabileceği gibi sayısal modelleme ile de oluşturmak mümkündür (Meguid ve diğ., 2003; Bi ve Zhou, 2015; Vlachopoulos ve Diederichs, 2014; Sakcali ve Yavuz 2019 (b); Sakcali, 2021). Giriş ve çıkış portalları için gerçekleştirilen tahkimatsız kazı modellerinden elde edilen tavandaki LDP eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.

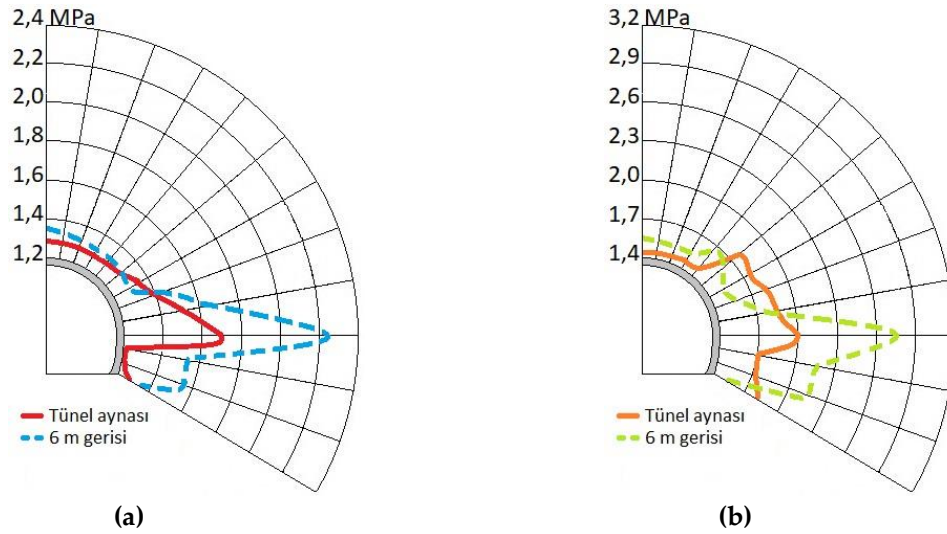


**Şekil 6.** Giriş ve çıkış portalları için uzunlamasına deformasyon profilleri (LDP)

*Figure 6. Longitudinal deformation profiles (LDP) for entrance and exit portals*

Tahkimat tünel aynası etrafında oluşan gerilmeleri de etkileyecektir. Tünel aynasında ve tünel aynası gerisine doğru üst yarı kazı yarıçapı kadar mesafede (6 m) tünel kesitindeki gerilme değişimlerine de bakılmıştır. Giriş ve çıkış portallarında aynada ve aynanın 6 m gerisinde tünel kesitindeki gerilme değişimleri Şekil 7’de sunulmuştur. Giriş ve çıkış portallarında tünel aynasının 6 m gerisinde genel olarak tünel aynasına göre bir gerilme artışı söz konusu iken tünel kesitinin bazı bölümlerinde tünel aynasında meydana gelen gerilme daha büyüktür.

Tünellerin modellenmesi ile tünel çevresinde meydana gelen gerilme, deformasyon ve plastik zon değişimi gibi parametrelerin yanı sıra ara yüzlerde veya yapı elamanlarında oluşacak etkileri de görmek mümkündür.



Şekil 7. Tünel aynası ve tünel aynasının 6 m gerisinde tünel kesitindeki gerilme değişimi; (a) giriş portali, (b) çıkış portali

Figure 7. The stress changes at cross sectional of tunnel at tunnel face and 6m behind the tunnel face; (a) at entrance portal, (b) at exit portal

#### Tünel deformasyon ölçümleri (The deformation measurements at tunnel)

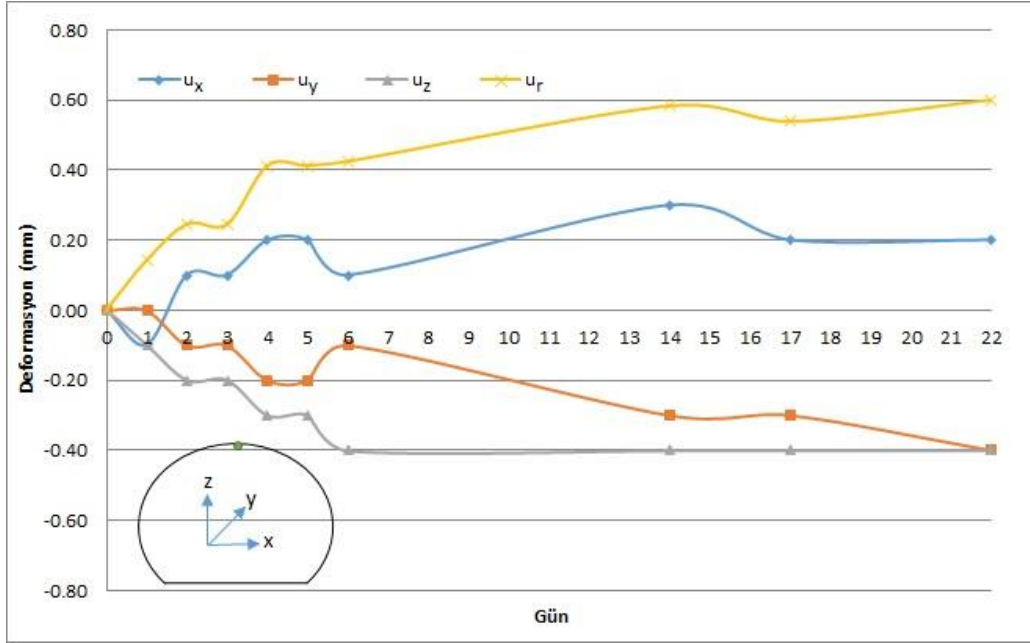
Pirinkayalar tüneline giriş ve çıkış portallarında kazı sırasında uygulayıcılar tarafından Geomax Zoom 50 model total station yaklaşık 10 m aralıklarla belirlenen yerlerden ortalama 28 gün boyunca ölçümler alınarak deformasyonlar belirlenmiştir. Ölçümler tünel kesitinin tavanı, tavan köşeleri ve yan duvarı olmak üzere 5 farklı noktada gerçekleştirilmiştir. Şekil 8’de ölçümler alınırken kullanılan cihazın bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. Ölçümler alınırken kullanılan cihazın bir görüntüsü

Figure 8. An image of the device used when taking measurements

Çıkış portalını temsil etmesi adına 13+185 km'de alınan deformasyon ölçümleri örnek olarak verilmiştir. Belirlenen yerde diğer ölçümlerde olduğu gibi 5 farklı noktada (tavan, tavan köşeleri ve yan duvarlar) ölçüm alınmış ve tavanda 22 gün boyunca meydana gelen deformasyon değişimleri Şekil 9'da verilmiştir. Tünel kesitinin x, y ve z yönlerindeki deformasyonlar sırasıyla  $u_x$ ,  $u_y$  ve  $u_z$  olup radyal deformasyon ( $u_r$ ) hesaplanmıştır.



Şekil 9. 13+185 km'de tavanda 22 gün boyunca oluşan deformasyonlar

Figure 9. The deformations at tunnel roof in 13+185 km during 22 days

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Geçmişten günümüze tünel kazılarında tahkimat sistemi tercih edilirken kaya kütlesi sınıflama sistemlerince yapılmış ampirik öneriler sıklıkla kullanılmıştır. Artvin-Erzurum karayolu üzerinde yapımı planlanan Pirinkayalar tüneli ulaşım rahatlığı açısından önemli tünellerden biri olup proje aşamasında NATM önerileri göz önünde bulundurularak tahkimat tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmada Pirinkayalar tünel projesinin giriş ve çıkış portalları sonlu farklar yöntemine dayalı FLAC3D kullanılarak modellenmiştir. Bu bölümlerdeki kazı modelleri tercih edilen tahkimat sistemi kullanılarak ve tahkimatsız olarak yapılmıştır. Modeller üzerinden gerçekleştirilen değerlendirmeler ile tünel çevresindeki kaya kütlelerinin davranışı hakkında genel bir bilgi edinilmiştir.

Tahkimatlı tünel kazısı modellerinde giriş ve çıkış portallarında oluşacak deformasyon değişimlerinin yanı sıra tünel aynası çevresindeki blok durumu ve maksimum asal gerilme değişimlerine de bakılmıştır. Ayrıca, modellerden elde edilen veriler kullanılarak tünel aynası ve tünel aynasının 6 m gerisindeki tünel kesitinde meydana gelen gerilme değişimleri incelenmiştir.

Tahkimatsız tünel kazısı modelleri kullanılarak elde edilen LDP eğrileri ile tünel çevresinde meydana gelebilecek muhtemel deformasyon tahmini gerçekleştirilmiştir. Uygulayıcı tarafından tünel kazısı sırasında sürekli olarak 10 m aralıklarla deformasyon ölçümleri alınmıştır. Çıkış portalını temsil etmesi adına 13+185 km'sinde alınan deformasyon ölçümlerine çalışma içerisinde yer verilmiştir.

Bu çalışma tünellerde ampirik yöntemle tercih edilen tahkimat sisteminin tünel çevresinde meydana getirdiği etkilerini modelleme ile ele alan örnek bir vaka çalışması olarak hazırlanmıştır. Benzer tünel projelerinde modelleme yapılarak tünel ve tahkimat sisteminin davranışı hakkında bilgi edinmek uygulayıcıya büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Ayrıca, tünel projelerinde sayısal modelleme yönteminin kullanılmasının pratik olması ve hızlı cevap vermesi nedeniyle ekonomik açıdan da faydası olacaktır.

Çalışma gerçekleştirilirken tünel giriş ve çıkış portal kazısı yapılması nedeniyle bu bölümler ele alınmıştır. İleride yapılacak bir çalışma ile tünel güzergâhında tercih edilen diğer kazı ve tahkimat sistemlerinin modellenmesi ve alınan deformasyon ölçümleri ile bu bölümlerin değerlendirilmesi düşünülmektedir.

#### KATKI BEYANI (CONTRIBUTION STATEMENT)

**Alaattin SAKCALI** : Analiz, Metodoloji, Modelleme, Yazma-inceleme & düzenleme. **Muhammed Said KAYA**: Ölçümlerin temini, İnceleme. **Muhammet ESER** : Jeolojinin tanımlanması, Veri, İnceleme.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmada sağladığı imkân ve katkılarından dolayı Karayolları 12. Bölge Müdürlüğü (Erzurum), Polatıyol Yapı ve Kırtur Turizm'e teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agan, C., 2016, "Prediction of squeezing potential of rock masses around the Suruc water tunnel", *Bull Eng Geol Environ*, 75 (2), pp. 451-468.
- Akgun, H., Muratli, S., Kockar, M. K., 2014, "Geotechnical investigations and preliminary support design for the Gecilmez tunnel: a case study along the Black Sea coastal highway, Giresun, northern Turkey", *Tunn Undergr Space Technol*, 40, pp. 277-299.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J., 1974, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", *Rock Mech*, 6 (4), pp. 189-239.
- Basarir, H., 2006, "Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey", *Eng Geol*, 86, pp. 225-237.
- Basarir, H., Genis, M., Ozarslan, A., 2010, "The analysis of radial displacements occurring near the face of a circular opening in weak rock mass", *Int J Rock Mech Min Sci*, 47 (5), pp. 771-783.
- Bi, J., Zhou, X. P., 2015, "Numerical simulation of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel under dynamic unloading", *Int J Computational Methods*, 12 (3), 1550020, pp. 1-23.
- Bieniawski, Z. T., 1978, "Determining rock mass deformability: experience from case histories", *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, pp. 237-247.
- Bieniawski, Z. T., 1989, *Engineering rock mass classifications*, Wiley, 251.
- Brown, E.T., Hoek, E., 1978, "Trends in relationships between measured and in situ stresses and depth", *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15 (4), pp. 211-215.
- Carranza-Torres, C., Fairhurst, C., 2000, "Application of the convergence confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion", *Tunn Undergr Space Technol*, 15 (2), pp. 187-213.
- Corbetta, F., Bernaud, D., Nguyen-Minh, D., 1991, "Contribution a la methode convergerce confinement par le principe de la similitude", *Rev Fr Geotech*, 54, pp. 5-11 (in French).
- Deney Raporları, 2019, *Pirinkayalar tünel ve bağlantı inşaatı projesi deney raporları*.
- Genis, M., Basarir, H., Ozarslan, A., Bilir, E., Balaban, E., 2007, "Engineering geological appraisal of the rock masses and preliminary support design, Dorukhan Tunnel, Zonguldak, Turkey", *Eng Geol*, 92, pp. 14-26.
- Grimstad, E., Barton, N., 1993, "Updating the Q-system for NMT", *Proc Int Symp on Sprayed Concrete, Fagernes*, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, 20.
- Gurocak, Z., 2011, "Analyses of stability and support design for a diversion tunnel at the Kapikaya dam site, Turkey", *Bull Eng Geol Environ*, 70, pp. 41-52.
- Gurocak, Z., Solanki, P., Zaman, M. M., 2007, "Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey", *Eng Geol*, 91, (2-4), pp. 194-208.

- Hoek, E., 2007, *Practical rock engineering*, ziyaret adresi: <https://www.rocsience.com/>, ziyaret tarihi: 12 Ocak 2017.
- Hoek, E., Brown, E. T., 1997, "Practical estimates of rock mass strength", *Int J Rock Mech Min Sci*, 34 (8), pp. 1165-1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002, "Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition". *Proc of NARMSTAC 2002*, Mining Innovation and Technology, University of Toronto Press, Toronto, pp. 267-273.
- Itasca., 2005, *Version 3.0 user manuals*, Itasca Consulting Group, Inc. Mill Place, Minnesota.
- Kanik, M., Güroçak, Z., 2018, "Importance of numerical analyses for determining support systems in tunneling: A comparative study from the Trabzon-Gumushane tunnel, Turkey", *J Afr Earth Sci*, 143, pp. 253-265.
- Kaya, A., Bulut, F., 2019, "Geotechnical studies and primary support design for a highway tunnel: a case study in Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 78, pp. 6311-6334.
- Kaya, A., Sayın, A., 2019, "Engineering geological appraisal and preliminary support design for the Salarha Tunnel, Northeast Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 78, pp. 1095-1112.
- KGM (Karayolları Genel Müdürlüğü), 2013, *NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi*, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kontogianni, V. A., Stiros, S. C., 2002, "Predictions and observations of convergence in shallow tunnels: case histories in Greece", *Eng Geol*, 63, pp. 333-345.
- Kopar, İ., Çakır, Ç., 2013, "Tortum Gölü-Tortum Boğaz vadisi ve yakın çevresinin (Uzundere-Erzurum ve Yusufeli-Artvin) serrano ve ruiz-flaño yöntemiyle jeoçeşitlilik derecesinin belirlenmesi", *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 27, pp. 46-66.
- Meguid, M. A., Rowe, R. K., Lo, K. Y., 2003, "Three-dimensional analysis of unlined tunnels in rock subjected to high horizontal stresses", *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 1208-1224.
- MTA GeoScience Map Viewer and Drawing Editor, 2019, *General Directorate of Mineral Research and Exploration*, ziyaret adresi: <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/>, ziyaret tarihi: 16 Kasım 2019.
- ÖNORM B 2203, 1994, *Untertagebauarbeiten Werkvertrags-norm*, Österreichischer Normen, Österreich.
- Özsan, A., Başarır, H., Yüceel, S., Cücen, Ö., 2009, "Engineering geological evaluation and preliminary support design for the metro extension tunnel, Ankara, Turkey", *Bull Eng Geol Env*, 68, pp. 397-408.
- Palmström, A., 1995, *RMi-A rock mass characterization system for rock engineering purposes*, PhD. Thesis, University of Oslo, Norway, 400.
- Panet, M., 1995, *Calcul des tunnels par la methode convergence-confinement*, Press de l'ecole Natinale des Ponts et Chaussees.
- PTP, 2019, *Pirinkayalar tünel ve bağlantı inşaatı projesi*.
- Read, S. A. L., Richards, L. R., Perrin, N. D., 1999, "Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks", *Proc 9th Int Soci for Rock Mech Congr*, Paris, 2, pp. 655-660.
- Sakcali, A., 2021, "Zayıf kaya kütlelerinde açılan modifiye at nalı kesitli tünellerdeki deformasyon dağılımının sayısal modelleme ile belirlenmesi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21, pp. 934-944.
- Sakcali, A., Yavuz, H., 2019 (a), "Estimation of radial deformations around circular tunnels in weak rock masses through numerical modelling", *Int J Rock Mech Min Sci*, 123, 104092, pp. 1-14.
- Sakcali, A., Yavuz, H., 2019 (b), "Zayıf kaya kütlelerinde açılan dairesel kesitli bir tünelde radyal deformasyonların sayısal modelleme ile analizi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23 (1), pp. 66-73.
- Sari, Y. D., Pasamehmetoglu, A. G., 2004, "Proposed support design, Kaletpe tunnel, Turkey", *Eng Geol*, 3 (4), pp. 201-216.
- Sari, Y. D., Pasamehmetoglu, A. G., Cetiner, E., Donmez, S., 2008, "Numerical analysis of a tunnel support design in conjunction with empirical methods", *Int J Geomech*, 8 (1), pp. 74-81.



- Sheorey, P. R., Mohan, G. M., Sinha, A., 2001, "Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress", *Int J Rock Mech Min Sci*, 38 (8), pp. 1211-1216.
- Sopaci, E., Akgun, H., 2008, "Engineering geological investigations and the preliminary support design for the proposed Ordu peripheral highway tunnel, Ordu, Turkey", *Eng Geol*, 96, pp. 43-61.
- Unlu ,T., Gercek, H., 2003, "Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel", *Tunn Undergr Space Technol*, 18 (5), pp. 547-553.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., 2009, "Improved displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels", *Rock Mech Rock Eng*, 42 (2), pp. 131-146.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M. S., 2014, "Appropriate uses and practical limitations of 2D numerical analysis of tunnels and tunnel support response", *Geotech Geol Eng*, 32, pp. 469-488.
- Ya, S., Yonghua, S., Minghua, Z., Shaofeng, L., Xiang, L., 2018, "A case study of the failure of Liziping tunnel", *Tunn Undergr Space Technol*, 80, pp. 301-312.
- Yalcin, E., Gurocak, Z., Ghabchi, R., Zaman, M., 2015, "Numerical analysis for a realistic support design: case study of the Komurhan tunnel in Eastern Turkey", *Int J Geomech*, 16 (3), 05015001e1-0501500, pp. 1-14.



## INVESTIGATION OF ROCK AGGREGATE QUALITY IMPROVEMENT THROUGH CHANGES IN CRUSHING CIRCUIT: A CASE STUDY ON VERTICAL SHAFT IMPACT CRUSHER

<sup>1</sup>Ekin KÖKEN , <sup>2</sup>Kerem ÇİMŞİR 

<sup>1</sup>Abdullah Gul University, Engineering Faculty, Nanotechnology Engineering Department, Kocasinan, 38100, Kayseri, TURKEY

<sup>2</sup> DKT Construction, Industry and Trade Inc., Yeşilce st. 11/6, Kağıthane, 34418, Istanbul, TURKEY  
[ekin.koken@agu.edu.tr](mailto:ekin.koken@agu.edu.tr), [kerem.cimsir@dk.com.tr](mailto:kerem.cimsir@dk.com.tr)

(Geliş/Received: 31.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.11.2021)

**ABSTRACT:** The present study investigates the effects of rock crushing circuits on aggregate quality. For this purpose, a crushing – screening plant located in Vize (Kırklareli, Turkey) was considered. Based on the current operating conditions, the crushing – screening plant was modeled. The simulations revealed quantitative data on the production yield, efficiency of crushers, size reduction ratio. Concerning cone and vertical shaft impact crushers, rock aggregate quality was investigated for products with a particle size range of 33 – 63 mm. As a result of full-scale crushing tests, it was determined that the quality of rock aggregates is affected by the crushing circuit. Thanks to the several changes in crushing circuit, the Los Angeles abrasion value and flakiness index of the investigated rock aggregates were improved by 32% and 35%, respectively. The key points and details on the aggregate quality improvement processes were given in this study.

**Key Words:** *Crushing – screening plant, Crushed stone, Aggregate quality, Cone crusher, Vertical shaft impact crusher*

### Agrega Kalitesi İyileştirmenin Kırma Döngüsü Değişimi İle Araştırılması: Dik Milli Kırıcı İçin Örnek Bir Çalışma

**ÖZ:** Bu çalışma kaya kırma döngüsünün agrega kalitesi üzerinde olan etkilerini araştırmaktadır. Bu amaçla, Vize’de (Kırklareli, Türkiye) bulunan bir kırma – eleme tesisi dikkate alınmıştır. Mevcut çalışma koşulları dikkate alınarak, kırma – eleme tesisinin bilgisayar ortamında simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonlar üretim miktarı, kırıcıların verimliliği ve boyut küçültme oranı gibi niceliksel verileri içermektedir. Konik ve dik milli kırıcılar dikkate alınarak, kaya agrega kalitesi 33 – 63 mm boyut grubundaki agregalar için araştırılmıştır. Büyük ölçekte gerçekleştirilen parçalanma deneylerinde, kaya agrega kalitesinin kırma döngüsünden etkilendiği belirlenmiştir. Kırma döngüsünde yapılan bazı değişimler ile, araştırılan agregaların Los Angeles aşınma değeri ve yassılık indeksi sırasıyla %32 ve %35 oranlarında iyileştirilmiştir. Bu çalışmada agrega kalitesi iyileştirme süreçlerine ilişkin ana hatlar ve detaylar verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Kırma – eleme tesisi, Kırmataş, Agregası kalitesi, Konik kırıcı, Dik milli kırıcı*

## 1. INTRODUCTION

Increasing demand for crushed stones throughout the world impels aggregate manufacturers to improve the rock aggregate production processes. In any case, these attempts aim to decrease production costs and enhance rock aggregate quality. As a matter of fact, rock aggregate quality encompasses strength, size, and shape considerations (Metso 2018). Therefore, they constitute a strong basis on the

technical and economic value of rock aggregates used for building and construction purposes. Because the natural resources should be utilized efficiently, apart from inherent drawbacks, rock aggregate quality can conceptually be enhanced by removing weathered, highly fractured, or undesirable particles from the final product. In this context, selective drilling – blasting operations can play a crucial role in removing/minimizing weathered particles from the final product (Köken *et al.*, 2020). In addition to this, it can also be possible to consider various crushing and screening operations for obtaining relatively higher quality rock aggregates (Ulsen *et al.*, 2019; Davoodi *et al.*, 2019).

Rock breakage or comminution is mainly associated with rock–crusher interactions, crushing energy consumption, and product-based evaluations, regarding modern rock aggregate science and technology. In this manner, rock crushing operations may be divided into three main phases: primary, secondary, and tertiary crushing operations, each of which has several specifications covering belt conveying systems, screens, and types of crushers (Leiva *et al.*, 2018).

Of the variability in crushing machines, jaw crushers known for their ability to crush huge rock blocks are mainly used in the primary crushing stages. Thus, they are ideal for daily operations with a relatively low-cost crushing. Cone crushers break down materials by compressing them between concave and convex-shaped surfaces. Unlike other crusher types, cone crushers have a more stable structure that enables higher capacity. Thanks to this advantage, they are highly utilized, particularly in secondary and tertiary crushing operations. The vertical shaft impact (VSI) and horizontal shaft impact (HSI) crushers use impact forces to crush materials in the crushing chamber. More profoundly, VSI type crushers can handle hard and abrasive materials, which can be declared its main advantage over HSI-type crushers.

Generally, unsuitable crushers and poor-quality crushing equipment result in many difficulties that decrease product quality (DeDiemar 1990; Svensson and Steer 1990). Herein, the rock-crusher interactions are also essential for evaluating the performance of crushers. For instance, by comparison with jaw and gyratory crushers, impact crushers can achieve a higher production yield. However, their use is limited due to high wear rates and is thus restricted to medium or weak rocks (Duthoit, 2000).

Comparing impact crushers, Nikolov (2004) proposed a dynamic particle model indicating that the impact of energy per unit mass in VSI-type crusher is greater than those of HSI-type crusher. Rahimdel and Ataei (2014) employed an analytical hierarchy process (AHP) to select primary crushing equipment. The AHP analyses indicated that the gyratory type of crusher could be a suitable option for the primary crushing operations of an iron mine in Iran. In another study, it was statistically found that the capacity of HSI-type crushers is lower than the one of cone crushers, leading to remarkable differences in their specific crushing energy consumptions. Nevertheless, this difference reduces with increasing the Los Angeles abrasion value (LAA) of rocks (Köken and Jili 2020). Therefore, rock crusher selection should be conducted rigorously because of the main differences in the specific crushing energy consumption.

In recent years, the performance of crushers has been investigated using discrete element methods (Li *et al.*, 2014; Grunditz 2015; Quist and Evertsson 2016; Chen *et al.*, 2020). When it comes to product-based evaluations, it has been acknowledged that rock crushing efficiency is associated with the configuration of process equipment, operational features, and rock properties of feed material. Tavares and Da Silveria (2008) reported that cone crusher capacity increases with decreasing the LAA of rocks. Lee and Evertsson (2011) stated that the setup of the cone crushing process affects the particle size distribution of the product. Moreover, the adjustment in broader strokes in cone crusher relatively enhances the production yield for specific size fractions. Therefore, interparticle compression in the crushing chamber should be emphasized to optimize production yield (Lee 2012). In addition, the feed gradation, variations in closed-side setting (CSS), and crusher speed affect the production yield, specific energy consumption, and product shape properties (Fladvad and Onnela 2020).

Focusing on product shape considerations, Kojovic (1995) pointed out the importance of choke feeding that improves the product shape. However, the choke feeding also causes fine material production due to extreme inter-particle compression (Guimaraes *et al.*, 2007). Eloranta (1995) declared the feed gradation and **stroke** of crushers as dominating factors affecting the degree of crushability in cone crushing.

Briggs and Evertsson (1998) stated that the shape properties of rock materials could be estimated through crushability tests, including varying operational features. Bengtsson and Evertsson (2006) found that industrial VSI type crushers provide better shape properties than cone crushers. Later on, based on VSI type crushers, a predictive model to estimate product size and shape properties was developed by Bengtsson (2009). Just as importantly, the impacts of rock breakage mechanisms on product angularity decrease in parallel with size reduction (Rajan and Singh 2017). It was reported by Hafeez *et al.* (2016) that rock aggregates produced through jaw and cone crushing circuits have a better cubical form when compared to those produced from the jaw crusher alone. Kamani and Ajalloeian (2020) stated that HSI-type crushers provide better shape properties than jaw crushers. Consequently, it can be claimed that the aggregate morphology is highly dependent upon the crusher type and crushing circuit (Rajan and Singh, 2020).

For the rock strength considerations, the uniaxial compressive strength of rocks (UCS, MPa) is an essential parameter for quantifying rock crushability in jaw crushing (Korman *et al.*, 2015; Kahraman *et al.*, 2018; Köken and Özarslan 2018). On the other hand, the Brazilian tensile strength of rocks (BTS, MPa) can be a correlative parameter evaluating the crushing energy consumption in cone crushing (Köken 2020).

The studies mentioned above have provided adequate knowledge on rock crushability from different perspectives. In this study, rock aggregate production processes of a crushing – screening plant in northwestern Turkey were considered. The dynamic simulation of the crushing – screening plant was performed considering its current operating conditions. For different size fractions of products, some aggregate properties were determined in laboratory studies. Moreover, the variations in rock aggregate quality arising from several crushing circuits were presented as a case study. As a result of full-scale crushing tests, the quality of railway ballast aggregates was improved by several changes in the crushing circuit. The details and key points on these changes were explained within the context of the present study.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Introducing the crushing – screening plant

The crushing – screening plant considered in this study is located in Vize, Kırklareli, Turkey. The plant produces filling material, concrete, subbase, and railway ballast aggregates. Employing drilling and blasting methods, rock blocks with different dimensions are obtained for crushing operations (Fig 1a). The aggregates are produced from granitic rocks composed of granite, metagranite, and granodiorite. The host rock has phaneritic and porphyritic textures and exhibits surface oxidation zones (Fig 1b). The rock masses are observed in the field studies as yellowish-brown in color and highly fractured in texture. Based on the field observations, the rock masses could be declared from slightly to moderately weathered, according to ISRM (2007). The blasted rock blocks are transported to the crushing – screening plant by trucks for aggregate production. The flow chart of the crushing – screening plant is given in Fig 2. In typical crushing – screening operations, rock blocks are initially scalped using a 70 mm grizzly feeder before first crushing. Then, rock materials above 70 mm are broken down by a jaw crusher whose dimensions are 1300 mm x 2400 mm. The CSS of the jaw crusher is 140 mm.

The crushed particles obtained from the jaw crusher are fed to the cone crusher. The CSS and throw of the cone crusher are 40 and 25 mm, respectively. Crushed materials above 63 mm are returned to the cone crusher, and particles between +5 –63 mm are directed to the VSI. Simultaneously, some of the scalped materials (+20 –38 mm) and those with +22 –33 mm are also fed and returned to the VSI, respectively (Fig 2).

Finally, crushed materials are sieved, and the products are obtained with different size fractions. Wet screening is adopted using water jet nozzles in the crushing – screening plant. Some scenes of the plant are given in Fig 3.



Figure 1. a) Overview of the study area b) Some of the host rocks processed in the crushing – screening plant

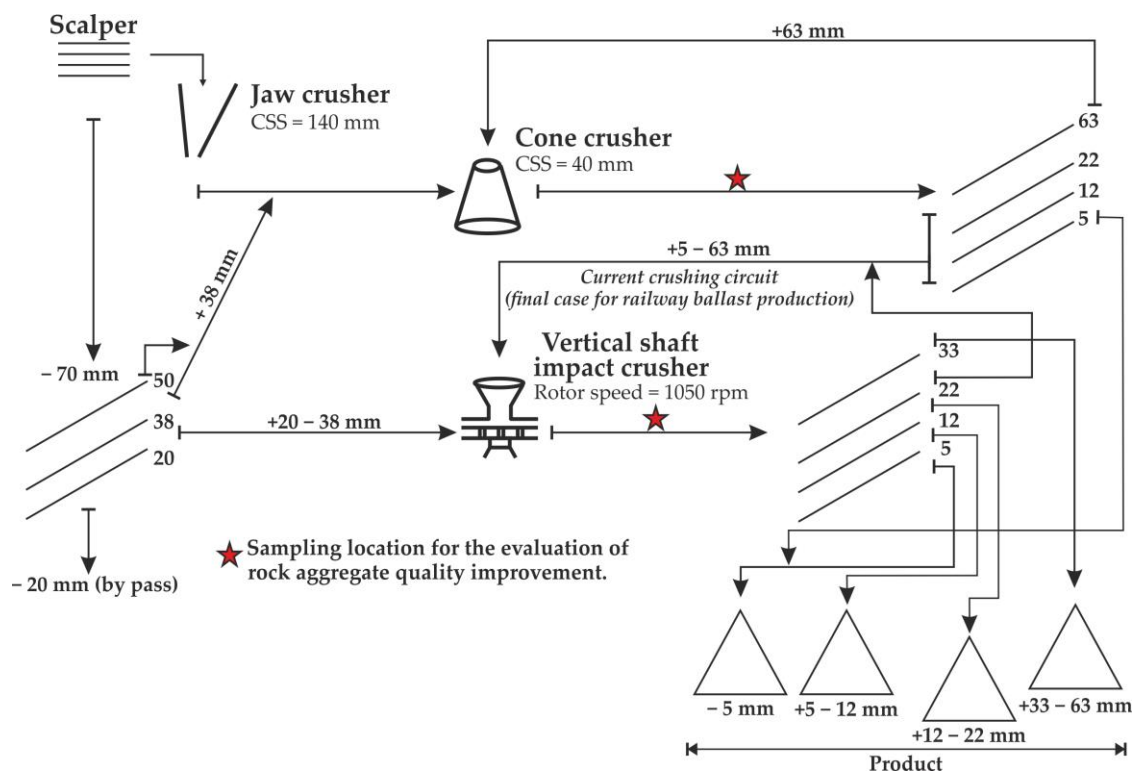
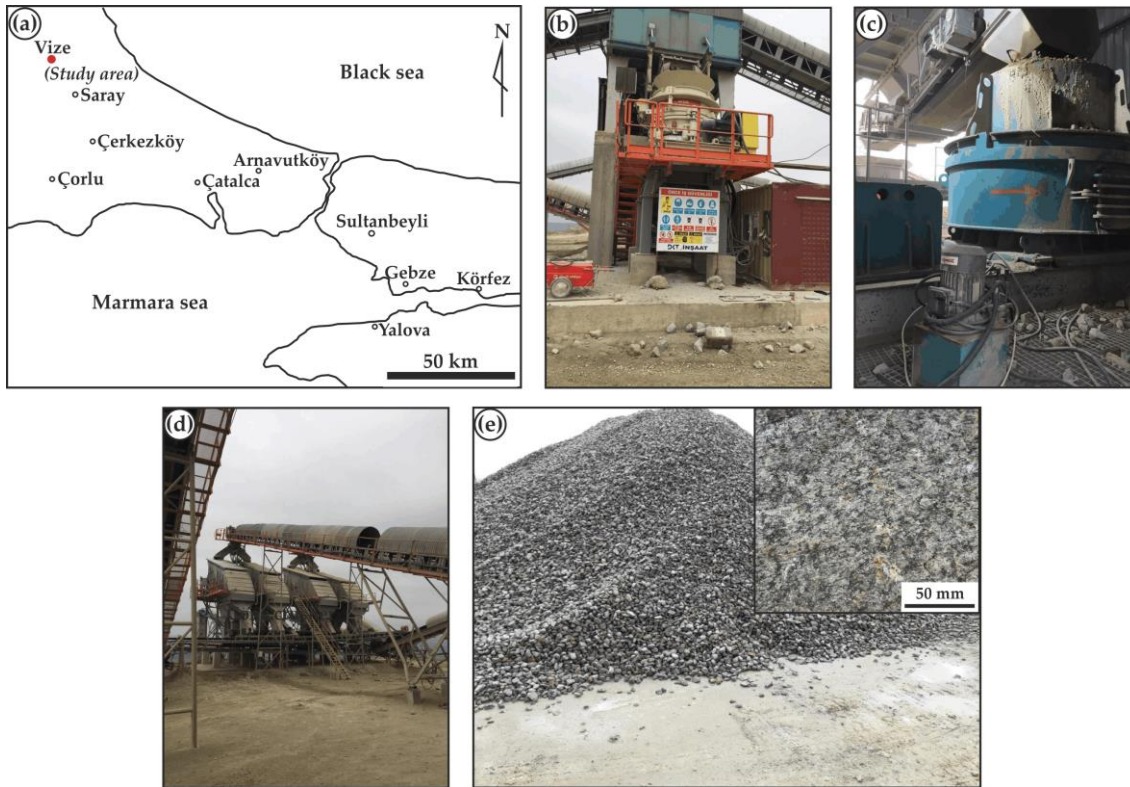


Figure 2. Flow chart of the crushing – screening plant.



**Figure 3.** Some scenes of the crushing screening plant considered in this study a) Location map of the plant b) Cone crusher c) Vertical shaft impact crusher d) Screens e) Railway ballast aggregates

## 2.2. Laboratory studies

Rock aggregate properties considered in the laboratory studies were water absorption ( $w_a$ , %), LAA, and flakiness index (FI, %). These aggregate properties were determined using products with particle size ranges of 5 – 12, 12 – 22, and 33 – 63 mm. The  $w_a$  was determined in accordance with BS EN 1097-6 (2013). The LAA and FI tests were also carried out following BS EN 1097-2 (2010) and BS EN 933-3 (2012), respectively.

The laboratory tests were performed under oven-dried conditions, and each test to determine the  $w_a$ , LAAV, and FI of products was performed five times for each size fraction. The average values obtained from the laboratory tests were presented as rock aggregate properties in this study. In addition, the measurements on aggregate gradation (i.e., coefficient of uniformity,  $c_u = d_{60}/d_{10}$ ) were also performed through sieve analyses, according to ASTM C136 / C136M (2019)

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Simulation of the crushing – screening plant

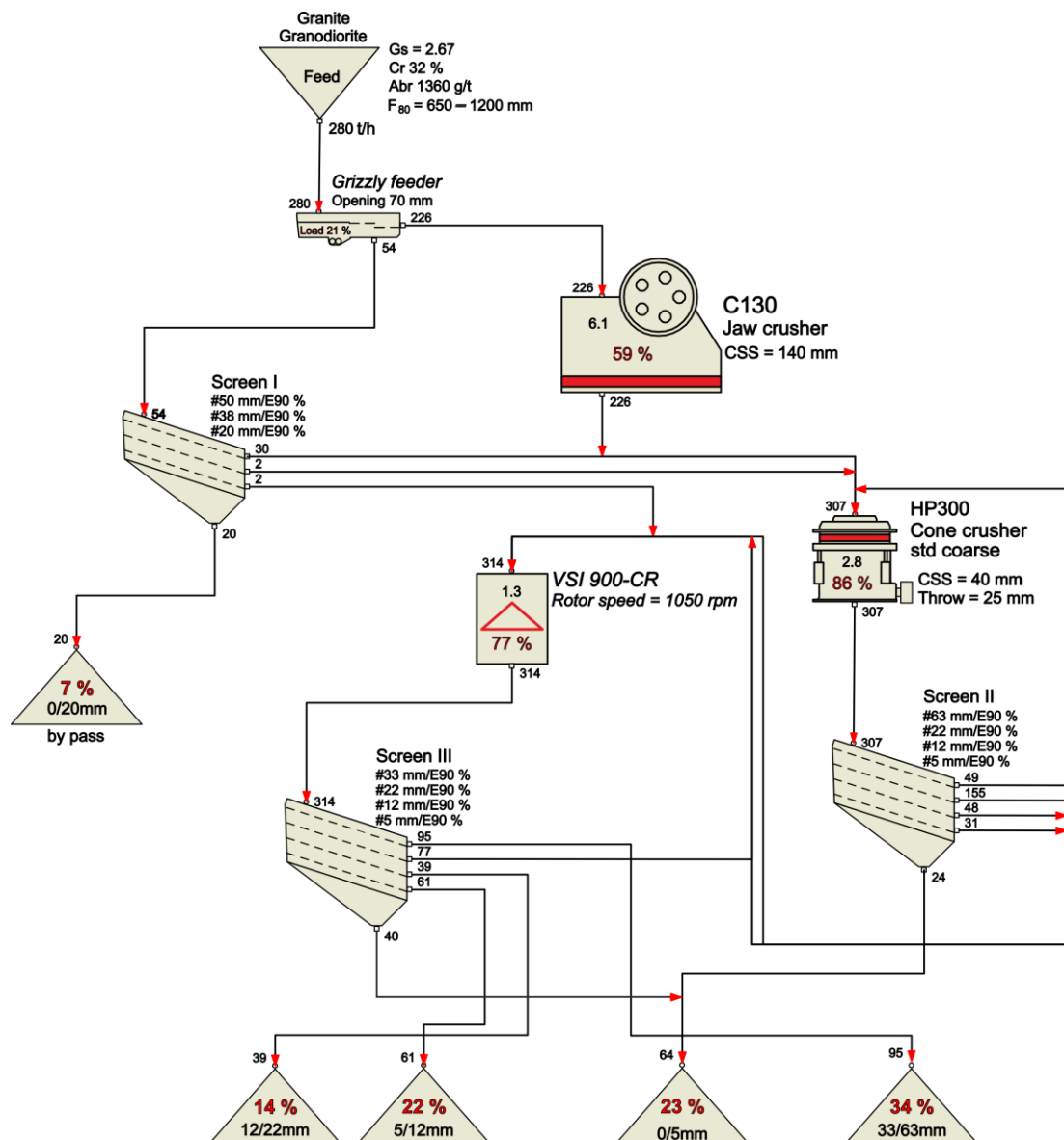
The crusher–screening plant was simulated using the software Bruno (v4.1.0.0). Based on the crusher–screening plant's current operating conditions, the simulations were carried out. The simulation results are presented as a flowchart in Fig 4.

Accordingly, the efficiency of the jaw, cone, and VSI-type crushers was found to be 59%, 86%, and 77%, respectively. For a typical crushing – screening shift, 200 – 300 tons of feeding materials were processed in the plant. In this regard, rock aggregates with four different size fractions were obtained. Production yields for –5, 5 – 12, 12 – 22, and 33 – 63 mm ranged from 14% to 34%. The waste material (bypass) passing through the scalp was about 7% of the total feed (Fig 4).

The size reduction ratio (SRR) for the jaw, cone, and VSI-type crushers were about 6.1, 2.8, and 1.3, respectively (Table 1). It should be noted that a significant part (23% of the total feed) of products was obtained below 5 mm due to crushing actions held by the closed rotor of the VSI, which is typical for industrial VSI-type crushers in Turkey. Significant quantities of fine products produced from VSI type crushers were also reported by Lindqvist (2008).

**Table 1.** Simulation results.

Crusher type	Size reduction ratio, SRR	Efficiency (%)	Product size (mm)	Production yield (%)
Jaw	6.1	59	0 – 5	23
Cone	2.8	86	5 – 12	22
VSI	1.3	77	12 – 22	14
			33 – 63	34

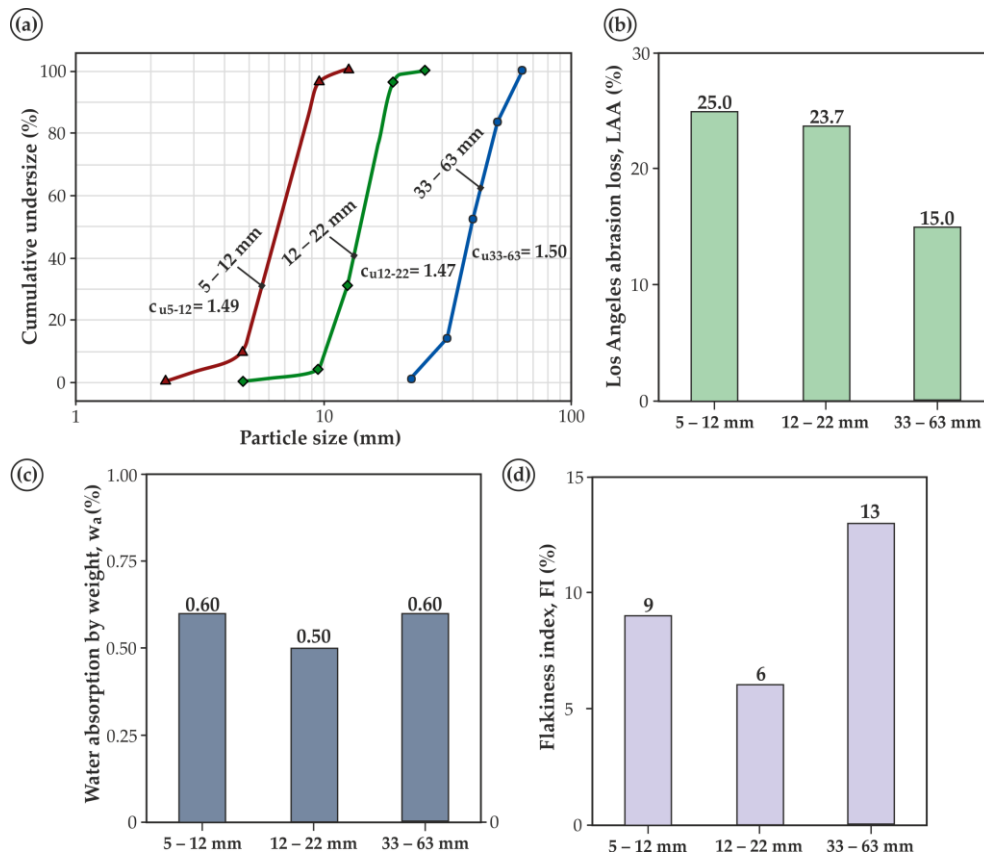


**Figure 4.** Simulation of the crushing – screening plant investigated in this study.

### 3.2. Aggregate properties of products

Based on different size fractions, aggregate properties determined in this study are given in Fig 5. The coefficient of uniformity ( $c_u = d_{60}/d_{10}$ ) of products varied from 1.47 to 1.50 (Fig 5a), showing the relative homogeneity of products. Such  $c_u$  values were also obtained by Ajamu and İge (2015) and Nduka *et al.* (2018). Before using these products for construction purposes, rock aggregates with different size fractions should be appropriately mixed to increase the  $c_u$  and, therefore, the packing density of concrete structures (Nanthagopalan and Santhanam 2012). Besides, aggregate gradation also influences the mechanical properties of aggregates, which is also essential in railway ballast layers (Xiao *et al.*, 2012).

The LAA of products decreased with increasing its size. It was found to be between 15% – 25% (Fig 5b). The  $w_a$  was around 0.5% – 0.6% (Fig 5c). Finally, the FI varied from 6% to 13% (Fig 5d). Based on the findings in Fig 5, it can be claimed that the treatment of aggregate production (Fig 2) is suitable to achieve products with satisfactory quality. The obtained LAA values of the products are reasonable and meet ASTM D692/D692M (2015) requirements for bituminous paving mixtures.



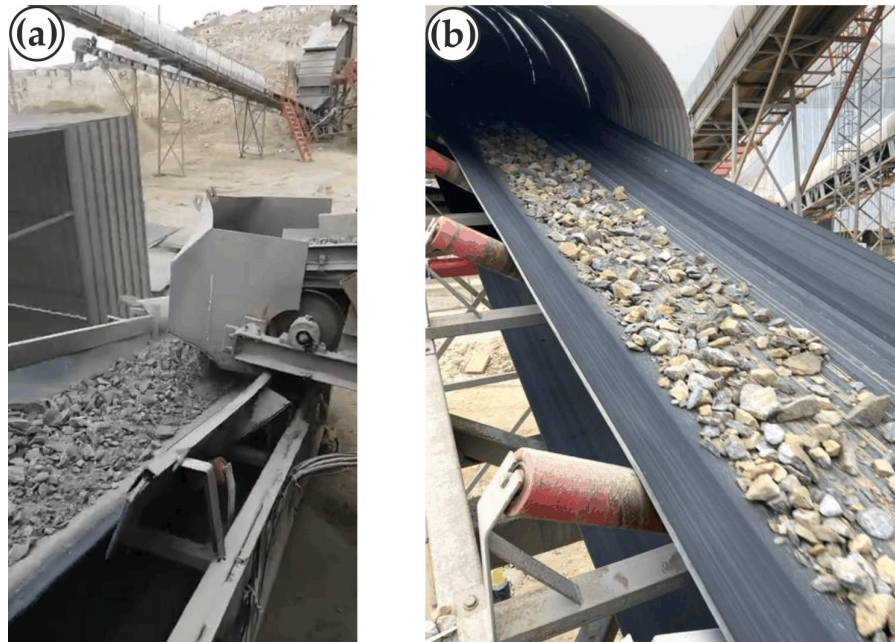
**Figure 5.** General features of the rock aggregates with different size fractions a) Particle size distribution b) LAA test results c)  $w_a$  test results d) FI test results

### 3.3. Applications on the improvement of rock aggregate quality

The quality of rock aggregates with a particle size range of 33 – 63 mm was investigated by focusing on the crushing circuit changes. Several crushing circuits were attempted, and one feasible procedure was presented in this study. In the early stages of the crushing circuit, the crushed materials processed from the cone crusher were sieved, and ballast aggregates with a particle size range of +33 –63 mm were obtained (Fig 6a). However, the FI and LAA of those were not within the limits of railway ballast specifications of Turkey (TS 7043 EN 13450, 2004).



The cone crusher products were then separated and gradually directed to the VSI based on different feed sizes. Systematic sampling was performed for laboratory testing in each case, where the LAA and FI values were determined. As a result of crushing circuit changes, the most feasible method for ballast aggregate production was based on the condition that crushed stones (+5 –63 mm) obtained from the cone crusher were directed to the VSI (Fig 6b).



**Figure 6.** Illustration of crushing circuit change a) Products obtained from the cone crusher (initial stage)  
b) crushed stones fed to the VSI (final case).

It was observed that the LAA enhanced thanks to the direction of selective products (+5 –63 mm) to the VSI, given as in Fig 2. Before changing the crushing circuit, the LAA for the specified size fraction was around 22%. After the explained procedure, the LAA was found to be around 15%, enhancing the ballast aggregate quality by 32%. The verification of this improvement was also cross-checked through the FI tests. Before and after the procedure, the FI of aggregates was around 20% and 13%, respectively. The improvement ratio in shape was 35% (Table 2).

**Table 2.** LAA values of ballast aggregates

Rock aggregates produced from the cone crusher (31.5 – 50.0 mm)		Rock aggregates produced from the vertical shaft impact crusher (31.5 – 50.0 mm)	
LAA (%)	Test date	LAA (%)	Test date
25.4	18.10.2020	14.1	21.12.2020
21.1	20.10.2020	15.5	22.12.2020
18.6	23.10.2020	13.6	25.12.2020
		16.8	
FI (%)	Test date	FI (%)	Test date
22.0		12.3	22.12.2020
18.1	18.10.2020	15.6	
18.4		11.0	25.12.2020
21.4	20.10.2020	14.5	

The improvement in product shape is in good agreement with the findings of Bengtsson and Evertsson (2006). It is also worth mentioning that the process of dynamic fragmentation for impact crushers exploits the presence of micro-fissures or discontinuities in/on rock aggregates (Djordjevic *et al.*, 2003). Hence the products obtained from impact crushers tend to be of good quality and present satisfactory shape properties. From this point of view, the combination of cone and VSI crushers can be declared a feasible choice for railway ballast aggregate production.

As a concluding remark, during the change in the crushing circuit, the rotor speed of the VSI was reduced to primarily prevent damages to linings, decrease fine material production, and provide optimal LAA for ballast aggregates. In this study, the pulley propelling the main shaft of the rotor was altered with the one with a lower diameter (26 cm). Under this condition, the rotor speed was around 1050 – 1075 rpm. With this modification, the rotor speed was reduced by 27%, improving the product quality. Last but not least, it should be reminded that in this study, selective drilling–blasting methods were not considered for the evaluation of rock aggregate quality. However, it can be beneficial to consider it in further studies. In this way, the feasibility of selective drilling–blasting should be revealed whether it would be either technically or financially reasonable. The rock aggregate quality improvement or optimization of aggregate production should also be investigated through soft computing tools, increasing the number of independent variables during crushing circuits.

#### 4. CONCLUSIONS

Rock aggregate production is hard work that requires high-quality equipment, sensibility, and work experience. Several attempts have been made to diminish operating costs and enhance product quality from different points of view regarding crushing- screening plants. In this study, a crushing – screening plant in Vize, Kırklareli – Turkey, was considered to investigate rock aggregate quality due to several crushing circuits.

The flow chart of the plant was established and simulated concerning the operating features (Fig 4). Some of the aggregate properties were determined for specific size fractions (Fig 5). Several crushing circuits were attempted to observe the possible changes in ballast aggregate quality. As a result of full-scale crushing tests, it was observed that a notable improvement in ballast aggregate quality is reached by changing the crushing circuit.

Using a VSI-type crusher, the railway ballast aggregate quality was improved in terms of their abrasion resistance and shape properties (Table 2). Therefore, it can be claimed that the modifications in crushing circuits may be a reasonable way to improve rock aggregate quality. In this way, natural resources could be used effectively in the building and construction sectors. Before crushing operations, selective drilling–blasting methods should also be attempted in the field studies. It is clear that with selective drilling–blasting, the initial cost of rock aggregates increases so thus the aggregate quality. The feasibility of this hypothesis should be investigated in future works.

#### *Compliance with ethical standards*

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

#### REFERENCES



- Ajamu, S.O. and Ige, J.A., 2015, "Influence of coarse aggregate types and mixing method of concrete made from natural aggregate", *International Journal of Engineering and Technology*, 5(7), 2049 – 3444.
- ASTM C136 / C136M ,2019, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", *ASTM International*
- ASTM D692/692M ,2015, "Standard specification for coarse aggregate for bituminous paving mixtures. ", *ASTM International*

- Bengtsson M. and Evertsson C.M., 2006, "Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers", *Minerals Engineering*, 19(15), 1479 – 1486.
- Bengtsson, M., 2009, "Quality-driven production of aggregates in crushing plants", Dissertation, *Chalmers University of Technology*.
- Briggs, C., & Evertsson, C. M., 1998, "Shape potential of rock.", *Minerals Engineering*, 11(2), 125–132.
- BS EN 933-3, 2012, "Tests for geometrical properties of aggregates: Determination of particle shape, Flakiness index", *British Standards Institution*, London
- BS EN 1097-2, 2010, "Tests for mechanical and physical properties of aggregates: methods for the determination of resistance to fragmentation. ", *British Standards Institution*, London
- BS EN 1097-6, 2013, "Tests for mechanical and physical properties of aggregates: determination of particle density and water absorption. " *British Standards Institution*, London
- Chen Z. Wang G. Xue D. and Bi Q., 2020, "Simulation and optimization of gyratory crusher performance based on the discrete element method", *Powder Technology*, 376, 93 – 103.
- Davoodi A., Asbjörnsson G., Hulthén E. and Evertsson M., 2019, "Application of the discrete element method to study the effects of stream characteristics on screening performance", *Minerals*, 9(12): 788.
- DeDiemar R., 1990, "New concepts in jaw crusher technology", *Minerals Engineering*, 3(1-2), 67 – 74.
- Djordjevic N., Shi F.N. and Morrison R.D., 2003, "Applying discrete element modelling to vertical and horizontal shaft impact crushers", *Minerals Engineering*, 16(10), 983 – 991.
- Duthoit, V., 2000, "Crushing and grinding aggregates", Chapter. 9, (Ed. Louis Primel and Claud Tourenq). Balkema, Rotterdam
- Eloranta, J., 1995, "Influence of crushing process variables on the product quality of crushed rock. ", Dissertation, *Tampere University of Technology*.
- Fladvad M. and Onnela T., 2020, "Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates", *Minerals Engineering*. 151: 106338.
- Guimaraes, M. S., Valdes, J. R., Palomino, A. M., & Santamarina, J.C., 2007, "Aggregate production, fines generation during rock crushing", *International Journal Mineral Processing*, 81(4), 237–247.
- Grunditz S., 2015, "Modeling and optimization of a vertical shaft impactor for production of artificial sand", Master Thesis, *Chalmers University of Technology*
- Hafeez I., Juniad F., Kamal M.A. and Hussain J., 2016, "Influence of single- and two-stage aggregate manufacturing mechanisms on asphalt mixture performance", *Journal Materials in Civil Engineering* 28(4), 04015180
- ISRM., 2007, "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing, and monitoring", 1974–2006. In: R. Ulusay, & J. A. Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. International Society of Rock Mechanics (ISRM), Ankara, Turkey.
- Kahraman S., Toraman O.Y., and Cayirli S., 2018, "Predicting the strength and brittleness of rocks from a crushability index", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1639 – 1645.
- Kamani M. and Ajalloeian R., 2020, "The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape", *Construction and Building Materials*, 230, 117016
- Kojovic, T., 1995, "Crushers: A quarry Australia special feature", *Quarry*, 26–34.
- Korman, T., Bedekovic, G., Kujundzic, T., & Kuhinek, D., 2015, "Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of jaw crusher", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(2): 461 – 475.
- Köken, E., and Özarlan, A., 2018, "New testing methodology for the quantification of rock crushability, compressive crushing value (CCV).", *International Journal of Mineral Metallurgy and Materials*, 25(11), 1227–1236
- Köken E., 2020, "Evaluation of size reduction process for rock aggregates in cone crusher", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 4933 – 4946
- Köken E., Top S. and Özarlan A., 2020, "Assessment of rock aggregate quality through the analytic hierarchy process (AHP)", *Geotechnical and Geological Engineering* 38, 5075 – 5096,

- Köken E. and Jili Q., 2020, "Comparison of secondary crushing operations through cone and horizontal shaft impact crushers", In: 20th *International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2020*, pp 789 – 796
- Lee E, Evertsson C.M., 2011, "A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences", *Minerals Engineering* 24:188–194.
- Lee E., 2012, "Optimization of compressive crushing", Dissertation, *Chalmers University of Technology*, Göteborg.
- Leiva, C. A., Arcos, K. V., Poblete, D. A., Serey, E. A., Torres, C. M., & Ghorbani, Y., 2018, "Design and evaluation of an expert system in a crushing plant." *Minerals*, 8(10), 469.
- Li H. McDowell G.R. and Lowndes I.S., 2014, Discrete element modelling of a rock cone crusher", *Powder Technology* 63, 151 – 158.
- Lindqvist M., 2008, "Energy considerations in compressive and impact crushing of rock", *Minerals Engineering*, 21(9), 631 – 641.
- Metso., 2018, "Basics in mineral processing handbook.", Metso Corporation.
- Nanthagopalan, P. and Santhanam, M., 2012, "An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete.", *Materials and Structures*, 45, 1167 – 1179.
- Nduka D.O., Fabgenle O.I. Joshua O., Ogunde A.O. and Omuh I.O., 2018, "Comparative analysis of concrete strength utilizing quarry-crushed and locally sourced coarse aggregates", *International Journal of Mechanical Engineering Technology, IJMET*, 9(1), 609 – 617
- Nikolov, S., 2004, "Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers.", *International Journal of Mineral Processing*, 74(10): 219–225.
- Quist J. and Evertsson C.M., 2016, "Cone crusher modelling and simulation using DEM", *Minerals Engineering*, 85: 92 – 105.
- Rahimdel M.J. and Ataei M., 2014, "Application of analytical hierarchy process to selection of primary crusher", *International Journal of Mining Science and Technology*, 24: 519 – 523.
- Rajan B. and Singh D., 2017, "Understanding influence of crushers on shape characteristics of fine aggregates based on digital image and conventional techniques", *Construction and Building Materials*, 150: 833 – 843.
- Rajan B. and Singh D., 2020, "Investigation on effects of different crushing stages on morphology of coarse and fine aggregates", *International Journal of Pavement Engineering* 21(2), 177 –195.
- Svensson, A.; Steer, J.F., 1990, "New cone crusher technology and developments in comminution circuits.", *Minerals Engineering*, 3, 83–103.
- Tavares L.M. and Da Silveria M.A.C.W., 2008, "Comparison of measures of rock crushability", In *Fine Particle Technology and Characterization*, (Meftuni Yekeler Eds), ISBN: 978-81-308-0241-1
- TS 7043 EN 13450, 2004, "Aggregates for railway ballast", *Turkish Standards Institution*, Ankara
- Ulsen, C., Tseng, E., Angulo, S. C., Landmann, M., Contessotto, R., Balbo, J. T., Kahn, H., 2019, "Concrete aggregate properties crushed by jaw and impact secondary crushing.", *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 494–502.
- Xiao Y., Tutumluer E., Qian Y. and Siekmeier J.A., 2012, "Gradation effects influencing mechanical properties of aggregate base–granular subbase materials in Minnesota", *Transportation Research Record*, 2267(1): 14 – 26



## RESEARCHING THE EFFECTS OF SOCIO-DEMOGRAPHIC VARIABLES ON THE ETHICAL ATTITUDE LEVEL OF GEOMATICS ENGINEERING STUDENTS

<sup>1</sup>Şaban İNAM , <sup>2</sup>Halil Burak AKDENİZ   
<sup>1</sup>sinam@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>hbakdeniz@ktun.edu.tr

*Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Geomatics Engineering, Konya, TURKEY*

(Geliş/Received: 21.09.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.11.2021)

**ABSTRACT:** The importance of ethical behaviour has increased gradually in today's business life, and people who are unaware of ethical rules and requirements are not preferred by employers, customers and employees has been observed. For this purpose, the course of engineering ethics (professional ethics) was put into the syllabus as compulsory for geomatics engineering students undergraduate and graduate education programs in Turkey by Higher Education Council in order to teach ethic principals and professional responsibility and to gain the ability to query professional dilemmas. This study was planned to examine the engineering ethics attitude levels of geomatics engineering students taking the professional ethics course, and to determine the effect of socio-demographic variables on the attitude levels of engineering ethics. The sample of the study consisted of 224 students who voluntarily participated in the survey. In the research, Engineering Ethics Scale and Socio-Demographic Data Collection Form consisting of 21 items were used. In the analysis of the data, number / percentage analysis, Shapiro Wilk, Mann Whitney U, Kruskal Wallis and Mann Whitney U tests with Bonferroni correction were used. Significance level was accepted as 0.05 in statistical analysis. In the study, it was determined that the students who took the professional ethics course had high engineering ethics attitude levels, and there was a statistically significant relationship between the variables of gender, age and socio-economic status and engineering ethics attitude levels.

**Key Words:** Engineering ethics, Socio-demographic variables, Engineering education, Ethical values

### Sosyo-Demografik Değişkenlerin Harita Mühendisliği Öğrencilerinin Etik Tutum Düzeyine Etkilerinin Araştırılması

**ÖZ:** Günümüz iş hayatında etik davranışların önemi giderek artmış; etik kurallar ve gerekliliklerin bilincinde olmayan kişilerin işverenler, müşteriler ve çalışanlar tarafından tercih edilmediği anlaşılmaktadır. Bu amaçla, Yükseköğretim Kurumu tarafından Türkiye’de harita mühendisliği lisans ve lisansüstü eğitim programlarındaki öğrencilere mühendislik etiği (mesleki etik) dersi zorunlu okutulurken, öğrencinin “etik ilkeleri, mesleki sorumluluğu öğrenmesi ve mesleki ikilemleri sorgulaması yeteneğini kazanması” hedeflenmiştir. Bu çalışma, mesleki etik dersini alan harita mühendisliği öğrencilerinin mühendislik etiği tutum düzeylerini incelemek, sosyo-demografik değişkenlerin mühendislik etiği tutum düzeylerine olan etkisini belirlemek amacıyla planlanmıştır. Çalışmanın örneklemini, ankete gönüllü katılan 224 öğrenci oluşturmuştur. Araştırmada, 21 maddeden oluşan Mühendislik Etiği Ölçeği ve Sosyo-Demografik Veri Toplama Formu kullanılmıştır. Verilerin analizinde; sayı/yüzde analizi, Shapiro Wilk, Mann Whitney U, Kruskal Wallis ve Bonferroni düzeltilmeli Mann Whitney U testlerinden yararlanılmıştır. İstatistiksel analizlerde anlamlılık düzeyi 0.05 olarak kabul edilmiştir. Araştırmada, mesleki etik dersini alan öğrencilerin mühendislik etiği tutum düzeylerinin yüksek olduğu, cinsiyet, yaş ve sosyo-ekonomik

durum değişkenleri ile mühendislik etiği tutum düzeyleri arasında istatistiki olarak anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mühendislik etiği, Sosyo-demografik değişkenler, Mühendislik eğitimi, Etik değerler

## 1. INTRODUCTION

Ethics is a concept that takes place in all areas of social life and is used with care from our daily work to the highest levels of management. The concept of ethics, appearing at every stage of social life, is a compass for the individual and indicates the directions of the road or route; however, it leaves the issue of which way to go to the interests and discretion of individuals (İnam and Akdeniz, 2020). Ethics with a different approach, was developed for the purpose of theorizing and is a relationship between thought and action. The information transferred to the individual through ethics is not only theoretical, but also 'action-generating' information that is transferred to practice through behaviours and exists only in practice (Pieper, 1999).

The professional ethical codes that direct the behaviours in working life are professional principles that direct members of a particular profession, force them to act within certain rules when necessary and limit their personal tendencies, exclude inadequate or unprincipled members from the profession, regulate professional competition and protect their professional ideals (Milli Eğitim Bakanlığı, 2006). One of the most important features of professional ethics, which takes its source from universal ethical values, is that it emphasizes that individuals who perform the same profession in the international arena should act in accordance with these codes of conduct. The emergence of the ethical codes of a profession and their adoption by those who do that profession is a fundamental step towards the professionalization of that profession, the recognition of the autonomy of the profession and the profession's privilege of self-control (Colby and Sullivan, 2008). International professional organizations and some national unions have created their own codes of professional ethics within the framework of universal professional ethical values. One of these codes of professional ethics is engineering ethics. The first written principles of engineering ethics in historical process, were put forward by the American Society for Engineering Education (ASEE) in 1912 and were accepted by other professional chambers over the years (Griggs, 1997). On October 5, 1977, "Code of Ethics for Engineers" was announced by the National Society of Professional Engineers. As in all the world, identified the principles of engineering ethics in Turkey, it has been decisive in the development of chambers, and Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (UCTEA) set forth in the principle foundation engineering ethics has released the 'Professional Conduct Policies' in 2003. With UCTEA's revealing the principal foundations of engineering ethics, all affiliated chamber organizations representing different engineering fields have determined their own situations accordingly (Taluğ *et al.*, 2015).

Human beings, who are not a moral being by their creation, must be educated and educated in behaviour. Lack of knowledge, which is among the reasons for individuals to resort to unethical means, can only be eliminated with well-organized educational studies (İnayet, 2002). There is a mutual interaction between the acquisition of ethical values and education. Individuals should be educated in order to understand engineering ethics correctly and to have a right say in discussions on ethics (Eroğlu *et al.*, 2019). Technological developments and social events have revealed that ethics in engineering education should be handled more consciously. As a requirement of this, non-governmental organizations at national and international level:

- Suggestion of the Chamber of Survey and Cadastre Engineers (CSCE) affiliated to UCTEA,
- The views of the International Federation of Surveyors (FIG) that "The ethical values and behaviours that those who carry out the cartography profession should have should be given through formal education and vocational training" (FIG, 2002),
- US Engineering and Technology Equivalency Agency's EC2000 Criteria for Engineering Programs (ABET, 2005),
- Accreditation and evaluation studies to be carried out according to contribute to enhancing the

quality of engineering education of the Association for Evaluation and Accreditation of Engineers Programs (MÜDEK),

- Accreditation studies to be carried out according to the equivalence criteria of the European Engineering Programs and Graduates Equivalency Project EUR-ACE. (Deniz et al., 2005).

in line with, "the necessity of ethics education" was the subject of their studies. With the belief that this ethics education is necessary, the engineering/professional ethics course curriculum was created and added to the Geomatics Engineering department curriculum of universities in Turkey. Engineering ethics course should be ensured that students who will start their professional life after university will gain "understanding of universal ethical rules and values, learning the principles of engineering ethics and professional responsibility, and the ability to question professional dilemmas". As a result of the this course; individuals will be evolved who have developed the ability of free and scientific thinking and evaluation, have reached the maturity to make their decisions without any influence, do not see themselves outside of society, question the events, are sceptical in the sense of science and are free from prejudices, are aware of their responsibilities and can express themselves (Gençoğlu, 2008). In this education process, there is a need for "education programs that aim at social expectations and periodic recycling determinations of these programs" that are in an approach that takes into account the values such as customs, traditions and family education that the individual has acquired from the past.

Studies have been conducted to determine the "effect of socio-demographic variables on the ethical attitude and behaviour of the student", and it has been determined that socio-demographic variables affect the ethical attitude and behaviour of the student (Ruegger and King, 1992; Galbraith and Stephenson, 1993; Ameen et al., 1996; Dawson, 1997; Fritzche, 1997; Knotts et al., 2000, Adkins and Radtke, 2004; Kutlu, 2008; Alkan, 2015; Akkaya, 2016; Küçük et al., 2017; Aykan et al., 2019). Although professional ethics is an important concept for professions in the field of science, in the literature review, it was seen that although many studies have been done in the field of social sciences and health sciences, there are not enough studies in the field of science. For this purpose, the engineering ethics attitude levels of the students of the geomatics engineering department who took the professional ethics course were determined, whether these levels differ according to socio-demographic variables was tried to determine.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Purpose of the Study

The aim of this study is to examine the engineering ethics attitude levels of the students of the geomatics engineering department who take the professional ethics course and to determine the effect of socio-demographic variables on the engineering ethics attitude levels.

### 2.2. Study Design and Sample

The sample calculation required for the study was made using the G-POWER 3.1 Statistical Analysis Program. In this program, the sample size was calculated based on the non-parametric T-test with a significance level of 0.05, power of 80% and a medium effect size of 0.50 and was determined as 128. The course of Professional Ethics is given as a 2-hour compulsory course per week in the 8th semester in the Geomatics Engineering Curriculum and aims to "make students gain written and verbal communication skills by evaluating the problems encountered in professional and ethical responsibility awareness on economic, political and legal grounds". In this context, the relevant lesson first makes 'theoretical evaluations on the basis of the basic approaches of engineering ethics' to the student; afterwards, it is performed in the form of 'opening the discussion of possible events that the student may encounter in his / her professional life by scripting'. The sample of the study composed 224 participants are aged 18 and over who are students in the Department of Geomatics Engineering of Konya Technical University "participating in the course of professional ethics during the semester, grasping universal ethical rules and values, learning the professional responsibility and ethical principles of engineering

ethics and geomatics engineering, gaining the ability to question *and evaluate professional dilemmas based on these and voluntarily participating in the study*". The study was carried out between the dates 01.06.2020-18.07.2020.

### 2.3. Data Collection Tools

In the study, "*Engineering Ethics Scale*" was used to measure students' attitudes towards engineering ethics, and "*Demographic Data Collection Form*" was used to obtain personal information about students. The internet address of the data collection form was sent to the e-mail addresses of the students who accepted to participate in the study, and they were asked to fill in the form in digital environment.

**Demographic Data Collection Form:** This form was based on the literature and consists six questions. The questions in the form include the socio-demographic characteristics of the students (gender, age, high school from which they graduated, place of residence for the longest time, family type and socio-economic level).

**Engineering Ethics Scale:** The scale developed by İnam and Akdeniz (2020) consists of 21 items. Scale consists of two sub-dimensions: individual responsibilities (items 1-15, 20-21) and social responsibilities (items 16-19). This 21-item scale was scored according to the five-point Likert type: 1 = Completely Ethical, 2 = Partially Ethical, 3 = Unsure, 4 = Partially Unethical, 5 = Completely Unethical. The total score that can be obtained on this scale varies between 21 and 105 points; It has been determined that as the score obtained from the scale increases, the positive attitude towards engineering ethics also increases. Items 9, 16, 17, 18, and 19 of the scale are scored reversely. The validity and reliability study of the scale was conducted by İnam and Akdeniz (2020), and the Cronbach Alpha value was 0.93, and the test-retest reliability was 0.86. The Cronbach Alpha coefficient of the scale in this study was 0.88, the explained variance ratio was 44.55, the KMO value was 0.880 as a result of the KMO and Barlett test, and the Barlett value was 1886.934.

### 2.4. Data Analysis

IBM SPSS Statistics 22.0 Program was used for the analysis of the research data. Number and percentage calculations were made in the analysis of descriptive data. Whether the data showed a normal distribution was examined using the Shapiro Wilk Test (Althouse *et al.*, 1998). The null hypothesis to be established for this test is that the data series obtained from a sample belongs to a society with a normal distribution (Arslan *et al.*, 2020). The value of test statistics results lies between zero and one. Small values of this test lead to the rejection of normality whereas a value of one indicates normality of the data (Razali and Wah, 2011). The Mann Whitney U test is used to compare differences of non-normally distributed parameters between groups when there are two groups in the comparison of quantitative data (Bildirici, 2014). In the study, the Mann Whitney U test was used to determine whether the total score averages of the engineering ethics scale differ according to gender and age variables of the geomatics engineering students. Kruskal Wallis test is used to compare differences non-normally distributed parameters between groups when there are more than two groups in comparison of quantitative data (Vargha and Delaney, 1998). In the study, Kruskal Wallis test was used to determine whether the total score averages of the engineering ethics scale differ according to the variables of which high school type, the longest residence place, family type and socio-economic level. The origin of the difference between variables was determined by using Bonferroni-corrected Mann Whitney U Test (Eral and Vehid, 2013). In statistical analysis, the results were evaluated at 95% confidence interval and the level of significance was accepted as  $p < 0.05$ .

Research hypotheses;

H<sub>1</sub>: There is a significant difference between the gender of the students and their attitude towards engineering ethics.

H<sub>2</sub>: There is a significant difference between the students' age and their attitude to engineering ethics.

H<sub>3</sub>: There is a significant difference between the type of high school students graduated from and their



attitude towards engineering ethics.

H4: There is a significant difference between the place where students reside for the longest time and their engineering ethics attitude.

H5: There is a significant difference between students' family structure and engineering ethics.

H6: There is a significant difference between the socio-economic status of students and their attitude to engineering ethics.

### 3. RESULTS

Results regarding the socio-demographic characteristics of the students participating in the study are shown in Table 1.

**Table 1.** Demographic Variables

	Frequency (n)	Rate (%)
<b>Gender</b>		
<input type="checkbox"/> Female	82	36.6
<input type="checkbox"/> Male	142	63.4
<b>Age</b>		
<input type="checkbox"/> 21-30	219	97.8
<input type="checkbox"/> 31 and over	5	2.2
<b>High School Type</b>		
<input type="checkbox"/> Anatolian High School	166	74.1
<input type="checkbox"/> Anatolian Religious Vocational High School	7	3.1
<input type="checkbox"/> Science High School	14	6.3
<input type="checkbox"/> Vocational and Technical Anatolian High School	12	5.3
<input type="checkbox"/> Private High School	25	11.2
<b>The Longest Residence Place</b>		
<input type="checkbox"/> Village	14	6.3
<input type="checkbox"/> Town	5	2.2
<input type="checkbox"/> District	66	29.4
<input type="checkbox"/> City	139	62.1
<b>Family Type</b>		
<input type="checkbox"/> Nuclear Family	177	79.0
<input type="checkbox"/> Extended Family	34	15.2
<input type="checkbox"/> Broken Family	11	4.9
<input type="checkbox"/> Other	2	0.9
<b>Socio-economic Level</b>		
<input type="checkbox"/> Income less than Expense	26	11.6
<input type="checkbox"/> Equal Income and Expense	174	77.7
<input type="checkbox"/> Income more than Expense	24	10.7
<b>TOTAL</b>	<b>224</b>	<b>%100</b>

When Table 1 is examined, 63.4% of the students participating in the study are male students. The majority of the students participating in the survey (97.8%) are between the ages of 21-30. Among the participants, the number of students who graduated from Anatolian High School the most (74.1%) stands out. 62.1% of the students lived in the city centre, 29.4% in the district centre, 6.3% in the village and 2.2% in the town / town for the longest time. When the family structure of the students was examined, it was determined that 79% of them had nuclear family structure. It is seen that 77.7% of students' income levels are equal in income-expense balance.

Table 2 shows the minimum, maximum and average scores obtained by the geomatics engineering

students participating in the study from the total and sub-dimensions of the engineering ethics scale.

**Table 2.** The mean scores of students regarding attitude levels to engineering ethics (n = 224)

	Limits of Minimum and Maximum Scores	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation
<b>Engineering Ethics Scale (EES)</b>	21-105	47	105	93.90	9.56
<b>Individual Responsibilities Sub-Dimension</b>	17-85	28	85	74.82	9.17
<b>Social Responsibilities Sub-Dimension</b>	4-20	12	20	19.08	1.37

When Table 2 is examined, the total score average of the students in the engineering ethics scale was 93.90, the individual responsibilities sub-dimension average score average was 74.82, and the social responsibilities sub-dimension mean score was found to be 19.08.

Table 3 shows the effects of the socio-demographic characteristics on attitudes of participants towards engineering ethics.

As Table 3 is examined, a statistically significant difference was found between the gender and age of geomatics engineering students and the total and individual responsibilities sub-dimension mean scores of the engineering ethics scale ( $p < 0.005$ ).

As a result of the Kruskal Wallis Test, where socio-demographic variables such as the high school where the students graduated, the longest residence, family structure and socio-economic status were analysed, there is no significant difference between the mean scores of the high school where the students graduated, the longest residence and family structure variables and engineering ethics attitude and individual responsibilities / social responsibilities sub-dimensions ( $p > 0.05$ ). A statistically significant difference was found between the socio-economic status of the geomatics engineering department students and the engineering ethics scale total and individual responsibilities sub-dimension mean scores ( $p < 0.05$ ). The measurement which the difference in the socio-economic status of the students originated was determined by using the Bonferroni Corrected Mann Whitney U Test. Since there are three pairs of comparisons in the analysis, the accepted significance level ( $p = 0.05$ ) should be divided by three to determine the new level of significance. The new significance level is 0.016. As a result of the engineering ethics scale test, a statistically significant difference was found according to the socio-economic status between students whose income is less than expenses and students whose income is equal to expenses ( $p = 0.007$ ). Similarly, as a result of the individual responsibilities sub-dimension test, a statistically significant difference was found according to the socio-economic status between students whose income is less than expenses and students whose income is equal to their expenses ( $p = 0.005$ ).

**Table 3.** The effect of students' socio-demographic characteristics on engineering ethics scale average scores

Descriptive Features		Engineering Ethics Scale (EES)	Individual Responsibilities Sub-Dimension	Social Responsibilities Sub-Dimension
Gender	Female	96.20±8.14	76.90±8.00	19.29±1.02
	Male	92.57±10.09	73.62±9.60	18.95±1.53
	<b>U</b> <b>p</b>	4074.000 <b>0.000*</b>	4087.000 <b>0.000*</b>	5236.000 0.166
Age	21-30	93.73±9.60	74.66±9.20	19.07±1.38
	30 and over	101.40±2.30	82.00±2.00	19.40±0.89
	<b>U</b> <b>p</b>	161.000 <b>0.007*</b>	148.000 <b>0.005*</b>	501.000 0.720
High School Type	Science High School	92.29±7.25	74.35±5.77	17.93±2.27
	Anatolian High School	94.17±9.61	75.07±9.19	19.10±1.26
	Vocational and Technical Anatolian High School	89.08±13.19	69.50±13.31	19.58±0.67
	Anatolian Religious Vocational High School	95.85±3.34	76.86±3.18	19.00±1.29
	Private High School	94.72±9.42	75.40±9.11	19.32±1.49
	<b>X<sup>2</sup><sub>KW</sub></b> <b>df</b> <b>p</b>	6.187 4 0.186	5.918 4 0.205	9.023 4 0.061
	The Longest Residence Place	Village	92.07±10.31	72.85±10.44
Town		86.20±17.66	66.20±17.66	20.00±1.00
District		95.32±5.88	76.27±5.38	19.05±1.32
City		93.68±10.43	74.64±9.94	19.04±1.45
<b>X<sup>2</sup><sub>KW</sub></b> <b>df</b> <b>p</b>		2.399 3 0.494	3.191 3 0.363	3.783 3 0.286
Family Type	Nuclear Family	94.03±9.33	74.97±8.89	19.06±1.39
	Extended Family	93.47±11.59	74.15±11.44	19.32±1.07
	Broken Family	94.09±7.34	75.45±6.35	18.64±1.86
	Other	88.50±4.95	69.50±6.36	19.00±1.41
	<b>X<sup>2</sup><sub>KW</sub></b> <b>df</b> <b>p</b>	2.524 3 0.471	2.293 3 0.514	1.437 3 0.697
Socio-economic Level	Income less than expense	90.31±11.37	71.38±10.70	18.92±1.41
	Equal Income and Expense	94.34±9.76	75.88±9.39	19.05±1.43
	Income more than Expense	94.58±3.63	75.12±3.57	19.45±0.78
	<b>X<sup>2</sup><sub>KW</sub></b> <b>df</b> <b>p</b>	8.896 2 <b>0.012*</b>	10.017 2 <b>0.007*</b>	1.330 2 0.514

*U: mann whitney u test; X<sup>2</sup><sub>KW</sub>: kruskal wallis chi-square; df: degree of freedom; p<0.05*

#### 4. DISCUSSION

This study puts forth the engineering ethics attitude levels and effect of socio-demographic variables on this attitude of the geomatics engineering students who take professional ethics course. When the mean scores of the students participating in the study are examined; It was determined that the students' level of participation in judgments towards engineering ethics attitude was high (Average = 93.90).

H1: When the hypothesis "There is a significant difference between the gender of the students and their attitude to engineering ethics" was tested, a statistically significant difference was found ( $p < 0.05$ ). In this case, the H1 hypothesis is accepted. It has been observed that female participants in the survey are more sensitive than male students in terms of professional life and social value judgments. When the literature is examined, it is emphasized that women have higher ethical attitudes than men (Poorsoltan et al., 1991; Borkowski and Ugras, 1992; Ruegger and King, 1992; Galbraith and Stephenson, 1993; Knotts et al., 2000, West et al., (2004)). In another study Cohen et al., (1998), It has been found that there is a significant relationship between gender and ethical decision-making skills that women are more sensitive to ethical issues than men (cited in Özyer and Azizoğlu, 2010). In a study by Daştan (2009), it was found that female participants were more tend to engaging in ethical behaviour, and there was a significant relationship between gender and ethical decisions. In different studies conducted by Güney (2018), Üzümlü and Sivrikaya (2018), it was found that there is a significant difference between gender and ethical values in favour of female students. In this context, the H1 hypothesis analysis result is in line with the other research results.

H2: The hypothesis "There is a significant difference between the students' age and their attitude on engineering ethics" was found to be statistically significant ( $p < 0.05$ ) and the H<sub>2</sub> hypothesis was accepted. The students at the age of 30 and over participating in the research were more conscious and more mature / selective in their value judgments, and it has been determined that they give priority to engineering ethics values. This situation is thought to be due to the more objective approaches of adults aged 30 and over to life and expectations compared to younger people. As a matter of fact, when the literature is reviewed, it is pointed out that there is a positive relationship between age and ethical attitude. According to Serwinek (1992), Dawson (1997) and Fritzsche (1997), age has an absolute effect on a person's ethical attitude. Longenecker *et al.* (1989) found that young people can be more arbitrary on ethical issues. Çobanoğlu *et al.* (2005) and Ural (2003) revealed that age factor positively affects behaviour and in accordance with ethical principles and older people tend to behave ethically more. Adkins and Radtke (2004) found that older students at schools approach things more ethically than younger ones.

H<sub>3</sub>: "There is a significant difference between the type of high school the students graduated from and the attitude of engineering ethics" was not found statistically significant ( $p > 0.05$ ) and the H<sub>3</sub> hypothesis was rejected. Since the students who participated in the survey graduated from secondary education institutions (Science High School / Anatolian High School / Private High School) with an education standard above the average and reached the university with a certain social basic values saturation, the total score average of engineering ethics was close. In the study conducted by Akkaya (2016) using "accounting professional ethics scale", no significant difference was found between the type of high school students graduated from and their perceptions of professional ethics.

H<sub>4</sub>: The hypothesis "There is a significant difference between the place of residence of the students for the longest time and the attitude of engineering ethics" was not found statistically significant ( $p > 0.05$ ) and the H<sub>4</sub> hypothesis was rejected. It has been determined that the place of residence is not an important factor in professional ethics and social life sensitivities, and that the person approaches ethical values within their vital principles. According to the studies conducted by Üzümlü and Sivrikaya (2018) and Alkan (2015), no significant difference was found between students' level of inclination towards ethical values and their residence status. In another study by Sakar and Aybek (2018), it was observed that students' perceptions of their ethical rights and responsibilities did not differ significantly according to the place of residence.

H<sub>5</sub>: When the hypothesis "There is a significant difference between the students' family structure and engineering ethics" hypothesis was tested, no statistically significant difference was found ( $p > 0.05$ ) and the H<sub>5</sub> hypothesis was rejected. Although it is generally accepted that students who grow up in a regular

family *environment* will be more sensitive in their approach to engineering ethics, It has been determined that the students have an awareness of their expectations from the engineering profession and *"the more they adhere to ethical values, the higher their success and motivation will increase"*. As a matter of fact, in a study conducted by Aykan *et al.* (2019), no statistically significant difference was found between students' family types and their ethical sensitivity. However, in the study conducted by Küçük *et al.* (2017), it was found that the family structure made a significant difference in the ethical decision-making levels of the students, and it was determined that the students with nuclear family structure had higher mean scores.

H<sub>6</sub>: The hypothesis *"There is a significant difference between the socio-economic status of the students and their attitude on engineering ethics"* was found significant ( $p < 0.05$ ) and the H<sub>6</sub> hypothesis was accepted. As a result of the *advanced* analysis, it was determined that the difference between the groups was *"caused by the students whose income is less than the expense"*. In the analysis of socio-economic variables, although it is seen that students generally believe in the principles and necessity of engineering ethics, it has been accepted that students whose income is equal to or more than expenses exhibit more comfortable / self-confident behaviour in the social life process is also accepted in the engineering ethics approach. In the literature, it is emphasized that low economic level may affect ethical attitude negatively. As a matter of fact, in the study conducted by Çavuşoğlu and Kutluk (2016), a significant difference was detected between students' perceptions of accounting professional ethics and their income levels, and it was observed that 'students with higher income have stronger values in ethical behaviour'. Çınar ve Güney (2012) concluded that adherence to professional ethical principles increases in direct proportion to income level. Kutlu (2008) concluded that 'employees with lower monthly income experience more ethical dilemmas in their professional lives'.

## 5. CONCLUSION

It is considered that students who graduate from the undergraduate geomatics engineering department *will* work together with other related disciplines in the public and private sector, on technical infrastructure and superstructure, geodetic measurement and location determination processes, topographic and thematic map production, spatial database formation and Geographic Information System (GIS) applications, urban and rural area design, cadastre / land development / expropriation / real estate valuation, it is very important for these students to acquire behavioural maturity towards engineering ethics and the ability to evaluate-questioning from different perspectives through education. As a requirement of this, the professional / engineering ethics course is put as a compulsory course in the last semester of the curriculum in the geomatics engineering departments by the Council of Higher Education. Although the achievements of the professional ethics course are important for all professional disciplines, it has a particular importance due to the nature and working conditions of the geomatics engineering profession. Because a geomatics engineer has interactive responsibilities in technical, economic and sociological issues to the society and the natural environment, managers, employers, customers and colleagues. For this reason, geomatics engineering students education as individuals with high ethical awareness through education in the undergraduate education process, will increase the quality of the geomatics engineering profession and the sense of belonging / ownership among its members and will enable the training of qualified professionals and will be the guarantee of the reputation of engineers.

This study, within this significance, has applied to a university geomatics engineering department students in *Turkey* to evaluate acquisitions for the future from the current situation of the students and to determine the effect of students' socio-demographic variables on engineering ethics. According to the findings, it is thought that the results may differ if this research is applied to students studying in the geomatics engineering department of different countries / societies of different universities. In addition, in order to develop this study, it is recommended to make a comparison and demonstrate the effectiveness of the results by applying it on different population characteristics on university students who take and do not take the course of professional ethics.

## 6. LIMITATIONS

This *limitation* of the study is an implementation on geomatics engineering students in a state university in a specific region in Turkey.

**Ethics approval:** Approval was obtained from The Scientific Research and Publication Ethics Committee of Konya Technical University (Approval Number: 2020-04/01). The procedures used in this study adhere to the tenets of the *Declaration of Helsinki*.

## REFERENCES

- Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET), 2005, "Criteria for accrediting engineering programs", *ABET Inc, USA*, <https://www.abet.org/>, ziyaret tarihi: 08.09.2020.
- Adkins, N., Radtke R.R., 2004, "Students' and faculty Members' perceptions of the importance of business ethics and accounting ethics education: Is there an expectations gap?", *Journal of Business Ethics*, 51(3), 279–300.
- Akkaya, G., 2016, "Muhasebe mesleğinde meslek etiği: Meslek yüksekokullarında muhasebe dersi alan öğrenciler tarafından algılanması üzerine bir araştırma", *V. Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu*, Prizren, 18-20 Mayıs 2016.
- Alkan, G.İ., 2015, "Muhasebe eğitiminde etik: Ön lisans öğrencilerinin etik algılarına yönelik bir araştırma", *Business and Economics Research Journal*, 6(2), 113-125.
- Althouse, L.A., Ware, W.B., Ferron, J.M., 1998, "Detecting departures from normality: A Monte Carlo simulation of a new omnibus test based on moments", Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Diego/ABD.
- Ameen, E.C., Guffey, D.M., McMillan, J.J., 1996, "Gender differences in determining the ethical sensitivity of future accounting professionals", *Journal of Business Ethics*, 15(5), 591-597.
- Arslan, A.K., Tunç, Z., Çolak, C., 2020, "Normal dağılıma uygunluğu değerlendirmek için açık kaynak web tabanlı yazılım: normal dağılımı inceleme yazılımı", *Fırat Tıp Dergisi*, 25(2).
- Aykan, E.B., Fidancı, B.E., Yıldız, D., 2019, "Hemşirelik öğrencilerinde ahlaki olgunluk ve etik duyarlılığın değerlendirilmesi", *Sağlık Bilimleri Üniversitesi Hemşirelik Dergisi*, 1(2), 84-91.
- Bildirici, F., 2014, "Özel eğitime gereksinimi olan çocuğa sahip ailelerde aile yükü ile psikolojik dayanıklılık arasındaki ilişki", *Yüksek Lisans Tezi*, Haliç Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Borkowski S.C., Ugras, Y.J., 1992, "The ethical attitudes of students as a function of age, sex and experience", *Journal of Business Ethics*, 11(12), 961–979.
- Cohen, J.R., Pant, L.W., Sharp, D.J., 1998, "The effect of gender and academic discipline diversity on the ethical evaluations, ethical intentions and ethical orientation of potential public accounting recruits", *Accounting Horizons*, 12(3), 250–270.
- Colby, A., Sullivan, W.M., 2008, "Ethics teaching in undergraduate engineering education", *Journal of Engineering Education*, 97(3), 327-338.
- Çavuşoğlu, K., Kutluk, F., 2016, "Meslek yüksekokulunda muhasebe dersi alan öğrencilerin muhasebe etiğine bakış açılarının tespitine yönelik bir araştırma: Anamur MYO örneği", *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 8(2), 109-120.
- Çınar, O., Güney, S., 2012, "Serbest muhasebeci mali müşavirlerin (SMMM) etik algıları: Erzurum örneği", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(2), 91-106.
- Çobanoğlu, N., Haberal B., Çağlar, S., 2005, "Tıbbi araştırma ve yayın konusunda etik duyarlılık araştırması", *Türk Tıp Dergisi, Sağlık Bilimlerinde Süreli Yayıncılık*, 101–130.
- Daştan, A., 2009, "Etik eğitiminin muhasebe eğitimindeki yeri ve önemi: Türkiye değerlendirilmesi", *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(1), 281- 311.
- Dawson, M.L., 1997, "Ethical differences between men and women in the sales profession", *Journal of Business Ethics*, 16(11), 1143–1152.
- Deniz, R., İpbüker, C., Göksel, Ç., 2005, "Mühendislik etiği dersi niçin zorunlu olarak okutulmalıdır?",

- TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 28 Mart-1 Nisan 2005.
- Eral, G., Vehid, H.E., 2013, "Nicel verilerin yer aldığı bağımsız ve bağımlı gruplarda uygulanan istatistiksel yöntemler, *Çocuk Dergisi*, 13(4), 138-140.
- Eroğlu, M., Göksel, Ç., Güney C., 2019, "Yeni kavramlar, yeni teknolojiler ve mühendislik etiği 2.0", *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara, 25-27 Nisan 2019.
- Fritzche, D.J., 1997, "*Business ethics: a global and managerial perspective*", McGraw Hill International Editions, Boston/ABD.
- Galbraith, S., Stephenson, H.B., 1993, "Decision rules used by male and female business students in making ethical value judgement: another look", *Journal of Business Ethics*, 12(3), 227-233.
- Gençoğlu, T.M., 2008, "Mühendislikte etik", *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Ankara Şubesi Haber Bülteni*, 5(1), 26-31.
- Griggs Jr, F.E., 1997, "To be or not to be-ethical that is!..", *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 123(2), 82-89.
- Güney, C., 2018, "Muhasebe meslek mensubu adaylarının mesleki etik algısı üzerine bir araştırma:Gazanfer Bilge Meslek Yüksekokulu örneği", *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 17(65), 295-316.
- İnam, Ş., Akdeniz, H.B., 2020, "Harita mühendisleri özelinde mühendislik etiği ölçeğinin geçerlilik ve güvenilirlik analizi üzerine bir çalışma", *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 46(1), 13-28.
- İnayet, A., 2002, "*Yönelimsel Mesleki ve Örgütsel Etik*", Pegem A Yayıncılık, 3.Baskı, İstanbul/Türkiye.
- International Federation of Surveyors (FIG), 2002, "*Mutual Recognition of Professional Qualifications*", FIG Publications, Frederiksberg/Denmark.
- Knotts, T.L., Lopes, T.B., Mesak, H.I., 2000, "Ethical judgements of college students: an empirical analysis", *Journal of Education for Business*, 75(3), 158-163.
- Kutlu, H., 2008, "Muhasebe Meslek Mensupları ve çalışanlarının etik ikilemleri: Kars ve Erzurum illerinde bir araştırma", *Ankara Üniversitesi SBF Dergisi*, 63(2), 143-170.
- Küçük, S., Uysal, N., Çakırer Çalbayram, N., Kahriman, İ., Altundağ, S., Gönenç, İ., 2017, "Hemşirelik öğrencilerinin etik karar verme düzeyleri ve etkileyen faktörlerin belirlenmesi", *ACU Sağlık Bilimleri Dergisi*, 157-162.
- Longenecker, J.G., McKinney, J.A., Moore, C.W., 1989, "Egoism and independence: entrepreneurial ethics", *Organizational Dynamics*, 16(3), 64-72.
- Milli Eğitim Bakanlığı, 2006, "*Meslek etiği*", MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), Ankara/Türkiye.
- National Society of Professional Engineers, 1977, "Code of ethics for engineers", <https://www.nspe.org/resources/ethics/code-ethics>, ziyaret tarihi: 31.10.2021.
- Özyer, K., Azizoğlu, Ö., 2010, "Demografik değişkenlerin kişilerin etik tutumları üzerindeki etkileri", *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 6(2), 59-84.
- Pieper, A., 1999, "*Etiğe giriş*", Çevirmen: Veysel Atayman, Gönül Sezer, Ayrıntı Yayınları, İstanbul/Türkiye.
- Poorsoltan, K., Amin, S.G., Tootonchi, A., 1991, "Business ethics: views of future leaders", *SAM Advanced Management Journal*, 56(1), 4-9.
- Razali, N.M., Wah, Y.B., 2011, "Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests", *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.
- Ruegger, D., King, E.W., 1992, "A study of the effect of age and gender upon student business ethics", *Journal of Business Ethics*, 11(3), 179-186.
- Sakar, N., Aybek, B., 2018, "Lise öğrencilerinin etik hak ve sorumluluklarına ilişkin algılarının çeşitli değişkenlere göre incelenmesi", *Scientific Educational Studies*, 2(2), 111-128.
- Serwinek, P.J., 1992, "Demographics and related in ethical views among small businesses", *Journal of Bioethics*, 11, 555-566.

- Taluğ, C., Kanber, H., Yalım Y., 2015, "Türkiye'de mühendislik eğitimi", *Türkiye Biyoetik Dergisi*, 2(3), 202-212.
- Ural, T., 2003, "İşletme ve pazarlama etiği", Detay Yayıncılık, Ankara/Türkiye.
- Üzüm, B., Özkurt Sivrikaya, S., 2018, "Meslek yüksekokulu öğrencilerinin etik değerlere yatkınlık düzeyleri (Kocaeli MYO örneği)", *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi (IBAD)*, 3(1), 230-240.
- Vargha, A., Delaney, H.D., 1998, "The Kruskal Wallis test and stochastic homogeneity", *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 23(2), 170-192.
- West, T., Ravenscroft, S.P., Shrader, C.B., 2004, "Cheating and moral judgment in the college classroom: a natural experiment", *Journal of Business Ethics*, 54(2), 173-183.





## BALIKESİR İLİ ERDEK İLÇESİ İÇİN BAĞIMSIZ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİNİN FİZİBİLİTE ÇALIŞMASI VE EKONOMİK ANALİZİ

<sup>1</sup>Aykut Fatih GÜVEN , <sup>2</sup>Mertcan Kubilay METE 

<sup>1,2</sup>Yalova University, Engineering Faculty, Energy System Engineering Department, Yalova, TURKEY  
<sup>1</sup>mertcankubilaymete@gmail.com, <sup>2</sup>afatih.guven@yalova.edu.tr

(Geliş/Received: 03.08.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.11.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada Balıkesir'in Erdek ilçesinin 2020 yılı aylık elektrik tüketim değerlerini karşılamak amacı ile oluşturulabilecek en optimum şebeke bağlantısız hibrit enerji sistemi tasarımı HOMER programında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı ise fosil yakıtların tükenmesi ile artan maliyetleri ve çevreye verdikleri zararlardan ötürü seçilen bölgenin daha ucuz ve temiz olan yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi eldesini sağlamaktır. Bölgenin enerji ihtiyacını karşılayacak en optimum sistem arayışında farklı senaryolar oluşturulup analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoları oluşturan sistem bileşenleri ise güneş paneli, rüzgar türbini, batarya, dönüştürücü, yakıt pili, Elektrolizör, hidrojen tankı, dizel ve biyogaz jeneratörü olmaktadır. Oluşturulan farklı senaryolar arasındaki fark kullanılan jeneratör tiplerinden kaynaklanmaktadır. Oluşturulan senaryoların optimizasyon sonuçları arasında yapılan analizler sonucunda şebeke bağlantısız Güneş paneli /Rüzgar türbini/Dizel Jeneratör/Batarya sisteminin 165 milyon \$ net bugünkü maliyet ve 0,109 \$ birim enerji maliyeti ile en uygun sistem olduğu ortaya koyulmaktadır. Şebeke bağlantısız Güneş paneli/Rüzgar türbini/Dizel Jeneratör/Batarya sisteminin her ne kadar diğer sistemlere göre daha yüksek emisyon değerleri olsa da bu değerler kabul edilebilir düzeyde olmaktadır. Hem istenilen maliyet değerlerini hem de istenilen çevreci yaklaşım açısından en optimum sistem tasarımını temsil etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik tüketimi, hibrit enerji sistem, HOMER, maliyet analizi, yenilenebilir enerji

### Feasibility Study and Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Balıkesir Province Erdek

**ABSTRACT:** In this study, the most optimal off-grid hybrid energy system design that can be created in order to meet the monthly electricity consumption values of Balıkesir's Erdek district for 2020 was carried out in the HOMER program. The aim of this study is to obtain electrical energy from cheaper and cleaner renewable energy sources in the selected region due to the increasing costs and environmental damage caused by the depletion of fossil fuels. Different scenarios were created and analyzed in search of the most optimal system to meet the energy needs of the region. System components that make up these scenarios are solar panel, wind turbine, battery, converter, fuel cell, electrolyzer, hydrogen tank, diesel and biogas generator. The difference between the different scenarios created is due to the generator types used. As a result of the analyzes made between the optimization results of the scenarios created, it is revealed that the off-grid Solar panel /Wind turbine/Diesel Generator/Battery system is the most suitable system with a net current cost of 165 million \$ and a unit energy cost of 0.109 \$. Although the Solar panel/Wind turbine/Diesel Generator/Battery system off-grid connection has higher emission values than other systems, these values are at an acceptable level. It represents the most optimum system design in terms of both the desired cost values and the desired environmentalist approach.

**Key Words:** Electricity consumption, hybrid energy system, HOMER, cost analysis, renewable energy

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her geçen yıl artan dünya nüfusu ve teknolojinin hayatın her alanına entegre edilmesi ile birlikte yıllık enerji ihtiyacında artışlar görülmektedir. Bilindiği üzere enerji üretimi ilk olarak fosil yakıt kaynaklarının kullanıldığı sistemler ile yapılmıştır. Her geçen yıl artan enerji talebi ile birlikte de fosil yakıt kaynaklarının kullanımı artırılmıştır. Fosil yakıtların tükenebilir olması ve her geçen yıl daha fazla popülerite kazanmaları fiyatlarının da artmasına sebep olmuştur. Gerçekleşen fiyat artışları ile doğru orantılı olarak birim enerji maliyeti de yükselmiştir. Bu yükselmeler ve yüksek enerji talebi maddi açıdan zararlara sebebiyet vermiştir.

Bu zararlı durumun önüne geçmek adına ülkeler enerji politikalarında değişikliklere giderek yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmaya başlamıştır. Bu sayede üretilen enerjinin maliyeti düşmüş, çevreye verilen zararların azaltılması sağlanmıştır. 2020 yılı itibarıyla Almanya elektrik üretiminin %23'lük bölümü güneş enerjisinden sağlamaktadır. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından derlenen verilere göre Almanya'da 2020 yılı sonunda, 7,55 Teravat-saat (TWh) elektrik üretimi gerçekleşirken, bu üretimde güneş enerjisi santrallerinin payı 1,74 TWh'dır. Almanya'da 2019 yılında 1,05 TWh'lık bölümü güneş enerjisi kaynaklı olmak üzere, 10,63 TWh Elektrik üretimi gerçekleşmiştir (enerjigazetesi.ist, 2021). Almanya'nın yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %50.5 ve 247,01 TWh değerlerindedir. Üretimde rüzgâr enerjisinin payı %27, biyokütlenin %11.6, hidroelektriğin ise %4 değerlerindedir (ise.fraunhofer.de, 2021). Ayrıca bu üretimde nükleer enerji santralleri %16.2, kömürlü termik santraller %18.4 ve doğal gaz santrallerinin payı %10'dur. Almanya aldığı yeni kararlarla 2022'de öngörülen güneş enerjisi kapasitesini 1,9 GW'tan 6 GW'a çıkarmayı hedeflemektedir (Temizenerji.org, 2021).

2020 yılı ilk dokuz ayı sonunda Türkiye toplam kurulu gücü 93,2 GW seviyelerine ulaşmıştır. İlk dokuz ay içerisinde 1,912 megavat (MW) civarında gerçekleşen kurulu güç artışı yenilenebilir kaynaklardan elektrik üreten santrallerden meydana gelmiştir. 1,263 MW'lık kurulu güç artışı hidroelektrik santrallerinden sağlanmış, toplam artışın 374 MW'lık kısmı rüzgâr enerjisi santrallerinden (RES), 237 MW'lık kısmı ise güneş enerjisi santrallerinden (GES) kaynaklanmıştır. İlgili dönemde doğal gaz ve çok yakıtlılar kullanarak elektrik üreten santrallerin net toplam kurulu gücü 291 MW azalmıştır. Türkiye'nin Almanya'ya göre çok daha yüksek potansiyelini kullanması durumunda yüksek üretim sağlanabileceği görülmektedir (tsk.com.tr, 2021). Güneş enerjisinin yanı sıra Türkiye'nin Ege ve Marmara bölgelerinde de rüzgâr enerjisinden Elektrik enerji üretimi de gerçekleştirilmektedir (Tabak, 2021).

Güneş ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yapan sistemler ayrı ayrı kullanıldıkları gibi birlikte de kullanılmaları durumunda Hibrit Enerji Sistemi adı verilen sistemleri oluşturmaktadırlar. Bu sistemler kullanılan bir kaynağın veriminin düşmesi durumunda ihtiyacın diğer kaynaktan sağlanması ile sistemin veriminin düşmemesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Balıkesir'in Erdek ilçesinin 2020 yılındaki elektrik tüketim istatistiklerine bakılarak bölgenin enerji ihtiyacının karşılanması için şebeke bağlantısız Güneş Paneli/Rüzgâr Türbini/Jeneratör/Batarya hibrit enerji sistemi tasarımı HOMER programında gerçekleştirilmiştir. Tasarım senaryolarında kullanılan jeneratör bileşeninin 3 farklı türü olan dizel, biyogaz ve yakıt pili kullanılarak sonuçlar irdelenmiştir. Sonuç olarak, maliyet açısından ve çevreci yaklaşıma en uygun sistem tasarımı elde edilmiştir.

## MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Projenin uygulanacağı yer olarak seçilen yer Türkiye'nin Marmara Bölgesinde bulunan Balıkesir ili Erdek ((40°23.9' N 27°47.5' E) ilçesidir. Yapılan araştırmalar ve alınan veriler 35.000 nüfuslu bir ilçe için yapılmıştır. Yük olarak belirlenen Erdek ilçesinin tüketim değerleri Uludağ Elektrik Dağıtım A.Ş. (UEDAŞ)'nin 2020 yılı sonunda gerçekleştirdiği analiz raporlarından elde edilmiştir. Çizelge 1'de analizler sonucu elde edilen aylık enerji tüketim değerleri görülmektedir. Bu veriler kullanılarak yapılan

hesaplamalar sonucunda bölgenin günlük enerji ihtiyacı 208.171,27 kWh, günlük tepe değeri ise 34.807,11 kW'dır. HOMER programına önceden tanımlanmış ticari tip yük profili seçilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

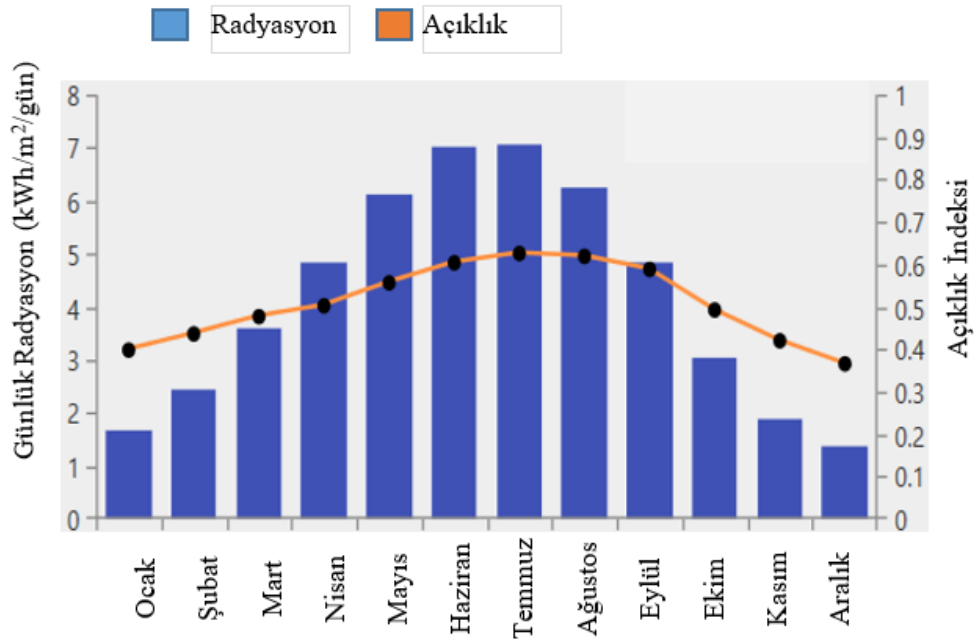
**Çizelge 1.** Erdek ilçesi ortalama elektrik enerjisi tüketim değerleri

*Table 2. . Average electrical energy consumption values of Erdek district*

Tarih	Tüketim (kWh)	Tarih	Tüketim(kWh)
01/2020	6.094.516,38	07/2020	8.134.237,44
02/2020	5.363.467,69	08/2020	9.441.486,41
03/2020	5.186.179,35	09/2020	7.406.112,21
04/2020	4.342.727,23	10/2020	6.679.949,20
05/2020	5.200.203,43	11/2020	5.653.133,68
06/2020	5.422.260,96	12/2020	7.058.241,91

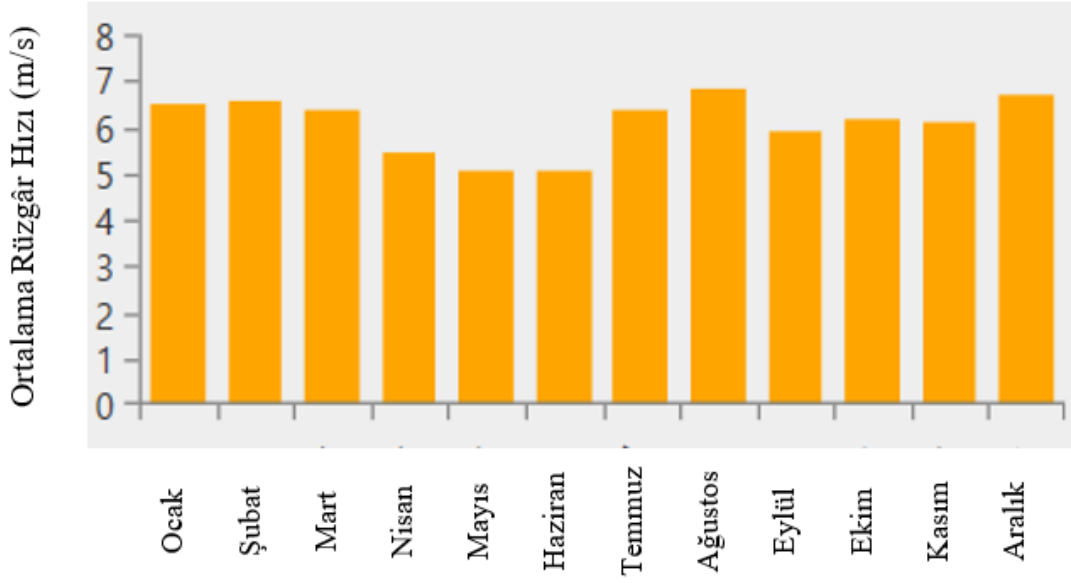
Güneş enerjisinden elektrik üretimi yapacak olan güneş panellerinin üretebileceği enerji miktarı bölgenin meteorolojik verileri ile doğrudan ilgilidir. Bölgenin solar enerji verileri HOMER programına entegre edilmiş olan NASA'nın veri tabanından alınmaktadır. Şekil 1'de de görüldüğü gibi bölgenin ortalama solar enerji potansiyeli yaz aylarında daha fazla kış aylarında ise yaz aylarına göre daha azdır. Bununla birlikte ortalama günlük solar enerji potansiyeli 4,17 kWh/m<sup>2</sup> /gün olarak belirlenmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin yatırım maliyetleri çok yüksek olduğundan kurulmadan önce bölgenin rüzgâr hızı profili iyi değerlendirilmelidir. Bölgenin ortalama rüzgâr hızı profili, güneş enerjisi potansiyelinde olduğu gibi NASA'nın veri tabanından alınmış ve ortalama rüzgâr hızı 6,08 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Kış aylarında solar enerjinin yetersiz kalabileceği durumlarda rüzgâr enerjisinin bu eksikleri tamamlayıcı enerji kaynağı olacağı ve ikisinin birbirini tamamlayacağı aşikardır. Bu özelliklerinden dolayı da hibrit sistemlerde en çok tercih edilen enerji kaynaklarıdır. Bölgenin rüzgâr hızı profili de Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Bölgenin aylık ortalama solar radyasyon (kWh/m<sup>2</sup>/gün) profili

*Figure 1. Monthly average solar radiation (kWh / m<sup>2</sup> / day) profile of the region*



Şekil 2. Bölgenin aylık ortalama rüzgâr hızı (m/s) profili

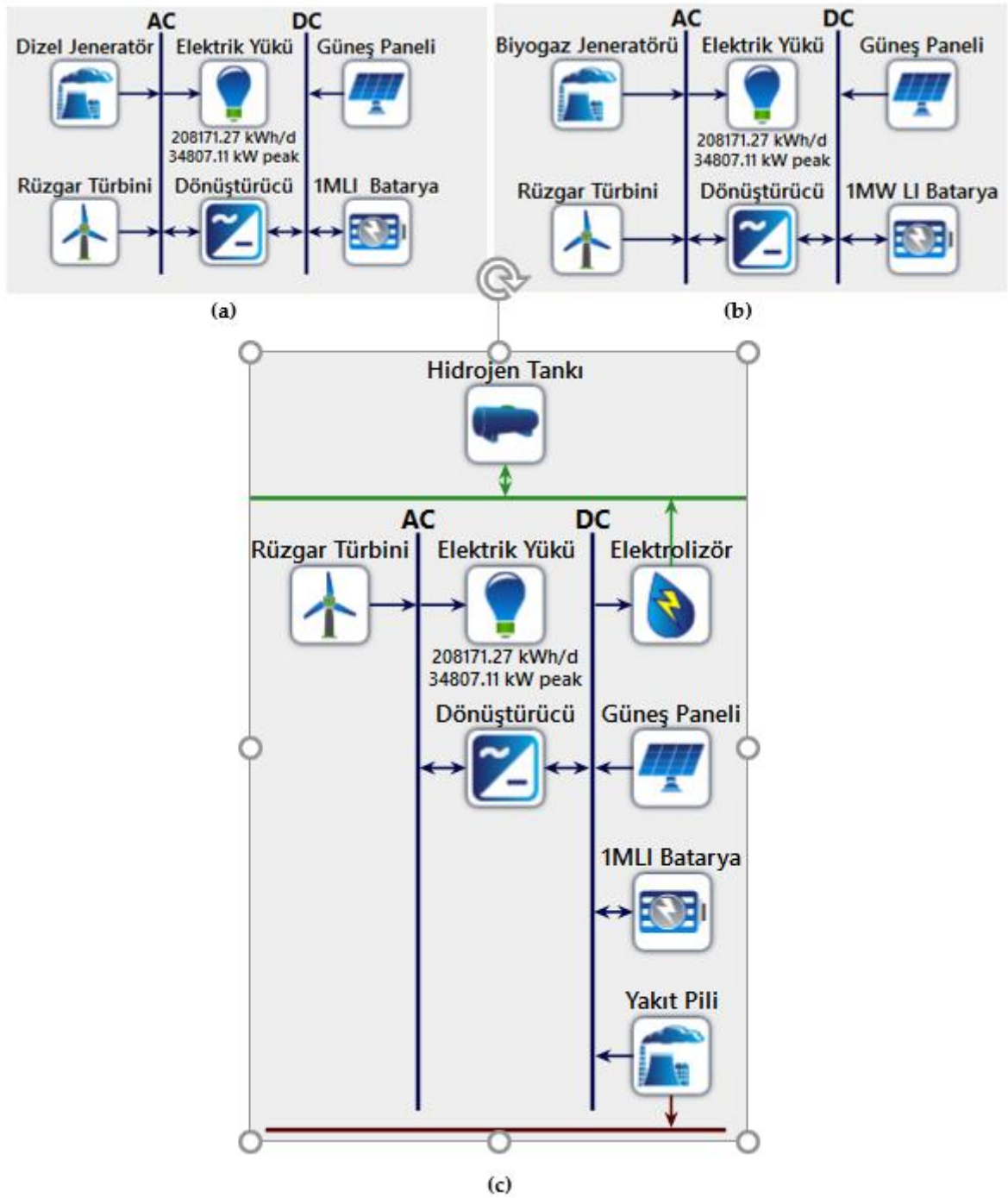
Figure 2. Monthly average wind speed (m / s) profile of the region

#### HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables)

Homer, mikro güç optimizasyonu modeli NREL(National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmiş, mikro güç sistemlerinin tasarımı ve farklı güç sağlayıcılarının değişik kombinasyonları ile en uygun bütçeli sistemin bulunmasını sağlayan programdır (Yılmaz ve diğ., 2010). Homer, dünyanın en gelişmiş mikro-şebeke modelleme yazılımıdır. Sistemlerin fiziksel davranışlarını, işleme maliyeti ve kurma maliyeti toplamı olan yaşam boyu maliyeti ve enerji birim maliyetini farklı kombinasyonlar için bulunmaktadır (Okedu ve Uhumwangho, 2014). Genellikle elektrik üretimi için kullanılsa da ısı üretimi uygulamaları da vardır. Enerji depolamalı/depolamasız, şebekeye bağlantılı/bağlantısız modelleri ayrı incelenebilir. HOMER programı yardımıyla dünyanın farklı yerlerinde çeşitli hibrit enerji sistem modelleri geliştirilir ve bu modeller sayesinde ilgili coğrafik bölge için en uygun maliyetli hibrit enerji sistemi elde edilir. Bunu yaparken de kendi içerisinde bulundurduğu farklı hassasiyet analizleri sonucunda da olası durumlarda hangi hibrit enerji sisteminin daha uygulanabilir olduğuna dair bilgileri bizlere sunmaktadır. HOMER programı, talep ve arz arasında optimum durumu sağlamak için yüzlerce verileri uzun saatler sürebilecek simülasyonları gerçekleştirebilir.

#### Hibrit Sistemin Bileşenleri (Components of the Hybrid System)

Hibrit sistemin temel bileşenleri Güneş panelleri, rüzgar türbini, dizel jeneratör, biyogaz jeneratörü, yakıt pili, invertörler ve bataryalar oluşturmaktadır. Evirici, gücün yönüne bağlı olarak elektrik gücünü AA(Alternatif Akım) veya DA(Doğru Akım)'dan dönüştürmek içindir. Sistemin AA bir akıma ihtiyacı vardır ve pilin de şarj olması için DA'ya ihtiyacı vardır. Bu güç kontrolünü ve dönüşümü optimize etmek için inverter eklenir. Dizel jeneratör ve biyogaz Jeneratörü, yakıt pili ve diğer tüm bileşenlerde enerji üretim verimliliği düşük olduğu zaman devreye girmektedir. Bütün bu bileşenler sisteme entegre edilmiş ve Homer programında simülasyonları elde edilmiştir. Şekil 3 (a)-(b)-(c)'de sistemin farklı senaryolara ait Homer şematik diyagramı verilmiştir.



**Şekil 3. (a)** Rüzgâr türbini/güneş paneli/dizel jeneratör/batarya/ **(b)** Rüzgâr türbini/güneş paneli/biyogaz jeneratör/batarya/ modeli **(c)** Rüzgâr türbini/güneş paneli/yakıt pili/batarya/ modeli

*Figure 3. (a) Wind turbine / solar panel / diesel generator / battery / (b) Wind turbine / solar panel / biogas generator / battery / model (c) Wind turbine / solar panel / fuel cell / battery / model*

### Güneş Paneli (Solar panel)

Güneş panelleri, güneş ışınlarının üzerlerine düşmesi ile elektrik üretimi gerçekleştiren ve hareketli parçalarının olmamasından dolayı düşük maliyete sahip sistemlerdir. Türkiye'nin de güneş enerji potansiyelinin yüksek olması ile tercih edilebilecek en uygun yenilenebilir enerji sistemi güneş paneller olmaktadır. HOMER programının kullanımı ile tasarlanacak sistemde düz plaka güneş panel tercih

edilmiştir. Panel maliyeti ise 1 kW için 500\$, yenileme maliyeti 500\$ ve bir yıl için operasyon ve bakım maliyeti ise 17 \$ olarak kabul edilip simülasyon gerçekleştirilmiştir.

### Rüzgâr Türbini (Wind Turbine)

Rüzgâr türbinleri, kanatlarına çarpan rüzgâr ile mekanik enerji üreten ve bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Rüzgâr türbinleri maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı seçimlerinde önemlidir. Sistem tasarımında birçok türbin test edilerek en uygun türbinin Leitwind 80 modeli olacağına karar verilmiştir. Türbin 60 ile 80 metre aralığındaki gövde yüksekliğinde en yüksek verimi vermektedir. Bundan dolayı simülasyonda gövde yüksekliği olarak 65 metre tercih edilmiştir.

**Çizelge 2.** Rüzgâr Türbininin ortalama rüzgâr hızlarına dayalı çıkış gücü

*Table 2. Output power based on wind speeds of wind turbine*

Rüzgâr Hızı (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Güç Çıkışı (kW)	19	70	157	286	459	650	764	800	800	800

Çizelge 2’de rüzgâr hızlarına göre türbinden elde edilebilecek çıkış güçleri görülmektedir. Bölgemizin rüzgâr hızı ortalama 6,08 m/s olduğu için türbinden yaklaşık olarak 286 kW’lık bir çıkış gücü elde edilecektir.

### Batarya (Battery)

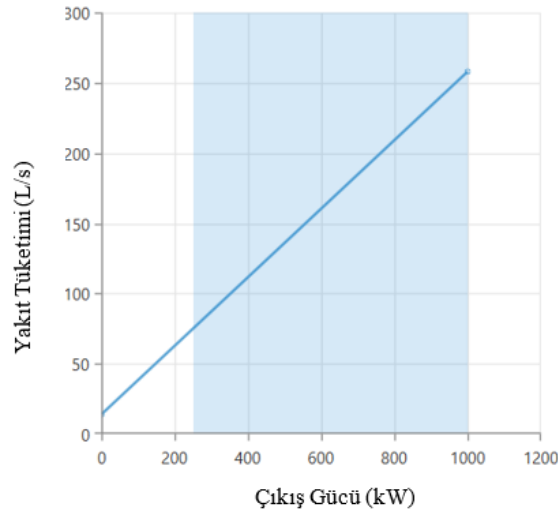
Batarya, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürüp depolanmasını sağlayan ve gerekli durumlarda kimyasal enerjiden elektrik enerjisi elde edilen sistem bileşenidir. Bataryalar enerjiyi DA gerilimde depolamaktadır veya sisteme aktarmaktadır (Salihoğlu ve diğ., 2019). Simülasyon seçeneği olarak yük izleme ve döngü şarj stratejisi tercih edilmiştir. Rüzgâr türbini gibi bataryalar da sistem maliyetini oldukça arttıran bir bileşen olduğu için batarya sayısının sisteme olan etkisi oldukça önem arz etmektedir. Sistemde kullanılan batarya tipi tespit edilirken çeşitli bataryaların simülasyon sonuçlarına bakılmış ve entegre edilebilecek en uygun batarya tipi tercih edilmiştir. Bu analizler sonucu sistemde tercih edilen Batarya, 1000 kWh lityum-iyon bataryadır. Bataryanın maliyeti 137.000 \$, yenileme maliyeti 137.000 \$, yıllık operasyon ve bakım maliyeti ise 100 \$ olarak kabul edilip simülasyona dahil edilmiştir. Bataryanın deşarj derinliği ise %80 olarak sistemde kullanılmıştır.

### Jeneratör (Generator)

Jeneratör, kullanılan yakıtın yakılması ile ortaya çıkan ısı enerjisini mekanik enerjiye çeviren ve buradan da elektrik enerjisi elde eden sistem bileşenidir. Jeneratörler kullandıkları yakıtlara göre çeşitlilik göstermektedirler. Bu çalışmada, dizel ve biyogaz jeneratör kullanılmaktadır.

### Dizel Jeneratör (Diesel Generator)

İlk olarak sistemde kullanılan dizel jeneratördür. Yakıtın litre başına fiyatı ise 0,813 \$ olarak kabul edilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 4’te ise jeneratörün tüketeceği yakıtı göre elde edeceği çıkış gücü görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi yüksek çıkış gücü değerleri için fazla miktarda yakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Buda maliyeti arttıracaktır. Bundan dolayı jeneratör ihtiyaç halinde devreye alınmaktadır.



**Şekil 4.** Dizel jeneratörün yakıt eğrisi

*Figure 4. Fuel curve of diesel generator*

Dizelin yakıt tüketimi jeneratör kendi çıkış gücüne dayanır ve denklem 1 ile ifade edilir (Kharrich ve diğ., 2020).

$$q(t) = a * P_{DG}(t) + b * P_r \quad (1)$$

$P_{DG}(t)$  : DG (kW) tarafından t (saatte) üretilen güç

$q(t)$  : Yakıt tüketimi (L / s)

$P_r$ : DG'nin ortalama gücü ve a, b sabitlerdir (L / kW) ve standart olarak yakıt tüketimi parametrelerini sembolize eder. Sırasıyla 0,246 ve 0,08415 değerleri.

Sistemde tercih edilen dizel jeneratörün 1 kW için maliyeti 175 \$ olarak bulunmuştur. Sistemde 1 MW kapasiteli versiyonu kullanılacağı için maliyeti 175.000 \$, yenileme maliyeti 175.000 \$, operasyon ve bakım maliyeti ise bir yıl için 3.000 \$ olarak simülasyona dahil edilmiştir.

#### **Biyogaz Jeneratörü (Biogas Generator)**

Sistemde dizel jeneratörden sonra tercih edilen bir diğer jeneratör tipi biyogaz jeneratörüdür. Biyogaz jeneratörünün yakıtı hayvansal atıklardan elde edilmektedir. Seçilen yük bölgesinde yaklaşık olarak 5.0000 adet büyükbaş, 8.300 adet küçükbaş hayvan bulunmaktadır. Bir yıl için değerlendirildiğinde büyükbaş hayvandan 3,6 ton gübre ve 1 ton gübreden 33 m<sup>3</sup> biyogaz elde edilirken, küçükbaş hayvandan bir yılda 0,7 ton gübre ve 1 ton gübreden 58 m<sup>3</sup> biyogaz elde edilmektedir (Dursun, 2016). Bu bilgilerden yararlanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda bölgede 1 gün için 65,23 ton hayvansal atık kaynağı mevcuttur. Yakıt olarak kullanılan hayvansal atıkların 1 ton için maliyeti 17,64 \$ olarak hesaplanıp simülasyona dahil edilmiştir. Tercih edilen biyogaz jeneratörünün 1 kW için maliyeti 1000\$, yenileme maliyeti 1000 \$, operasyon ve bakım maliyeti 1 saat için 0,02 \$/kW olarak hesaplanmıştır. Sistemde 1 MW kapasiteli jeneratör kullanıldığı için maliyeti 1.000.000 \$, yenileme maliyeti 1.000.000 \$, operasyon ve bakım maliyeti ise 175.200 \$ olmaktadır.

#### **Yakıt Pili (Fuel Cell)**

Yakıt pili anot, katot ve elektrolit bileşenleri ile yakıttan elektrik ve ısı üreten elektrokimyasal sistem bileşenidir. Yakıt pilinde kaynak olarak hidrojen kullanılmaktadır. Tercih edilen yakıt pilinin 1 kW için maliyeti 2000 \$, yenileme maliyeti 2000 \$, operasyon ve bakım maliyeti 366 \$ olarak hesaplanmıştır.

### Elektrolizör (Electrolyzer)

Elektrolizör, elektroliz işlemini gerçekleştiren ve bu işlem sonucunda hidrojen oluşumunu sağlayan sistem bileşenidir. Temel mantığı elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çeviren cihazdır. Sistemde kullanılan Elektrolizör 1 kW için maliyeti 1500 \$, yenileme maliyeti 641,61 \$, operasyon ve bakım maliyeti ise 100 \$ olarak kabul edilip simülasyona dahil edilmiştir.

### Hidrojen Tankı (Hydrogen Tank)

Elektrolizörde elde edilen hidrojeni depolamaya yarayan en basit yöntem hidrojen tank kullanımudur. Hidrojen, hidrojen tankında sıkıştırılmış gaz halinde depolanmaktadır. Tankın 1 kg için maliyeti 130 \$, yenileme maliyeti 130 \$, operasyon ve bakım maliyeti 10 \$ olarak hesaplanmıştır (Khadem ve diğ., 2017). Tank boyutu olarak 0 kg, 100 kg ve 1000 kg tercih edilip simülasyona gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi entegre edilebilecek en iyi tercihin bulunmasıdır.

### Dönüştürücü (Converter)

HOMER programına göre dönüştürücü, AA ve DA gerilimler arasındaki dönüşümü sağlayan sistem bileşenidir. DA ve AA bileşenleri arasındaki enerji akışını sürdürmek için hibrit rüzgâr/güneş paneli/batarya güç sistemi için bir güç dönüştürücü gereklidir. Bu sistemde dönüştürücünün veriminin %90 olduğu varsayılmaktadır (Lau ve diğ., 2010). Sistemde kullanılan konvertör maliyeti 256\$, yenileme maliyeti 256\$ ve işletme ve bakım maliyeti 3\$/yıl olarak kabul edilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir.

### Ekonomik Analiz Verileri (Economic Analysis Data)

HOMER programında gerçekleştirilen simülasyonlarda maliyet hesabı için yıllık gerçek faiz oranı kullanılmaktadır. Gerçek faiz oranını elde etmek için ise güncel faiz oranından ve enflasyon değerinden yararlanılmaktadır. Yıllık gerçek faiz oranının hesabı ise şu şekilde yapılmaktadır (Güven ve Poyraz, 2021).

$$i=(i'-f)/(1+f) \quad (2)$$

Burada;

i: Yıllık gerçek oranı

f: yıllık enflasyon oranı

i': güncel faiz oranı

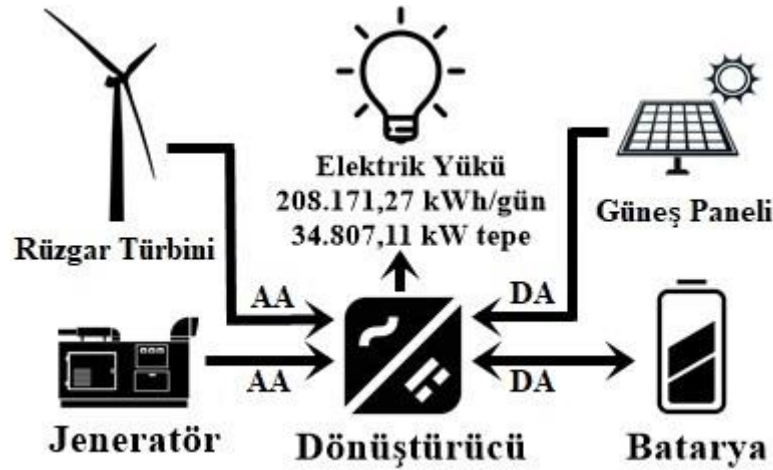
Sistemin faiz oranının %19 ve enflasyon değerinin %17,14 olması durumunda elde edilen yıllık gerçek faiz oranı %1,59 olarak bulunup simülasyona dahil edilmiştir. Sistem ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir.

### Hibrit Enerji Sistemi Modeli (Hybrid Energy System Model)

HOMER programı bir enerji sistemi tasarımının gerçekleştirilmesinde ve analizlerinin yapılmasında kullanılan bir yazılımdır. HOMER programında sistem tasarlanırken ilk olarak seçilen bölgenin enerji ihtiyacı ve enerji potansiyelleri belirlenmelidir, daha sonrasında sisteme eklenecek bileşenler seçilip maliyet, verim gibi gerekli sayısal değerleri girilmelidir. Gerçekleştirilen bu adımlar sonunda programa yaptırılan hesaplama ile tasarlanan sistemin bölgenin enerji ihtiyacını karşılayıp karşılayamadığına ve maliyet açısından uygulanabilirliğine karar verilmektedir.

Tasarlanmak istenen şebeke bağlantısız hibrit enerji sisteminin genel modeli Şekil 5'de yer almaktadır. Sistemi besleyen 5 adet bileşen bulunmaktadır. Ana bileşenler güneş paneller ve rüzgâr türbini, yardımcı bileşenler ise jeneratör ve batarya bağlantısıdır. Dönüştürücü ise AA gerilim ile çalışan rüzgâr türbini, şebeke ve jeneratörün DA gerilime çevrilmesini sağlamak amacı ile sisteme dahil edilmiştir.





Şekil 5. Şebeke bağlantısız güneş paneli/rüzgâr türbini/jeneratör/batarya sistem modeli

Figure 5. Off grid solar panel/wind turbin/generator/battery hybrid system model

Sistem senaryolarının değişmesi ile sistem modelinde sadece jeneratör türü değişeceği için oluşturulan her bir senaryoyu Şekil 5’de gösterilen model temsil etmektedir.

Balıkesir’in Erdek ilçesinin 2020 yılı elektrik tüketim değerlerini karşılayacak hibrit enerji sistemi Materyal ve Metot bölümünde tanımlanan verilerin simülasyona dahil edilmesi ile oluşturulmuştur. Farklı sistem senaryolarının optimum sonuçları çizelge 3’te yer almaktadır.

Çizelge 3. Hibrit enerji sistemi optimizasyon sonuçları

Table 3. Hybrid energy system optimization results

Senaryo	Güneş Paneli (kW)	Rüzgâr Türbini	Jeneratör (kW)	Batarya	Dönüştürücü (kW)	Optimizasyon Stratejisi	Net Bugünkü Maliyet (\$)	Birim Enerji Maliyeti (\$)
1	121.786	1	1.000	196	31.286	Yük İzleme	165 M	0,109
2	181.481	1	1.000	454	37.463	Döngü Şarj	272 M	0,175
3	173.842	1	250	522	31.594	Yük İzleme	281 M	0,181

Güneş paneli/rüzgâr türbini/Jeneratör/batarya bileşenleri ile oluşturulan Hibrit enerji sistemi arasındaki fark, jeneratör tipleridir. Senaryo 1’de dizel jeneratör, senaryo 2’de biyogaz jeneratörü, senaryo 3’te ise yapıt pili kullanılarak sistemler oluşturulmuştur. Sistemde kullanılan dizel jeneratörün fiyatının diğer seçeneklerine göre uygun olması ve dispatch tercihinde load following seçilmesi sistemde ihtiyaç duyulan batarya sayısını da azaltmaktadır. Bu sebep ile sistemin net bugünkü maliyeti ve birim enerji maliyeti de diğer senaryolara göre oldukça düşük olmaktadır. Sistemlerin maliyetleri karşılaştırıldığında, net bugünkü maliyeti 165 milyon \$ ve birim enerji maliyeti 0,109 \$ olan senaryo 1 en uygun tercih olmaktadır.

Tasarlanan sistemin maliyet analizi kadar emisyon değerlerinin analizi de bir o kadar önem arz etmektedir. Çizelge 4’de Senaryo 1’in emisyon değerleri görülmektedir. Senaryo 2 ve 3’ün emisyon değerleri HOMER programında yapılan simülasyonlarda 0’ya yakın bir değer çıktığı için program bu

değerleri 0 kabul edip %100 yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretildiğini göstermektedir. Böylece senaryo 2 ve 3'ün tercih edilmesi çevreci yaklaşıma daha uygun bulunmaktadır.

**Çizelge 4.** Senaryo 1 emisyon değerleri

*Table 4. Scenario 1 emission values*

	Senaryo 1 (Birimler: kg/yıl)
Karbondiyoksit	438.660
Karbon Monoksit	2.323
Yanmamış Hidrokarbonlar	123
Partikül Madde	19,9
Kükürt Dioksit	2.744
Azot Oksit	445

#### Sistem Bileşenlerinin Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results of System Components)

Sistem senaryolarının optimizasyon sonuçları kadar bileşenlerin optimizasyon sonuçlarında değerlendirilmelidir. Bu sonuçların incelenmesi ile verimi düşük bileşenler tespit edilmektedir.

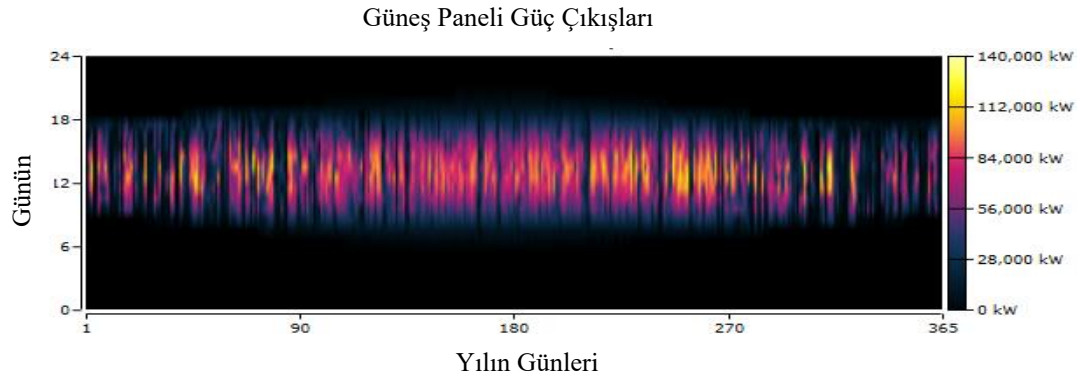
Şekil 6'da tasarlanan sistemler arasında tercih edilen en optimum sistem senaryo 1'in yılın farklı gün ve saatlerinde rüzgar türbininden elde ettiği çıkış gücü değerleri görülmektedir. Grafikte elde edilen çıkış gücü değerlerinin değişimi bölgenin o anki rüzgar hızına ve sistemin ihtiyacı olan üretim miktarına bağlı olmaktadır. Sisteme entegre edilen rüzgar türbini yılda 7.027 saat çalışıp toplamda 2.678.825 kWh/yıl elektrik enerjisi üretmektedir. Ürettiği elektrik enerjisinin birim maliyeti ise 0,0358 \$/kWh olmaktadır.



**Şekil 6.** Yılın farklı zamanlarında rüzgâr çıkış gücü değerleri

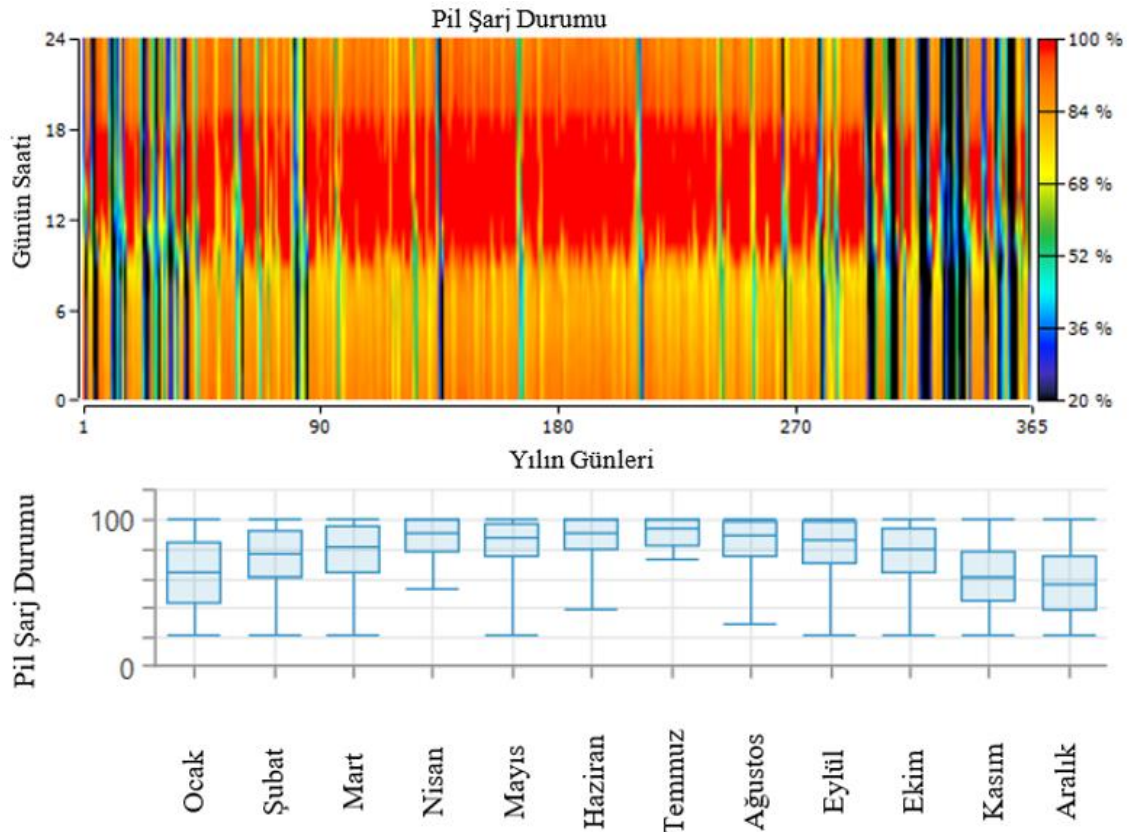
*Figure 6. Wind output power values at different times of the year*

Şekil 7'de senaryo 1'de kullanılan güneş panellerinin yılın farklı gün ve saatlerinde elde ettiği çıkış gücü değerleri görülmektedir. Sistemin ana enerji kaynağı güneş enerjisi olduğundan ve kullanılan panellerin kapasitesinin yüksek olmasından dolayı güneş panelleri kısa sürede daha fazla üretim gerçekleştirmektedirler. Güneş panelleri yılda 4.389 saat çalışarak toplamda 164.108.274 kWh/yıl elektrik üretmektedir. Ürettikleri enerjinin maliyeti ise 0,0307 \$/kWh olmaktadır.



**Şekil 7.** Yılın farklı zamanlarında güneş panellerin çıkış gücü değerleri  
*Figure 7. Output power values of solar panels at different times of the year*

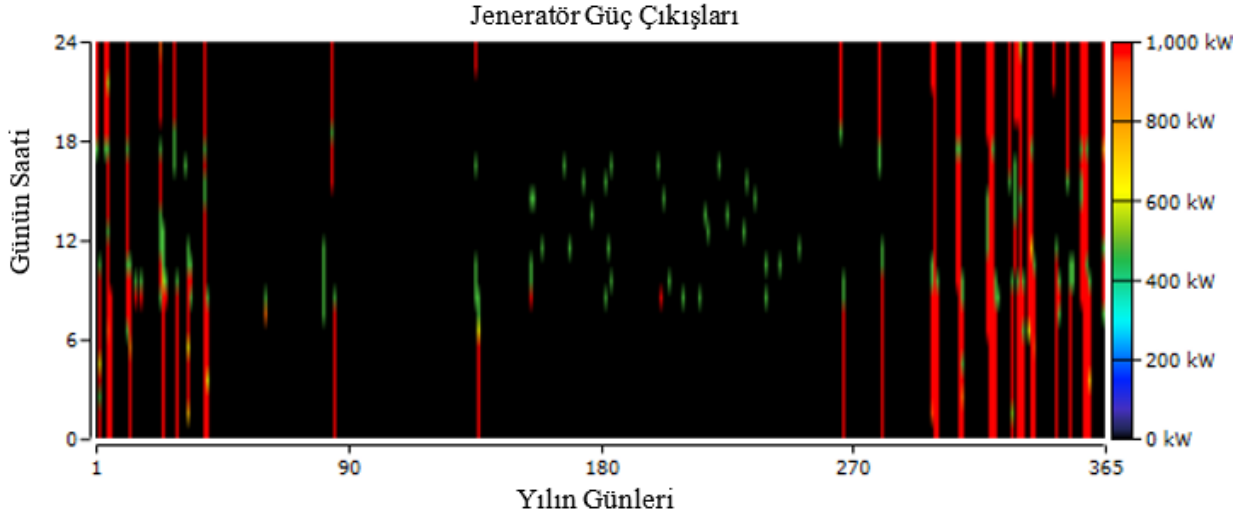
Şekil 8’de ise senaryo 1’de kullanılan bataryaların yılın farklı zamanlarındaki doluluk oranları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere öğlen saatlerinde güneş panellerinin en fazla verim verdiği zamanlarda bataryalar çoğunlukla %100 doluluk oranında olmaktadır. Günün diğer saatlerinde ise bataryaların kullanımı artmakta ve yüke ihtiyacı olan enerji sağlanmaktadır.



**Şekil 8.** Yılın farklı zamanlarında batarya doluluk oranları  
*Figure 8. Battery occupancy rates at different times of the year*

Şekil 9’da senaryo 1’de kullanılan dizel jeneratörün yılın farklı zamanlarındaki çıkış gücü değerleri görülmektedir. Dizel jeneratör, yakıt maliyetinin fazla olması ve sistemin emisyon değerlerini arttırmasından dolayı toplam enerji üretiminde düşük bir payı vardır. Jeneratör 1 yılda toplamda 659.844 kWh elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Üretilen elektriğin maliyeti ise 0,198 \$/kWh olmaktadır. Jeneratörden elde edilen enerjinin maliyeti de diğer sistem bileşenlerine göre yüksektir. Bu durum birim enerji maliyetini yükseltmektedir. Dolayısıyla sistemde jeneratörün devreye girmesi için rüzgar türbini ve

güneş panellerin yeterli enerji üretimi gerçekleştirememesi ve bataryaların doluluk oranlarının minimum düzeye düşmesi gerekmektedir. Jeneratörün kullanılmadığı senaryoda ise daha fazla batarya kullanılacak ve maliyet açısından olumsuzluklar yaşanacaktır. Buradan anlaşılacağı üzere jeneratör, yükün ihtiyacını karşılayacak en son seçenek olmakla birlikte bulunması da sistem için önem arz etmektedir.



**Şekil 9.** Yılın farklı zamanlarında jeneratör çıkış gücü değerleri

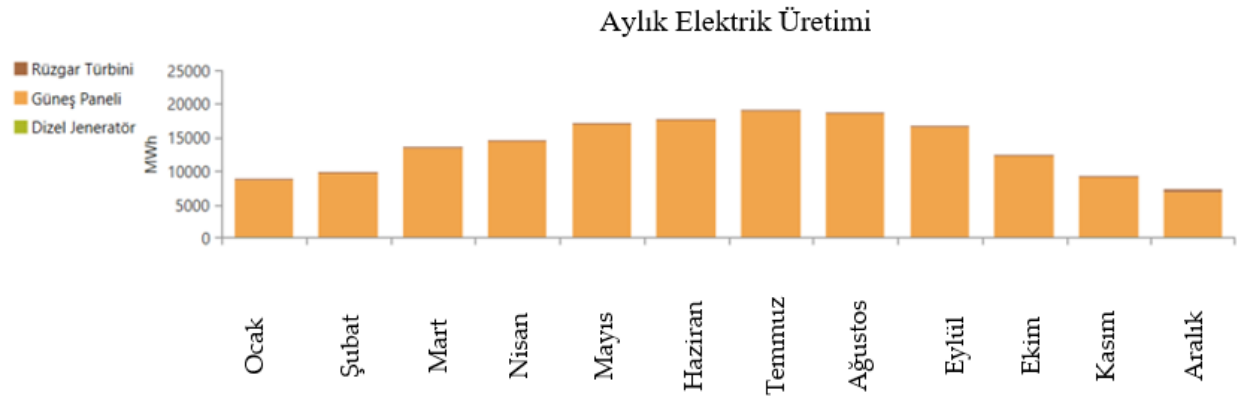
*Figure 9. Generator output power values in different times of the year*

Şekil 10'da sistem bileşenlerinin aylık olarak üretim dağılımı yer almaktadır. Çizelge 5'de ise toplam enerji üretimi ve bileşenlerin bu enerjideki paylarına ait değerler gösterilmektedir. Buradan sistemin bir yıllık üretiminin %98 gibi yüksek bir payını güneş panellerinin, %1,6'lık payı rüzgâr türbininin ve %0,394'lik payı dizel jeneratörünün karşıladığı görülmektedir.

**Çizelge 5.** Sistemin elektrik üretim ve tüketim bilgileri

*Table 5. Electrical production and consumption information of the system*

Üretim	kWh/yıl	%	Tüketim	kWh/yıl	%	Miktar	kWh/yıl	%
<b>Güneş Paneli</b>	164,108,274	98	AA Birincil Yük	73,811,687	26.5	Fazla Elektrik	88,092,230	52.6
<b>Dizel</b>	659,844	0.394	DA Birincil Yük	0	0	Karşılanmamış Elektrik Yüğü	2,170,827	2.86
<b>Rüzgâr Türbini</b>	2,678,825	1.60	Ertelenebilir Yük	0	0	Kapasite Sıkıntısı	3,861,843	5.08
						Yenilenebilir Fraksiyon		99.1
<b>Toplam</b>	167,446,943	100	Toplam	73,811,687	100	Maksimum Yenilenebilir		2.416



**Şekil 10.** Sistemin yıllık elektrik üretim dağılımı

*Figure 10.* Annual electrical production distribution of the system

### Batarya Kullanımının Sistem Sonuçlarına Etkisi (Effect of Battery Usage on System Results)

Batarya, enerji üretim kaynaklarının yeterli üretim yapamadığı durumlarda depoladığı enerjiyi yüke aktarmaktadır. Fakat kullanılacak batarya sayısının seçimi maliyetinden dolayı önem arz etmektedir. Çizelge 6'da senaryolarda kullanılan batarya sayıları ve sonuçlara etkilerini içeren bilgiler görülmektedir. Senaryo 1'de, 196 adet batarya kullanımı ile birlikte 165 milyon \$ net bugünkü maliyet ve 0,109 \$ birim enerji maliyeti elde edilmiştir. Bu en uygun çözümdür. Senaryo 1'e kıyasla diğer senaryolarda batarya sayısı neredeyse ikiye katlanmış ve maliyette ciddi farklar oluşmuştur. Buradan da anlaşılacağı üzere batarya sayısının seçimi sistem sonuçlarına direkt etki etmekte ve belirlenmesi için detaylı bir şekilde çalışılmalıdır.

**Çizelge 6.** Sistemlerde kullanılan batarya sayısı ve etkileri

*Figure 6.* Number and Effects of Batteries Used in Systems

Senaryo	Batarya	Net bugünkü Maliyet	Birim Enerji Maliyeti
1	196	165 M	0,109
2	454	272 M	0,175
3	522	281 M	0,181

### SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada Balıkesir'in ilçesi olan Erdek'in 2020 yılındaki aylık elektrik tüketimini karşılama amacıyla bir şebeke bağlantısız hibrit enerji sistemi önerilmiştir. Tasarlanan hibrit sistem Güneş Paneli/Rüzgâr Türbini /Jeneratör/Batarya elemanlarından oluşmaktadır. Sistem bileşenleri güneş paneli, rüzgâr türbini ve bataryalar her bir sistemde aynı tip kullanılır iken, tercih edilen jeneratör tipinde değişiklikler yapılarak maliyet ve çevreci yaklaşıma en uygun sistem tasarlanmıştır. İlk olarak dizel jeneratör sonrasında biyogaz jeneratörü ve yakıt pili kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilerek sonuçlar değerlendirilmiştir.Yapılan analizler sonucunda şebeke bağlantısız Güneş Paneli/Rüzgâr Türbini /Dizel Jeneratör/Batarya sisteminin 165 milyon \$ net bugünkü maliyet ve 0,109 \$ birim enerji maliyeti ile en uygun sistem olduğuna karar verilmiştir. Tasarlanan sistemde çevreye verilen zararlarda dikkate alınmaktadır. Çalışma sonucunda çıkan senaryolarda dizel jeneratörün kullanıldığı sistemin emisyon değerleri diğer sistemlere göre yüksektir. Fakat fosil yakıt kaynaklarını kullanan sistemlerin yanında oldukça düşük değerlere sahip olduğu için tercih edilebilir bir sistem tasarımı olmaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda şebeke bağlantısız Güneş Paneli/Rüzgâr Türbini /Dizel Jeneratör/Batarya sistemi simülasyonu gerçekleştirilen sistemler arasından kurulumu yapılabilecek en uygun sistemdir.



Yenilenebilir enerji kaynaklı sistemlerinin kurulmadan önce fizibilite çalışmalarının ciddi bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bunun için sistem kurulmadan önce o bölgenin güneş ve rüzgâr enerji potansiyelinin belirlenmesi gereklidir. Aynı zamanda ihtiyaç olan elektrik yükünün detaylıca belirlenmesi de önemli bir unsur teşkil etmektedir. Hibrit enerji sistemleri, bölgenin meteorolojik verileri ve sistemin elektrik yükünün değişimi doğrultusunda, sistemlerin konfigürasyonunun değişmesiyle birlikte ekonomik açıdan da değişiklikler göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada yapıldığı gibi detaylı bir analiz gerekmektedir. Bu çalışmada, yenilenebilir kaynaklı enerjilerin, sistem konfigürasyonları ele alınmış ve en uygun çözüm bulunmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Dursun, S., 2016, "Techno-Economic Evaluation of Kırklareli University Kayali Campus using Biomass-Wind-Solar Hybrid Power Generation System", Master's thesis, Kırklareli University institute of science.
- Güven, A., Poyraz, E., 2021, "Feasibility Study and Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Muğla Province Köyceğiz", *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, Vol.11(1), pp.70-85.
- <https://temizenerji.org/2021/04/27/almanya-2022-yili-yenilenebilir-enerji-hedefini-artirdi/>, ziyaret tarihi: 09 Kasım 2021 .
- <https://www.enerjigazetesi.ist/gunes-almanya-nin-birincil-elektrik-uretim-kaynagi-oldu/>, ziyaret tarihi: 09 Kasım 2021.
- <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2020/public-net-electricity-generation-in-germany-2020-share-from-renewables-exceeds-50-percent.html>, ziyaret tarihi: 09 Kasım 2021.
- <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>, ziyaret tarihi: 19 Ağustos 2021.
- Khadem, T., Billah, S. B., Barua, S., Hossain, M. S., 2017, "Homer based hydrogen fuel cell system design for irrigation in bangladesh", *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 445-449.
- Kharrich M., Mohammed O., Akherraz M., 2020, "Design of Hybrid microgrid PV/wind/diesel/battery system: case study for Rabat and Baghdad", *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*.
- Lau K.Y., Yousof M.F.M., Arshad S.N.M., Anwari M., Yatim A.H.M., 2010, "Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions", *Energy*, Vol. 35, No.8, pp.3245-3255.
- Okedu, K. E., Uhunmwangho, R., 2014, "Optimization of Renewable Energy Efficiency using HOMER", *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol.4(2), pp. 421-427.
- Salihoğlu, N. K., Teksoy, A., Altan, K., 2019, "Determination of Biogas Production Potential from Cattle and Cattle Wastes: Example of Balıkesir Province", *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, Vol.8(1), pp.31-47.
- Tabak, A., 2021, "Analysis and Design of a Hybrid Energy Production System to Meet the Energy Demand of a Plant in Konya", *International Journal of Engineering Research and Development*, Vol.13 (1), pp.220-230 .
- Yılmaz, U., Demiroren, A., Zeynelgil, H.L., 2010, "Gökçeada'da Yenilenebilir Enerji Kaynakları ile Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Araştırılması", *Journal of Polytechnic*, Vol. 13, No. 3, pp.215-233.



## YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKILI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARIN ÖZELLİKLERİ

<sup>1</sup>İsmail KILIÇ , <sup>2</sup>Saadet Gökçe GÖK 

<sup>1,2</sup>Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırklareli, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>ismail.kilic@klu.edu.tr, <sup>2</sup>saadet.gokce.gok@klu.edu.tr

(Geliş/Received: 26.09.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.11.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesinin silindirle sıkıştırılmış betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada, Portland çimentosunun yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılarak silindirle sıkıştırılmış beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinin sıkıştırılabilirlik yüzdesi, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülü, su emme, 3 ve 28 günlük beton basınç dayanımı değerleri tespit edilmiştir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda yüksek fırın cürufu kullanımıyla işlenebilirlik olumlu etkilenmiş, sıkıştırılabilirlik yüzdeleri artmıştır. Yüksek fırın cürufu ikamesi 3 günlük beton basınç dayanımlarında azalmaya neden olurken 28 günlük beton basınç dayanımlarında artış sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Fiziksel özellikler, Mekanik özellikler, Yüksek fırın cürufu, Pozolan, Sıkıştırılabilirlik yüzdesi, Silindirle sıkıştırılmış beton

### The Properties of Roller Compacted Concretes Incorporating Blast Furnace Slag

**ABSTRACT:** In this study, it was aimed to investigate the effect of ground blast furnace slag replacement on the physical and mechanical properties of roller compacted concretes. In the experimental study, roller compacted concretes were produced by using ground blast furnace slag as 10%, 20% and 30% of the weight of portland cement. The percentage of compactibility, unit weight, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, water absorption, and concrete compressive strength at the ages of 3 and 28 days were determined. With the use of blast furnace slag in roller compacted concretes, workability of concrete was positively affected and the percentages of compactibility increased. The replacement of blast furnace slag caused a decrease in 3-d concrete compressive strength, while it increased the 28-d concrete compressive strength.

**Key Words:** Physical properties, Mechanical properties, Blast furnace slag, Pozzolan, Compactibility percentage, Roller compacted concrete

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Silindirle sıkıştırılmış betonlarda (SSB) mekanik özellikler, normal betonlarda olduğu gibi, su/bağlayıcı oranı, çimento dozajı, kullanılan mineral katkı ve agrega bileşiminden etkilenmektedir (Yazıcı, 2008; Kılıç ve Gök, 2021a). Silindirle sıkıştırılmış betonlar, kuru kıvamlı betonlar olup nihai şekline ulaşabilmek için sıkıştırılmaya ihtiyaç duyar, sıkıştırma makinesinin zorlanmaması ve sıkıştırma enerjisinin azaltılabilmesi için bu betonlarda belirli bir kıvamın sağlanması gerekir (Chhorn ve Lee, 2017). Silindirle sıkıştırılmış betonlarda geleneksel betona göre çok daha kuru kıvamda çalışılması, taze beton

özelliklerinde farklılıklar meydana getirmekte, geleneksel beton üretiminde kullanılan katkılar bu betonlarda da kullanılabilmesine rağmen katkı dozajlarında değişikliğe gitmek gerekmektedir.

Betonun işlenebilirliğinin, kohezyon, sıkıştırılabilirlik, ayrışma direnci, işlenebilirliğin korunması, su kesme ve kıvamdan oluştuğu düşünülmektedir; belirli bir karışım için işlenebilirlikteki gelişme, bu bileşenlerin yanı sıra, iç sürtünme açısı, betondaki hava miktarı, katkı tipi ve dozajına da bağlı olarak değişmektedir (Hazaree ve diğ., 2013; Hazaree, 2010). Silindirle sıkıştırılmış betonlar, Abrams kanunundaki sapmalarla gösterildiği üzere, mekanik dayanım açısından anormal davranış göstermekte olup su/bağlayıcı oranının genel somut davranışı ve eğilimleri açıklamak için kapsamlı bir parametre olmadığı tartışılmaktadır (Hazaree, 2010).

Silindirle sıkıştırılmış betonlarda uçucu kül başta olmak üzere, silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi çeşitli mineral katkıları kullanılabildiği gibi kimyasal katkıları ve liflerde kullanılabilmektedir (Harrington ve diğ., 2010; Kılıç ve Gök, 2021b; Modarres ve Hosseini, 2014; Şengün ve diğ., 2017; TÇMB, 2018; Yetim ve Yılmaz, 2019; Shen ve diğ., 2020; Kılıç ve Gök, 2021c; Hashemi ve diğ., 2020). Silindirle sıkıştırılmış betonlarda bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı kullanımı, işlenebilirliği ve erken yaş mukavemetini önemli derecede etkilemektedir. SSB karışımlarında, ayrışmaya karşı direncinin incelenmesi önem kazanmakta, karışım performansını iyileştirmek üzere geleneksel betonlarda kullanılan kimyasal katkıları, çelik ya da polipropilen lifler kullanılabilmektedir (Mardani ve diğ., 2020). Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımı silindirle sıkıştırılmış beton özelliklerini iyileştirmekte, ekonomik ve çevresel açıdan fayda sağlamaktadır (Pektaş, 2015). Bu katkıların dışında, katyonik asfalt emülsiyonunun silindirle sıkıştırılmış betonlarda katkı olarak kullanımına dair çalışmalar da yapılmıştır (Dareyni ve diğ., 2018). Beton Yollar Teknik Şartnamesi'ne (KGM, 2016) göre, beton yol imalatında hava sürükleyici, su azaltıcı, yüksek oranda su azaltıcı, priz geciktirici katkıları ve uzun işlenebilirlik katkıları kullanılmaktadır. Silindirle sıkıştırılmış beton uygulamalarında katkı ile üretim şart olmamakla birlikte katkı kullanımı, taze ve/veya sertleşmiş beton özelliklerini iyileştirmek üzere tercih edilmektedir (Engin ve diğ., 2019).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, tek başına bağlayıcılığı çok az olan, ortamda kireç ve nem varlığında bağlayıcılık kazanan bir malzemedir. Hidratasyonu çok yavaş olduğu için aktivasyona ihtiyaç duyar, bu nedenle sıklıkla çimento ile birlikte kullanılmaktadır. Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretiminde elde edilen bir atık üründür. Yüksek fırın cürufunun beton üretiminde yeniden değerlendirilmesi, ekonomik ve çevresel açıdan fayda sağladığı gibi betonda geçirimsizliğin arttırılması, hidrasyon ısısının ve boşluk oranının azaltılmasının yanı sıra ilerleyen yaşlarda beton basınç dayanımının artmasına da katkıda bulunarak beton özelliklerini iyileştirmektedir. Yüksek fırınlardan elde edilen cüruf, soğutulduktan sonra çimento inceliğinde öğütülür ve puzolan olarak kullanılır. Öğütülmemiş hali, yollarda, alt temelde, dolgu malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, demir-çelik üretim tesisleri çevresinde kurulu cüruf üreticilerinden temin edilebilmektedir, Türkiye özelinde düşünüldüğünde, bu malzeme diğer pek çok puzolana göre kolay erişilebilir durumdadır. Demir-çelik üretiminde açığa çıkan bir atığın beton içerisinde yeniden değerlendirilmesiyle, bu atığın bertaraf edilmesine yardımcı olunmakta, çevreye duyarlılık ve ekonomik imalat konularında fayda sağlanırken sürdürülebilir bir beton üretimine katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte, yüksek fırın cürufunun silis dumanı kadar ince bir malzeme olmayışı, betonda su ihtiyacı, işlenebilirlik ve buna bağlı olarak beton özelliklerinin iyileşmesi konularında avantaj sağlamakta, bu malzeme ile çalışmayı kolaylaştırmaktadır.

Cürufun yapı malzemesi olarak kullanılabilmesinde belirleyici faktör malzemenin reaktivitesi olup yapılan soğutma işlemi malzeme özelliklerini etkilemektedir. Yüksek fırın cürufu, çoğunlukla kalsiyum alümina silikatlarından oluşmaktadır. Cürufun camsı yapısı ve yüksek reaktivitesi, hidrolik bağlayıcı olarak kullanılması için temel gereksinimler olup malzemenin suda hızlı soğutulması ile sağlanır. Öğütme işleminden önce, hidrolik bağlayıcının imalatında kullanıldığında, cüruf 0,2 mm-8 mm çapında nehir kumuna benzeyen bir tane boyutuna ve görünümüne sahiptir (Albuquerque ve diğ., 2011). Yalnızca Portland çimentosu içeren beton ile kıyaslandığında yüksek fırın cürufu beton, daha yüksek oranda kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve daha düşük oranda serbest kireç içerir; CSH içeriğinin artması beton basınç



dayanımını arttırmakta iken serbest kirecin nihai dayanıma etkisi yoktur, bu şekilde cüruf kullanımıyla betonun mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir (Topçu, 2013).

Yol inşaatı, baraj inşaatı gibi çeşitli inşaat alanlarında silindirle sıkıştırılmış betonun dikkate değer gelişimi, araştırmacıları farklı değişkenlerin silindirle sıkıştırılmış beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemeye yöneltmiştir. Karimpour (2010), çalışmasında, malzemelerin karıştırılmasının başlangıcından sıkıştırılmasının bitimine kadar geçen sürenin SSB özelliklerini etkileyen parametrelerden biri olduğunu ifade etmiş, karıştırma ve sıkıştırma arasındaki zaman aralığının değiştirilmesinin geleneksel beton ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren silindirle sıkıştırılmış betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Sıkıştırmadaki gecikme arttıkça, geleneksel beton özelliklerindeki kaybın arttığını, ancak çimento esaslı malzemenin bir bölümü olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanıldığında, sıkıştırmada daha fazla gecikmenin beton özelliklerini olumsuz etkilemediğini, hatta bazı koşullarda, beton basınç dayanımını, geçirimsizliğini, absorpsiyonunu ve adsorpsiyonunu iyileştirdiğini belirtmiştir (Karimpour, 2010). Başka bir çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufunun SSB kaplamaların dayanıklılığı üzerindeki etkileri incelenmiş, betonun su emme, geçirimsizlik ve donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılığı gibi özellikleri dikkate alınmıştır (Aghaeipour ve Madhkhan, 2017). Çalışmanın neticesinde, betonun maksimum sıkıştırmaya ulaşması için gereken su muhtevasının, artan cüruf içeriği ile arttığı görülmüş, çimentonun cürufuyla %40 oranında değiştirilmesinin porozite, su emme ve geçirimsizliğin azalmasını sağladığı ifade edilmiştir (Aghaeipour ve Madhkhan, 2017).

Bu çalışmada, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesinin silindirle sıkıştırılmış betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Portland çimentosunun yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılarak silindirle sıkıştırılmış beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen SSB numunelerinin sıkıştırılabilme yüzdesi, birim hacim ağırlık, su emme, ultrases geçiş hızı, dinamik elastisite modülü, 3 ve 28 günlük beton basınç dayanımı değerleri saptanmıştır.

## MALZEME VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Silindirle sıkıştırılmış beton üretiminde, şehir şebeke suyu, kırmataş II, kırmataş I, taş tozu, doğal kum, CEM II/B-L 32,5 R Portland çimentosu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Agregaların özgül ağırlık tayininde TS EN 1097-6 (2013) standardı esas alınmıştır. Kullanılan dolomit kökenli kırmataş II, kırmataş I ve taş tozunun özgül ağırlığı 2,80, kumun özgül ağırlığı 2,75, çimentonun özgül ağırlığı 2,95, yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 2,53'tür. Agregaların elek analizi TS EN 933-1'e (2012) uygun olarak yapılmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. Portland çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Elek analizi

*Table 1. Sieve analysis*

Elek Açıklığı (mm)	% Geçen				
	Kırmataş II (%20)	Kırmataş I (%35)	Taş Tozu (%15)	Doğal Kum (%30)	Karışım (%100)
22,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	47,12	100,00	100,00	100,00	86,78
12,5	0,00	94,32	100,00	100,00	73,58
9,5	0,00	79,29	100,00	100,00	69,82
4	0,00	9,16	91,73	97,20	49,52
2	0,00	0,00	87,45	93,62	45,27
1	0,00	0,00	54,44	83,95	34,60
0,5	0,00	0,00	28,21	52,68	20,22
0,25	0,00	0,00	16,06	30,19	11,56
0,125	0,00	0,00	8,03	3,68	2,93
0,075	0,00	0,00	4,32	1,24	1,39

**Çizelge 2.** Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri (Url-1, 2021)*Table 2. Physical and chemical properties of the cement (Url-1, 2021)*

Özellikler	
Priz Başlangıç (dakika)	155±25
Priz Sonu (dakika)	230±40
Özgül Ağırlık	2,95±0,06
Hacim Genleşmesi(mm)	1,0±1
Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	4980±400
2 Günlük Dayanım (MPa)	20,5±3
28 Günlük Dayanım (MPa)	38,9±4
SO <sub>3</sub>	2,80±0,35
MgO	0,90±0,20
Kızdırma Kaybı	13,10±3
Serbest Kireç	1,80±0,6

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu, çimento ağırlığının %10'u, %20'si ve %30'u oranlarında ikame edilerek farklı karışımlar hazırlanmıştır. Beton karışım hesabı TS 802 (2016), taze betonda çökme deneyi TS EN 12350-2 (2019) standardına göre yapılmıştır. Üretilen karışımlar kuru kıvamda ve çökme değeri sıfır olacak şekilde tasarlanmıştır.

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** Yüksek fırın cürufunun özellikleri (Url-2, 2021)*Table 3. The properties of blast furnace slag (Url-2, 2021)*

Tipik Özellikler		Standart Değer (TS EN 15167-1 2006)	Yüksek Fırın Cürufu
Aktivite, 7 gün	%	min. 10,0	50,0
Aktivite, 28 gün	%	42,5-62,5	75,0
Hacim Genleşmesi	mm	-	1,0
Özgül Yüzey	cm <sup>2</sup> /g	-	4800
MgO	%	maks. 18,0	7,0
S	%	maks. 2,0	0,75
SO <sub>3</sub>	%	maks. 2,50	0,15
Klorür	%	maks. 0,1000	0,0100
Kızdırma Kaybı	%	maks. 3,00	0,10
Rutubet	%	maks. 1,00	0,10

Silindirle sıkıştırılmış beton karışımları için 1m<sup>3</sup> hacimdeki malzeme miktarları Çizelge 4'te verilmiştir. Karışım tasarımı, agregaların yüzey kuru suya doymuş durumu dikkate alınarak yapılmıştır. Toplam agrega karışımının ağırlıkça %20'si kırmataş II'den, %35'i kırmataş I'den, %15'i taş tozundan ve %30'u doğal kumdan oluşmaktadır.

**Çizelge 4.** Beton karışım tasarımı (1 m<sup>3</sup>).Table 4. Concrete mix design (1 m<sup>3</sup>)

Karışım Kodu	Su/Bağlayıcı	Su (kg)	Çimento (kg)	Yüksek Fırın Cürufu (kg)	Doğal Kum (kg)	Taş Tozu (kg)	Kırmataş I (kg)	Kırmataş II (kg)
S0	0,34	102	300	0	657	334	780	446
S10	0,34	102	270	30	657	334	780	446
S20	0,34	102	240	60	657	334	780	446
S30	0,34	102	210	90	657	334	780	446

Silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinin üretimi, ASTM C1435 (2020) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi, kalıp şekli ile uyumlu, özel üretilmiş başlıklar kullanılarak yapılmıştır. Standart küp numuneler, tek tabakada 15 saniye boyunca sıkıştırılmıştır. Birden fazla kademedeki yapılan sıkıştırma işlemlerinde soğuk derz oluşumu ile karşılaşıldığından, tek tabakada sıkıştırma yoluna gidilmiştir.

Numunelerdeki sıkıştırılabilirlik yüzdesi hesaplanırken, öncelikle 15 cm×15 cm×15 cm boyutlu küp kalıplar üst seviyesine kadar taze haldeki SSB ile doldurulmuş, tesviye edildikten sonra 15 saniye sıkıştırılmış ve sıkıştırma sonunda, kalıbın dört kenarının orta noktalarından içe doğru oluşan boşluk derinliği ölçülmüştür (Şekil 1 ve Şekil 2). Dört noktadan ölçüm yapıldıktan sonra bu değerlerin aritmetik ortalamaları alınmış, belirlenen ortalama değer küp kalıbın iç kenar uzunluğuna oranlanarak SSB örneğinin sıkıştırılabilirlik yüzdesi tespit edilmiştir.

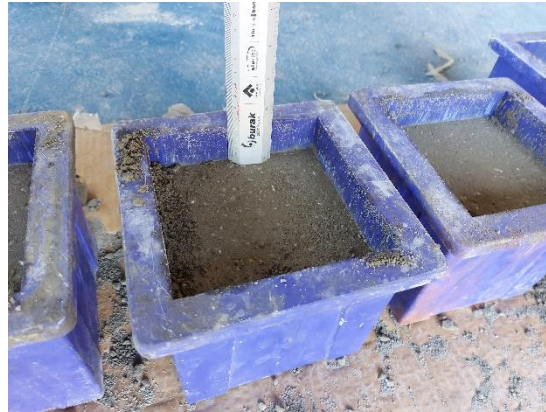
**Şekil 1.** Sıkıştırılabilirlik yüzdesi tespiti öncesi ölçüm

Figure 1. Measurement for detecting percentage of compactibility

Üretilmiş numuneler, üretimden bir gün sonra kalıptan çıkarılmış, deney zamanına kadar kür havuzunda, kirece doygun suda bekletilmiştir.



**Şekil 2.** Kalıplarda sıkıştırılmış SSB örnekleri  
*Figure 2. RCC specimens in molds*

Silindirele sıkıştırılmış betonların basınç dayanımının belirlenmesinde, TS EN 12390-3 (2019) standardı esas alınarak 3 ve 28 günlük numuneler test edilmiştir. Yükleme hızı 0,602 MPa/s olarak alınmıştır. Her bir deney grubu için üçer numune test edilmiş olup ortalama değerler belirlenmiştir.

Silindirele sıkıştırılmış beton numunelerin toplam su emme yüzdeleri 28 günlük SSB numunelerinde, EN 772-11 (BSI, 2011) standardına göre belirlenmiştir. 48 saat boyunca etüvde kurutularak sabit ağırlığa gelen silindirele sıkıştırılmış beton numunelerin ağırlıkları kaydedilmiş, ardından bu numuneler 24 saat boyunca suda bekletilmiş ve su emme yüzdeleri hesaplanmıştır.

28 günlük SSB numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri ASTM C597 (2016) standardına uygun olarak ölçülmüş ve dinamik elastisite modülü değerleri tespit edilmiştir.

Ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülünün elde edilmesinde Proceq marka Pundit PL-200 ultrasonik test cihazı kullanılmıştır. Bu deneyler için 15 cm×15 cm×15 cm boyutlu 28 günlük küp SSB numuneleri kullanılmıştır. Deney bulguları sunulurken her bir seriden üçer adet numune test edilerek ortalama değerler kullanılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Silindirele sıkıştırılmış beton numunelerin ortalama sıkıştırılabilirlik yüzdeleri Çizelge 5'te verilmiştir.

**Çizelge 5.** Sıkıştırılabilirlik yüzdesi

*Table 5. The percentage of compactibility*

Karışım kodu	Sıkıştırılabilirlik yüzdesi (%)
S0	11,11
S10	12,56
S20	13,33
S30	14,81

Beton karışımında kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça betonda işlenebilirlik iyileşmiş, sıkıştırılabilirlik yüzdelerinde artış meydana gelmiştir. Sıkıştırılabilirlik yüzdesi referans numuneye göre S10 kodlu karışım numunesinde %13,05, S20 karışım numunesinde %19,98 ve S30 karışım numunesinde %33,30 artmıştır.

Puzolanik reaksiyonun çimentonun hidrasyonuna kıyasla daha yavaş gerçekleşmesi, betonun sertleşme sürecini uzatmaktadır. Böylece yüksek fırın cürufu kullanımı, karışımlarda sıkıştırma sürecinin daha yavaş gerçekleştirilebilmesine olanak tanımaktadır. Deneylerde kullanılan yüksek fırın cürufunun inceliği, çimentoya kıyasla daha düşüktür. Bu da su ihtiyacını azaltarak işlenebilirliğe ve sıkıştırılabilirlik yüzdesine olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Karimpour (2010), yapmış olduğu çalışmada, SSB karışımındaki yüksek fırın cürufu miktarını arttırmış, böylece karıştırma ve sıkıştırma arasında geniş zaman aralığı olsa dahi yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşabilmiştir. Bu sonucu şu şekilde açıklamıştır: cüruf miktarı arttıkça aslında çimento tanecikleri arasındaki mesafe artar, çimento partikülleri arasındaki mesafenin artması kristal ağ oluşumunun gecikmesine neden olur. Bu gecikme, SSB ile çalışmak için daha fazla zaman sağlamak amacıyla kullanılabilir (Karimpour, 2010).

Silindirle sıkıştırılmış betonların birim hacim ağırlıkları Çizelge 6'da verilmiştir. Kuru ve doygun birim hacim ağırlık değerleri kıyaslandığında, yüksek fırın cürufu kullanılmayan S0 karışım kodlu SSB numunesinin en büyük birim hacim ağırlık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Karışımındaki yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça SSB numunelerinin birim hacim değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. En yüksek azalma miktarı, yüksek fırın cürufu kullanılmayan S0 kodlu karışıma kıyasla, ağırlıkça %30 oranında cüruf kullanılan S30 kodlu karışımda, kuru ve doygun birim hacim ağırlık değerinde yaklaşık %2 olarak tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık değerleri, malzemeyi oluşturan bileşenlerden ve malzemenin porozitesinden etkilendiği gibi, su emme yüzdelerinden de etkilenmektedir.

**Çizelge 6.** Birim hacim ağırlık

*Table 6. Unit weight*

Karışım kodu	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Doygun birim hacim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )
S0	2,35	2,53
S10	2,34	2,50
S20	2,31	2,49
S30	2,30	2,48

Birim hacim ağırlık deneylerinde değişken sadece yüksek fırın cürufu olduğundan, cürufun özgül ağırlığının çimentoya göre düşük oluşu sonuçlar üzerinde etkili olmuştur.

Silindirle sıkıştırılmış beton numunelerinin su emme yüzdeleri Çizelge 7'de verilmiştir. Üretilen silindirle sıkıştırılmış betonların su emme yüzdeleri birbirine yakın değerler almıştır. Yüksek fırın cürufu kullanımını arttıkça, SSB numunelerinin su emme yüzdelerinde az miktarda dahi olsa azalma meydana gelmiştir. Su emme yüzdelerindeki azalma miktarları, S0 kodlu karışıma kıyasla S10, S20 ve S30 kodlu karışımlarda sırasıyla %0,5, %1 ve %1,4 olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu kullanımının SSB örneklerinde sıkıştırılabilirlik yüzdesini arttırması, su emme yüzdelerinde azalmaya neden olmuştur.

Aghaeipour ve Madhkhan (2017), yapmış oldukları çalışmada, SSB karışımlarında kullandıkları yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça, su emme yüzdelerinin azaldığını tespit etmişlerdir; elde edilen neticeler, bu çalışmada elde edilen sonucu destekler niteliktedir.

**Çizelge 7.** Su emme yüzdesi.

*Table 7. Water absorption*

Karışım kodu	Su emme (%)
S0	6,37
S10	6,36
S20	6,30
S30	6,28

Ultras ses geçiş hızının ölçülmesi, tahribatsız bir deney yöntemi olup ölçüm yapılan nokta, karışımda kullanılan malzemenin özellikleri, betonun boşluk yapısı, ölçüm yapılan malzemenin nem içeriği ve sıkıştırma yönü gibi parametrelerden etkilenebilmektedir. Ultras ses geçiş hızı, betondaki boşluk miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Betondaki boşluk miktarı arttıkça, ultras ses geçiş hızı azalmaktadır. Betonun basınç dayanımı da boşluk oranından etkilendiğinden, betona zarar vermeden basınç dayanımı hakkında fikir sahibi olabilmek açısından ultras ses geçiş hızının belirlenmesi yarar sağlamaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış 28 günlük yüzey kuru suya doymun durumdaki betonların ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerleri Çizelge 8’de verilmiştir.

**Çizelge 8.** Ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü

*Table 8. Ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity*

Karışım kodu	Ultrases geçiş hızı (km/s)	Dinamik elastisite modülü (GPa)
S0	4,62	34,70
S10	4,70	39,09
S20	4,65	35,83
S30	4,63	35,21

Çizelge 8 incelendiğinde, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerlerinin, cüruf kullanılmayan S0 kodlu karışıma kıyasla %10, %20 ve %30 oranlarında cüruf kullanılan S10, S20 ve S30 kodlu karışımlarda yükseldiği görülmektedir. Cüruf kullanılan S10, S20 ve S30 kodlu karışımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, karışımlardaki cüruf oranı arttıkça, ultrases geçiş hızı değerlerinde ve dinamik elastisite modülü değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

S0 kodlu karışıma kıyasla S10, S20 ve S30 kodlu cüruf kullanılan karışımlarda, ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla %1,7, %0,64 ve %0,21, dinamik elastisite modülü değerleri ise sırasıyla %12,65, %3,25 ve %1,47 oranlarında artmıştır.

Standart küp SSB numunelerin 3 ve 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 9’da verilmiştir. Yüksek fırın cürufu kullanımıyla referans numuneye göre erken yaş dayanımlarında azalma meydana gelirken, ilerleyen yaş dayanımlarında artma gerçekleşmiştir. Bu sonucun elde edilmesinde puzolanik reaksiyonun çimentonun hidrasyonuna göre yavaş gerçekleşen bir reaksiyon olmasının etkisi bulunmaktadır. Sıkıştırma işlemi sonunda betonlardaki hava boşluğu miktarının ve betonun porozitesinin de dayanım sonuçları üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

**Çizelge 9.** 3 ve 28 günlük basınç dayanımları (MPa)

*Table 9. Compressive strengths at the ages of 3 and 28 days (MPa)*

Karışım kodu	3 günlük	28 günlük
S0	34,1	39,9
S10	31,9	43,5
S20	27,3	43,3
S30	26,8	42,4

Cüruf kullanılan karışımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, karışımlardaki cüruf oranı arttıkça dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Cüruf kullanılmayan S0 kodlu karışıma kıyasla S10, S20 ve S30 kodlu cüruf kullanılan karışımlarda, 3 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla %6,45, %19,94 ve %21,41 oranlarında azalmış, 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise sırasıyla %9, %8,5 ve %6,2 oranlarında artmıştır.

%10 cüruf kullanımıyla, referans betona göre sıkıştırılabilme yüzdesi ve işlenebilirlik artmış, boşluk miktarı azalmıştır. Bu durum, betonun mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Öte yandan cüruf miktarı %10’dan daha fazla arttırıldığında, çimento dozajının azalması bu iyileşmenin önüne geçmiş, beton basınç dayanımı, boşluk oranı ve dinamik elastisite modülü gibi özellikler olumsuz yönde etkilenmeye başlamıştır.

Aghaeipour ve Madhkhani (2017), silindirle sıkıştırılmış betonlarda %0, 20, 40 ve 60 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanarak yapmış oldukları çalışmada, 28 günlük beton basınç dayanımlarında en yüksek değeri %40 yüksek fırın cürufu kullanımıyla elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise en yüksek 28 günlük basınç dayanımı değerleri, %10 cüruf kullanımıyla elde edilmiştir, karışım tasarımının ve kullanılan malzeme özelliklerinin sonuçlar üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

## SONUÇ (CONCLUSION)

DeneySEL çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yüksek fırın cürufu kullanımıyla işlenebilirlik olumlu yönde etkilenmiştir. Sıkıştırılabilme yüzdesi ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında cüruf kullanılan karışımlarda, referans numuneye göre sırasıyla %13,05, %19,98 ve %33,30 oranlarında artmıştır.
- Yüksek fırın cürufu kullanılması, SSB numunelerinin birim hacim ağırlık ve su emme değerlerinde azalmaya neden olmuştur.
- Ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerleri cüruf kullanımı ile artmıştır. Karışımdaki cüruf oranı arttıkça, ultrases geçiş hızı ve dinamik elastisite modülü değerlerindeki artış miktarında azalma meydana gelmiştir.
- Yüksek fırın cürufu ikamesi erken yaş beton basınç dayanımlarında azalmaya neden olurken ilerleyen yaş basınç dayanımlarında artış sağlamıştır. Cüruf kullanılan karışımlar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, karışımdaki cüruf oranı arttıkça dayanım değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür.
- Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, 28 günlük beton basınç dayanımlarında en yüksek değerler %10 yüksek fırın cürufu ikamesiyle elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufu katkı karışımlar arasında, en yüksek 3 günlük beton basınç dayanımı, yine %10 cüruf içeren numunelerde görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aghaeipour, A., Madhkhan, M., 2017, "Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability", *Construction and Building Materials*, Cilt 141, ss. 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019>.
- Albuquerque, M. C. F., Balbo, J. T., Sansone, E. C., Pinto, P. C., 2011, "Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand", *International Journal of Pavement Research and Technology*, Cilt 4, Sayı 4, ss. 244–251. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2011.4\(4\).244](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2011.4(4).244)
- ASTM C597-16, 2016, "Standard test method for pulse velocity through concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1435/1435M-20, 2020, "Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer", American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA.
- BSI, 2011, "Methods of test for masonry units part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units (EN 772-11)", BSI Stand. Publ., London, UK.
- Chhorn, C., Lee, S. W., 2017, "Consistency control of roller-compacted concrete for pavement", *KSCE J Civ Eng*, Sayı 21, ss. 1757–1763. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0820-y>
- Dareyni, M., Mohammadzadeh Moghaddam, A., Delarami, A., 2018, "Effect of cationic asphalt emulsion as an admixture on transport properties of roller-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, Sayı 163, ss. 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.156>
- Engin, Y., Gökalp, İ., Önkol, E., Ağaç, H., Ekim, H., 2019, "Türkiye’de silindirle sıkıştırılmış beton yol uygulamaları", *Hazır Beton*, Eylül-Ekim 2019, ss. 69–75.
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V., Ceylan, H., Bektas, F., 2010, "Guide for roller-compacted concrete pavements".
- Hashemi, M., Shafigh, P., Asadi, I., Mahpour, A., Samadian, A., 2020, "The effect of superplasticizer admixture on the engineering characteristics of roller-compacted concrete pavement", *International Journal of Pavement Engineering*, ss. 1–16. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1858483>

- Hazaree, C. V., 2010, "Workability and strength attributes of RCC: Effects of different chemical admixtures and resulting paste", *Graduate Theses and Dissertations*, 11250. <https://lib.dr.iastate.edu/etd/11250>
- Hazaree, C. V., Ceylan, H., Taylor, P., Gopalakrishnan, K., Wang, K., Bektas, F., 2013, "Use of Chemical Admixtures in Roller-Compacted Concrete for Pavements", *In Trans Project Reports*, 57. [https://lib.dr.iastate.edu/intrans\\_reports/57](https://lib.dr.iastate.edu/intrans_reports/57)
- Karimpour, A., 2010, "Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS)", *Construction and Building Materials*, Cilt 24, Sayı 11, ss. 2079–2083. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.054>
- KGM, 2016, "Beton Yollar Teknik Şartnamesi", Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kılıç, İ., Gök, S. G., 2021a, "Silindirle sıkıştırılmış betonlarda su çimento oranının etkileri", *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (Dicle University Journal of Institute of Natural and Applied Science)*, Cilt 10, Sayı 1, ss. 73–84.
- Kılıç, İ., Gök, S. G., 2021b, "A study on investigating the properties of alkali-activated roller compacted concretes", *Advances in Concrete Construction*, Cilt 12, Sayı 2, ss. 117–123. <http://dx.doi.org/10.12989/acc.2021.12.2.117>
- Kılıç, İ., Gök, S. G., 2021c, "Strength and durability of roller compacted concrete with different types and addition rates of polypropylene fibers", *Revista de La Construcción*, Cilt 20, Sayı 2, ss. 205–214. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.2.205>
- Mardani, A., Bayqra, S. H., Özen, S., Faqiri, Z. A., Ramyar, K., 2020, "Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarında kullanılan malzemelerin özellikleri", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, Cilt 12, Sayı 1, ss. 61–72.
- Modarres, A., Hosseini, Z., 2014, "Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material", *Materials and Design*, Sayı 64, ss. 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.072>
- Pektaş, M. R., 2015, "Silindirle sıkıştırılabilen yol betonlarının kalıcılık özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi-Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye.
- Shen, L., Li, Q., Ge, W., Xu, S., 2020, "The mechanical property and frost resistance of roller compacted concrete by mixing silica fume and limestone powder: Experimental study", *Construction and Building Materials*, Sayı 239, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117882>
- Şengün, E., Aykutlu, M. A., Yaman, İ. Ö., 2017, "Silindirle sıkıştırılmış beton yollar üzerine güncel bir tarama - bölüm 1: Özellikleri ve karışım tasarımı", *Çimento ve Beton Dünyası*, Sayı 120, Kasım-Aralık 2017, ss. 93–114.
- TÇMB, 2018, "Silindirle sıkıştırılmış beton yollar teknik şartnamesi", Ankara.
- Topçu, İ. B., 2013, "High-volume ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete", in *Eco-Efficient Concrete, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, ss. 218–240. <https://doi.org/10.1533/9780857098993.2.218>
- TS 802, 2016, "Beton karışım tasarımı hesap esasları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012, "Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini-Elleme yöntemi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013, "Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2019, "Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019, "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Sertleşmiş beton deney numunelerinde basınç dayanımının tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 15167-1, 2006, "Öğütülmüş yüksek fırın cürufu-Beton, harç ve şerbette kullanım için-Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Url-1, <http://www.tracim.com.tr/?sayfa=urunler>, ziyaret tarihi: 08 Eylül 2021.
- Url-2, <http://www.bolucimento.com.tr/documents/bolu-ogutulmus-yuksekk-firin-curufle.html>, ziyaret tarihi: 10 Temmuz 2021.



- Yazıcı, Ş., 2008, "Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB)".  
<https://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/14954.pdf>
- Yetim, E., Yılmaz, D., 2019, "Beton yollar ve silindirle sıkıştırılmış betonun Türkiye'deki yeni uygulama alanı".  
<https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/makale---beton-yollar-9-eylul-2019-20191220130448.pdf>



## KOCAELİ-GEBZE TAVŞANLI BÖLGESİ KİREÇTAŞLARININ BETON AGREGASI OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Hüseyin AKYILDIRIM , <sup>2</sup>Ahmet KARAKAŞ 

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE

<sup>1</sup>akyildirimh@gmail.com, <sup>2</sup>akarakas@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 26.04.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 24.11.2021)

**ÖZ:** Bu çalışmada, Kocaeli - Gebze Tavşanlı bölgesinde geniş yayılım gösteren Triyas yaşlı kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. Kırmataş ocağının mostrasından alınan kaya numunelerinin jeolojik ve petrografik özelliklerinin yanı sıra kırma eleme tesislerinde kaya numuneleri boyut küçültme ve sınıflandırma işlemine tabii tutulması ile elde edilen agrega numunelerinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri standart agrega deneyleri yapılarak incelenmiştir. Ayrıca agrega özelliklerinin betona etkisini araştırmak amacıyla beton deneyleri yapılarak normal dayanımlı betonda agrega olarak kullanılabilirlikleri araştırılmıştır. İncelenen kireçtaşı agregalarının petrografik özelliklerinin yanı sıra agrega özellikleri ve beton deneyleri sonucunun standartlarda belirtilen kabul edilebilir limitler aralığında bulunması nedeniyle beton agregası olarak kullanılmaları uygundur.

**Anahtar Kelimeler:** Kireçtaşı, Agrega Özellikleri, Beton Agregası

### Limestones of Kocaeli-Gebze Tavşanlı Region Investigation of Usage as Concrete Aggregate

**ABSTRACT:** In this study, the usability of Triassic aged limestones, which are widely distributed in Kocaeli - Gebze Tavşanlı region, as concrete aggregate was investigated. In addition to the geological and petrographic properties of the rock samples taken from the outcrop of the crushed stone quarry, the chemical, physical and mechanical properties of the aggregate samples obtained by subjecting the rock samples to size reduction and classification in crushing and screening plants were investigated by performing standard aggregate tests. In addition, in order to investigate the effect of aggregate properties on concrete, concrete experiments were carried out and their use as aggregate in normal strength concrete was investigated. In addition to the petrographic properties of the examined limestone aggregates, it is appropriate to use them as concrete aggregate because the aggregate properties and concrete test results are within the acceptable limits specified in the standards.

**Key Words:** Limestone, Aggregate Properties, Concrete Aggregate

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton üretiminde, kırmataş ocaklarında kireçtaşlarından üretilen agregalar yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle yapılaşmanın hızla arttığı Kocaeli ve İstanbul'da beton ve dolayısıyla agrega ihtiyacı oldukça fazladır. Artan şehirleşme hızı ile birlikte daha yüksek veya daha geniş kapasiteli yapılara yönelim olmaktadır. Yapıların güvenliği için beton kalitesi çok önemlidir. Agregalar, beton hacminin yaklaşık %75'ini oluşturduğundan kaliteli beton üretimi için önemli bir bileşendir (Erdoğan, 2003).

Gelişen teknoloji ile birlikte beton üretiminde agrega seçiminin önemi artmaktadır. Çünkü su/çimento oranını belirleyen agreganın kalitesi olduğu için iyi agregadan iyi bir beton üretimi yapılabilir. Gelişen teknoloji ile birlikte beton üretiminde agrega seçiminin önemi artmaktadır. Çünkü su/çimento oranını belirleyen agreganın kalitesi olduğu için iyi agregadan iyi bir beton üretimi yapılabilir.

Kireçtaşı, bazalt ve kumtaşı gibi hammadde ocaklarından delme-patlatma yöntemiyle gevşetilen kayaların kırma eleme tesislerinde boyut küçültme ve sınıflandırma işlemine tabii tutulması neticesinde agrega elde edilir. Ülkemizde agrega üretimi doğal kum-çakıl ocaklarından yani akarsu yataklarından, alüvyon deltalarından ve doğal taş ocaklarından yapılmaktadır. Günümüzde ise agrega üretimi olarak taş ocakları faaliyetleri her geçen gün artmaktadır. Agregalar; betonun hammaddesini oluşturan kum, çakıl ve kırmataş karışımından oluşan organik olmayan malzemelerdir. Su, çimento ve kimyasal katkı ile uygun oranda karıştırıldığında beton elde edilmektedir. Agregalar beton malzemesi, dolgu ve ıslah malzemesi, yol inşaatlarında asfalt ve temel malzemesi olarak yaygın kullanılmaktadır.

Farklı agrega türleri üzerinde araştırmalar yapan Gutierrez ve Canovas (1996), Taşdemir (1998) ve Poitevin (1999); betonun kıvamını etkileyen temel agrega özelliğinin su emme, diğer özelliklerin ise; tane şekli, tane boyu dağılımı, en büyük tane boyutu olduğunu vurgulamıştır. Poitevin (1999) ayrıca kireçtaşlarının betonda kullanılabilirliklerinin en önemli ölçütlerinden birinin Los Angeles parçalanma oranı olduğunu belirtmiştir (Güler ve diğ., 2010). Al-Jassar ve Hawkins (1991); kireçtaşlarının kimyasal ve petrografik özelliklerini araştırarak kireçtaşlarının litolojilerinin basınç ve alkali karbonat reaksiyonuna etkisini incelemiştir. Williams ve Mc Namara (1992); farklı özelliklere sahip kireçtaşları üzerinde yapılan çalışmalar ile kireçtaşlarının bileşim farklılığının dayanım özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Uribe-Afif (1994); kireçtaşlarının beton agregası özelliğini araştırdığı çalışmada kireçtaşlarında meydana gelen ayrışmaların agrega kalitesini etkilediğini ve ayrışma sonucu oluşan ince agreganın betonun dayanımını düşürdüğünü ifade etmiştir (Arsoy ve diğ., 2018).

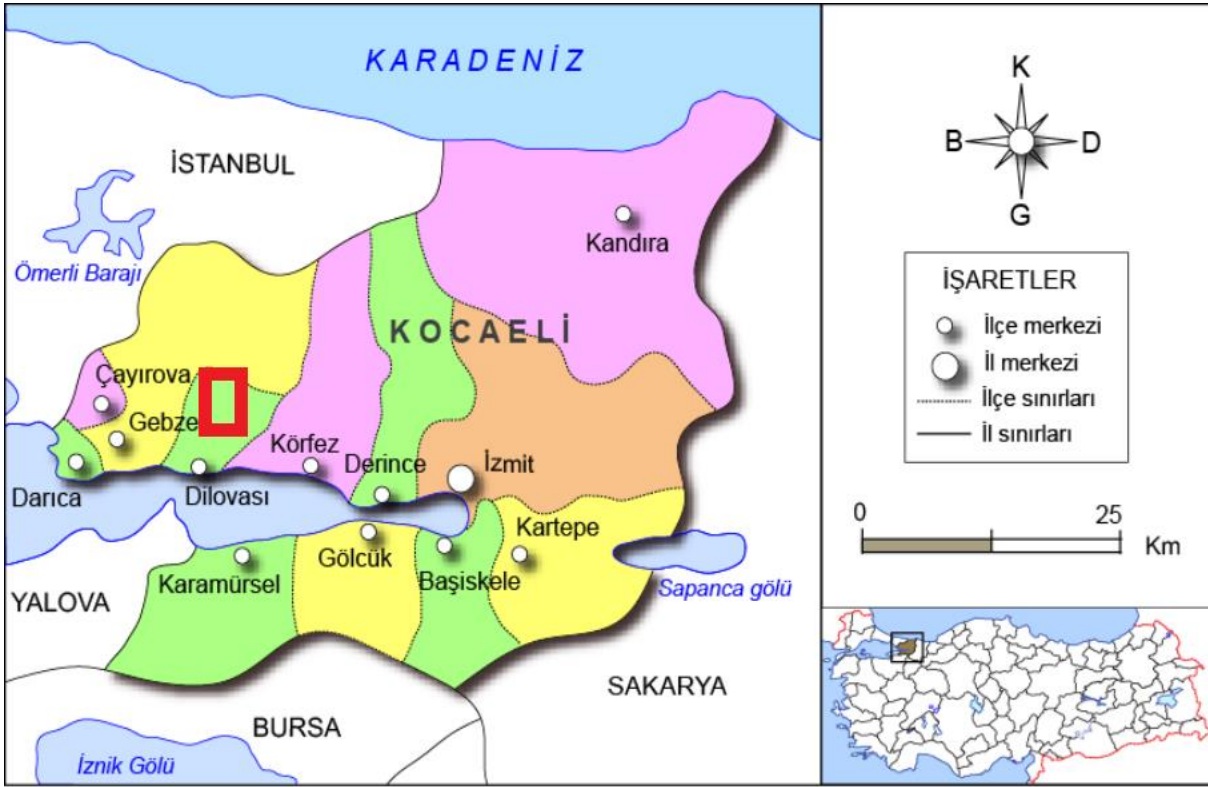
Zarif ve diğ. (2003); İstanbul'daki kireçtaşlarının agrega kalitesi yönünden değerlendirilmesini yaptıkları çalışmalarında kireçtaşlarının bileşim ve dokusal olarak farklılıkları üzerinde durmuşlar ve bu değişik özellikteki kireçtaşlarının agrega olarak kullanılabilirliklerini araştırmışlardır. Keskin (2011); İstanbul'un Avrupa yakasındaki, Ayazağa bölgesinde yer alan Cendere vadisi kayaları beton agregası olarak araştırmıştır. Çalışmada beton agregalarının uygunluğu değerlendirirken agregaların fiziksel, kimyasal, mineralojik-petrografik özellikleri ve alkali agrega reaksiyon riski özelliklerinin bir arada değerlendirilmesi gerektiğinin önemi vurgulanmıştır. Gürsel ve Erenson (2017); 24 farklı kayaç türü ve petrografik özelliklerinin yüksek dayanımlı beton üretiminde etkisini araştırdıkları çalışmada, agregaların kayaç petrografik özelliklerinin agrega kalitesi hakkında ön bilgi verse de yüksek dayanımlı betonlarda kullanılacak agregalar için tek başına agrega kalitesini belirleme de yeterli olmadığını vurgulamışlardır.

Günümüzde, Kocaeli ve İstanbul'da kireçtaşlarından üretilen agregalar yoğun bir şekilde beton yapımında kullanılmaktadır. Kireçtaşları, yaygın bulunması ve çimento ile aderansının diğer kayalara göre daha iyi olması nedeni ile farklı bir öneme sahiptir. Bu çalışmada Kocaeli ve İstanbul'un agrega ihtiyacını gideren Kocaeli – Gebze İlçesi, Tavşanlı Bölgesi'ndeki kireçtaşı ocağında üretilen agregaların beton üretimi için uygunluğu araştırılmıştır. Çalışma alanından alınan kayaç numunelerinin mineralojik ve petrografik özellikleri incelenerek detaylı kayaç analizi yapılmış bu özelliklerle birlikte standart agrega ve beton deneyleri ile kireçtaşlarının beton agregası olabirlikleri, silis mineral içeren kireçtaşı agregalarına ise hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi uygulanarak alkali silika reaksiyon riskinin belirlenmesi ile betonda kullanımının uygunluğu araştırılmıştır.

## İNCELEME ALANI (INVESTIGATION AREA)

İnceleme alanı içerisinde yer alan özel bir maden firması tarafından işletilmekte olan kireçtaşı ocakları Kocaeli – Gebze İlçesi, Tavşanlı Köyü Suçukan Deresi mevkiinde bulunmaktadır. Çalışma alanı İstanbul – İzmit E5 Devlet Karayolu'nun kuzeyinde, Kocaeli ili Gebze İlçesi'nin kuzeydoğusunda olup İstanbul'a 60 km mesafe uzaklıktadır (Şekil 1).

İncelenen taş ocağı, kireçtaşlarının yayılım gösterdiği Taşkaldıran Alçağı ile Suçuktı Deresi'nin batı ve doğu yamaçlarında yer almaktadır. Bölge, Jeolojik süreçlerde aşınmaya maruz kaldığından engebeli bir morfolojiye sahiptir.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

Figure 1. Location map of the study area

## İNCELEME ALANININ JEOLJİSİ (GEOLOGY OF THE INVESTIGATION AREA)

İncelenen agrega ocağında ağırlıklı olarak Hereke Formasyonuna ait kireçtaşları seviyelerinden kırmataş agrega üretilmektedir. Kireçtaşları yoğun, masif görünümlü, ince – orta taneli ve gri, mavimsi gri renklidir (Şekil 2). Karstlaşma nedeniyle tabaka ve çatlaklarda erime boşlukları gelişmiş olup bu boşlukları birimde aralıklarla yer alan kırmızı renkli kil ve silt malzemeleri doldurmuştur (Halili ve Gözübol, 1999). Bölgede; Paleozoyik, Mesozoyik ve Senozoyik yaşlı sedimanter formasyon ve birimler yer almaktadır. Triyas yaşlı birimler Karbonifer serileri üzerine transgresif olarak açılı bir uyumsuzlukla gelirler. Hereke dolayındaki Triyas yaşlı birimler; Kapaklı, Erikli, Hereke ve Tepecik formasyonları olarak adlandırılmıştır. Kretase'yi ise Kutluca ve Şemsettin formasyonları temsil etmektedir (Şekil 3).

Karbonifer yaşlı seriler üzerine açılı bir uyumsuzlukla gelen Alt Triyas yaşlı Kapaklı formasyonu kötü boylanmalı genellikle iri çakıllar içeren taban çakıltaşı ile başlar. Üstte doğru taneleri incelen kötü boylanmalı, az yuvarlaklaşmış, ince-kalın çapraz tabakalı karasal akarsu çökellerinden oluşan kumtaşları içerir. Kapaklı formasyonunun üzerine uyumsuz olarak gelen Alt Triyas yaşlı Erikli formasyonu, tabanda sarı kumtaşı olup üst kısımlarda kumlu kireçtaşına geçiş göstermektedir. Beyazımsı, sarı olan kumlu kireçtaşı taneli dokuya sahiptir. Üst kesimlerine doğru çok ince taneli olup alacalı pembe bir renk kazanmaktadır. Erikli formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen Alt-Orta Triyas yaşlı Hereke formasyonu beyazımsı-koyu, gri ve mavimsi gri kireçtaşlarından oluşur. Çok ince, ince-orta ve kalın tabakalardan oluşan birim dolomitik seviyeleri de içinde bulundurmaktadır. Bölgenin maruz kaldığı tektonizma sebebiyle Hereke formasyonu kıvrılmış, kırılmış ve faylanmıştır. Bu hareketler sonucu doğan gerilmeler kireçtaşında bir takım fay ve kırıklara neden olmuştur. Faylanmalar ile oluşan ezik zonlar boyunca ayrışma olayları ileri derecede etkili olmuştur. Derinlere inen topraklaşma ve karstlaşma olayları ile de formasyon yerel olarak zayıf, dayanıksız, ezik ve bozuk bir malzeme özelliği kazanmıştır (Eren ve diğ., 1996). Hereke Formasyonunun üzerine uyumsuzlukla gelen Üst Triyas yaşlı Tepecik formasyonu

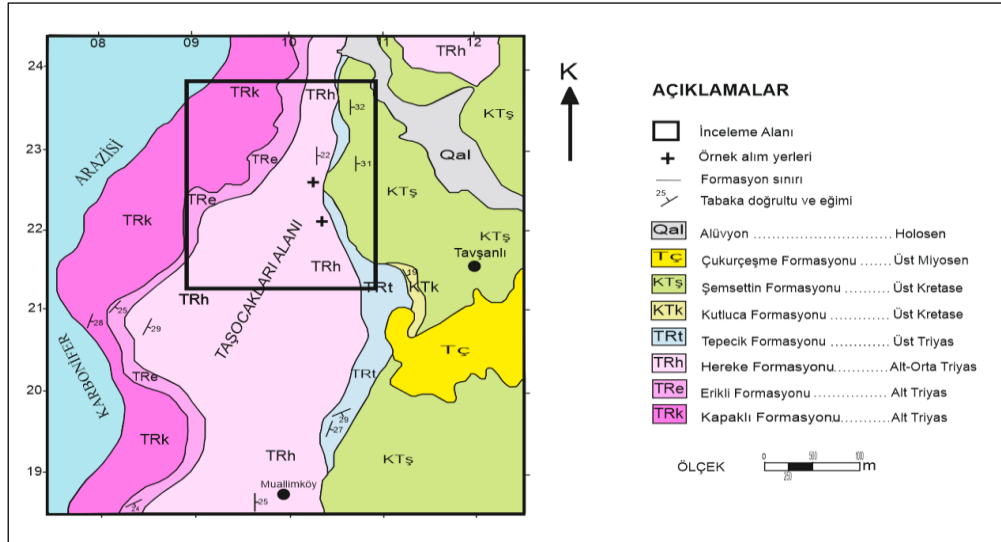
beyazımsı krem şeyllerden oluşur. Tabanda boz olan ve giderek kırmızımsı renk alan ince-orta tabakalı kireçtaşı ile başlayıp üste doğru boz- krem şeyl-kireçtaşı-kumtaşı ardalanması şeklinde devam etmektedir.



Şekil 2. Hereke Formasyonun kireçtaşı seviyeleri

Figure 2. Limestone levels of the Hereke Formation

Triyas serileri, Kretase birimleri üzerine bindirmiş olarak görülürler. Kretase'yi tabanda bol Rudistli ve Bentik foraminiferli kıyı karbonatları olan Kutluca Formasyonu (Eep, 1987) ile aglomera-kumtaşı ve çamurtaşlarından oluşan Şemsettin Formasyonları temsil eder (Eren ve diğ., 1996). İnceleme alanında en üst seviyelerde çakıl ve kumdan oluşan Çukurçeşme formasyonu (Sayar, 1976) ile akarsu yataklarında çakıl, kum, kil ve silt gibi malzemelerinden oluşan alüvyon görülmektedir.



Şekil 3. İnceleme alanının jeoloji haritası (Eren ve diğ., 1996)

Figure 3. Geological map of the study area

## MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada kullanılan kireçtaşı örnekleri Kocaeli – Gebze İlçesi Tavşanlı Köyü bölgesinde faaliyet gösteren kırmataş ocağından temin edilmiştir (Şekil 4). Alınan kireçtaşları ile agrega üretiminin yapıldığı kırma-eleme tesislerinden standartta belirtilen agrega boyutlarına göre agrega numuneleri alınmıştır.

Deneylerde kullanılan kireçtaşı agregalarının özelliklerini belirlemek amacıyla mineralojik, petrografik ve kimyasal analiz (XRF) yapılmıştır. Mineralojik ve petrografik tanımlamalar amacıyla kırmataş ocaklarında üretilen kireçtaşlarının farklı lokasyonlarından iki adet kayaç-numunesi alınarak makroskobik özellikleri belirlenmiş, el örneklerinden ince kesitler hazırlanarak polarizan mikroskobu ile mikroskobik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca optik mikroskobik analiz yöntemiyle mineralojik bileşimleri tanımlanamayacak nitelikte olan numuneler toz haline getirilerek XRD (X- Işını) yöntemiyle standartlara uygun olarak ayrıntılı mineralojik tanımlamalar yapılmıştır.



Şekil 4. Gebze kırmataş ocağı ve kireçtaşların görünümü

Figure 4. Gebze crushed stone quarry and view of limestones

Gebze kırmataş ocağından alınan agrega numuneleri deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı fraksiyonda sınıflara ayrılmıştır (kuru ve yıkanmış (0-4 mm) ince agrega ve kırmataş 1 (4-12 mm) ve kırmataş 2 (12-22 mm) iri agrega). Beton agregası olarak kullanılabilirliği incelenen kireçtaşı agregalarının TS 706 EN 12620 (2003) Standardına uygun olup olmadığını incelemek amacıyla yapılan deney ve analizler Çizelge 1’ de verilmiştir.

Çizelge 1. Yapılan deneyler ve ilgili standartlar

Table 1. Tests and related standards

Deneylerin Adı	Deney Standartları
Kimyasal analizler: Asitte çözülen sülfat, Toplam kükürt, Klorür oranı	TS EN 1744-1+A1 (2013)
Tane büyüklüğü dağılımı tayini	TS EN 933-1 (2012)
Çok ince malzeme muhtevası	TS EN 933-1 (2012)
Metilen mavisi deneyi	TS EN 933-9+A1 (2014)
Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini	TS EN 1097-6 (2013)
Yassılık endeksi	TS EN 933-3 (2012)
Los Angeles parçalanma dayanımı	TS EN 1097-2 (2010)
Mikro-Deval aşınma dayanımı	TS EN 1097-1 (2011)
Alkali-Silika reaktivitesi	ASTM C 1260-14 (2014)
Betonun çökme deneyi	TS EN 12350-2 (2019)
Betonun birim ağırlığı	TS EN 12350-6 (2019)
Betonun serbest basınç dayanımı	TS EN 12390-3 (2019)

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Beton içinde hacimsel olarak %75 oranında yer işgal eden agregaya önemli bir bileşendir. Bu oranın yüksek olması, agregaların hammaddesinin kayalardan oluşması ve betonda diğer önemli bileşen olan bağlayıcı malzemesinin kayalardan elde edilmesi nedeniyle beton, petrografik açıdan kayalara oldukça benzemektedir. Beton tasarımı yaparken agreganın hangi hammadde (kayaç) den elde edildiğinin önemine vurgu yapmak için çalışma alanında yer alan kireçtaşlarının mineralojik ve petrografik özellikleri incelenerek detaylı kayaç analizi yapılmıştır. İncelenen kireçtaşlarının kimyasal analiz ile ana oksit yüzdeleri ve bu yüzdeler kullanarak kireçtaşlarının saflık dereceleri verilmiştir (Çizelge 3). Bölgede bulunan kırmataş üretim tesislerinden elde edilen farklı boyutlardaki kırma kum, yıkanmış kırma kum, kırmataş 1 ve kırmataş 2 olarak tanımlanan agregaların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri standart agregaya deneyleri ile belirlenmiştir. İncelenen kireçtaşlarından hazırlanan agregaların beton özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla laboratuvarında deneme betonları üretilmiştir. Taze betonda çökme ve birim ağırlık, sertleşmiş beton üzerinde ise 2, 7 ve 28 günlük yaşlar sonrası basınç dayanımı belirlenmiştir. Ayrıca kireçtaşlarının ana oksit yüzdelerine göre; kireçtaşı ve saf olmayan kireçtaşı olarak adlandırılan ve silisli mineral içeren kireçtaşı agregaları ile hızlandırılmış harç çubuğu yöntemi uygulanarak alkali silika reaksiyon riski belirlenmiştir.

## BULGULAR (RESULTS)

### Kireçtaşlarının Mineralojik ve Petrografik Özellikleri (Mineralogical and petrographic properties of limestones)

Çalışma alanındaki kırmataş ocaklarında üretilen kireçtaşlarının mineralojik ve petrografik özelliklerini belirlemek için el örneklerinden ince kesitler hazırlanarak polarizan mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır. Kireçtaşları; bileşenlerinin yaklaşık yüzde oranları kullanılarak Folk (1962)'e göre "oomikritik kireçtaşı" ve "yarı mikritik-fosilli kireçtaşı" olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca kireçtaşlarının mineralojik ve petrografik özellikleri modal analizi yapılarak Çizelge 2'de sunulmuştur.

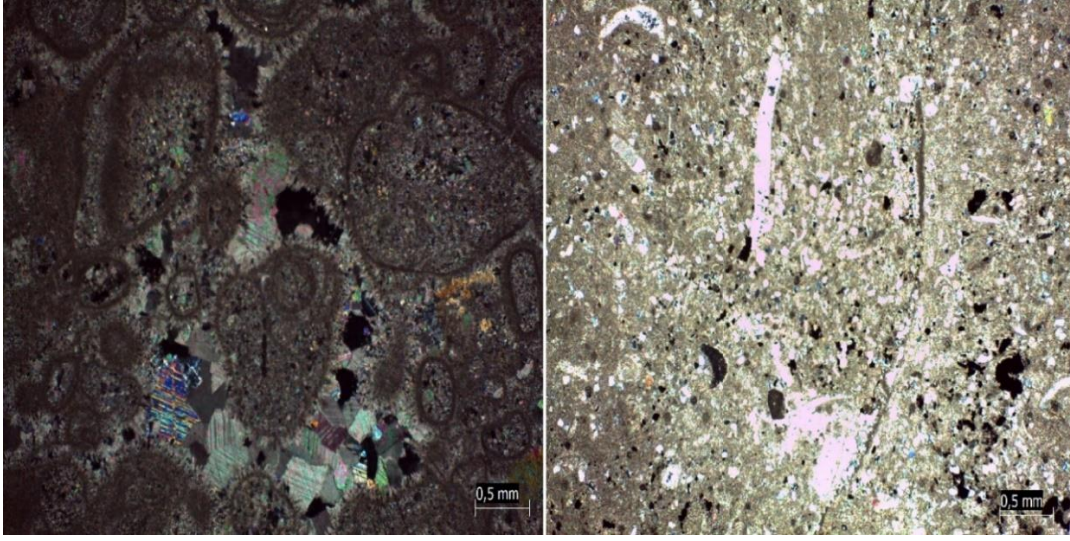
**Çizelge 2.** Hereke Formasyonuna ait kireçtaşının petrografik özellikleri (Folk, 1962)

*Table 2. Petrographic properties of limestone belonging to the Hereke Formation*

Numune Kodu	Renk	Bileşenler	Tane Boyutu	Doku	Sınıflama
KRÇ-1	Açık Gri N7*	% 90,0 Kalsit (CaCO <sub>3</sub> ) % 3,14 Ankerit (Ca(Fe,Mg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) % 6,66 Nontronit (Ca <sub>0.5</sub> Na) <sub>0.3</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O))	İnce-orta	Kırıntılı doku	Oomikritik Kireçtaşı
KRÇ-2	Soluk Mavi 5PB 7/2*	% 88,0 Kalsit (CaCO <sub>3</sub> ) % 12,0 Kuvars (SiO <sub>2</sub> )	Orta	Kırıntılı doku	Yarı mikritik-fosilli Kireçtaşı

\*Geological Rock – Color Chart (2009)

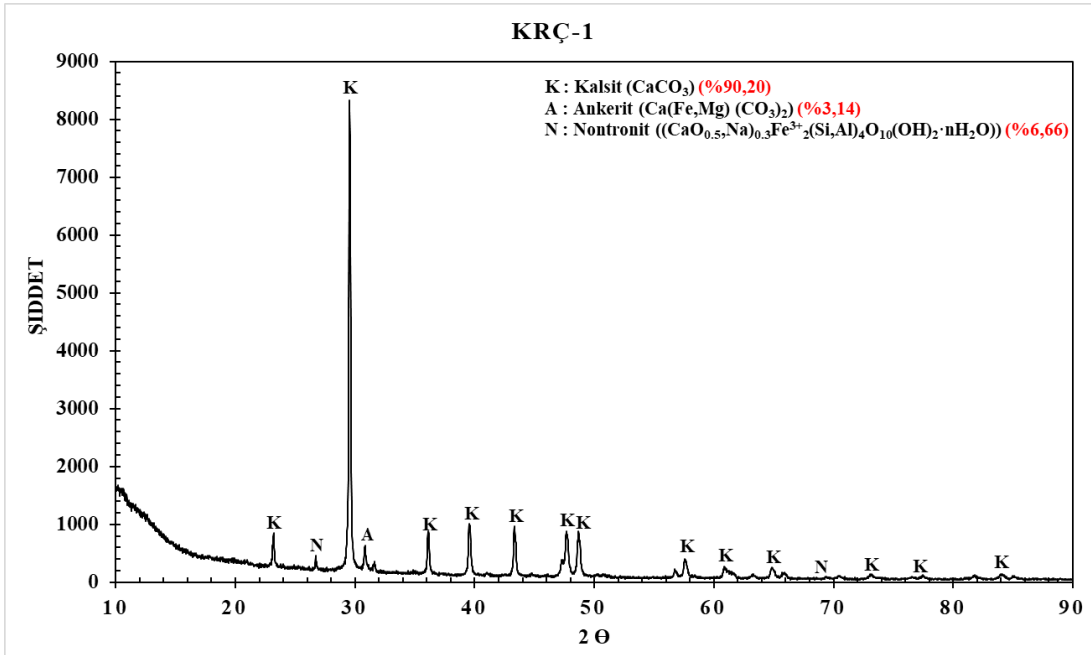
KRÇ1 numunesi genel olarak kalsitten ibaret oolit ve karbonat çamurlarının mikritik nitelikte bir bağlayıcı malzeme ile bağlandığı görülmektedir (Şekil 5). KRÇ2 numunesi ise çok fazla altere olduğu için karbonat çamuru içerisinde kil mineralleri, küçük kalsit mineralleri, mikro fosil ve kavkıları, kuvars ve opak minerallerinden oluşmaktadır. İncelenen kayaçların ana bileşenleri kalsit, kuvars ve mikro fosil ve kavkılarıdır. Dokusal olarak kırıntılı bir doku görünümündedir. Kalsit taneleri birincil (mikritik kalsit) ve daha iri boyutlu ikincil kalsitler olmak üzere iki türden oluşmaktadır. Kayaçların çoğunlukla karbonatlı minerallerden (kalsit) oluştuğu görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Kireçtaşlarının ince kesit görünümleri (Çift nikol)

Figure 5. Thin section view of limestones (Pair Nicol)

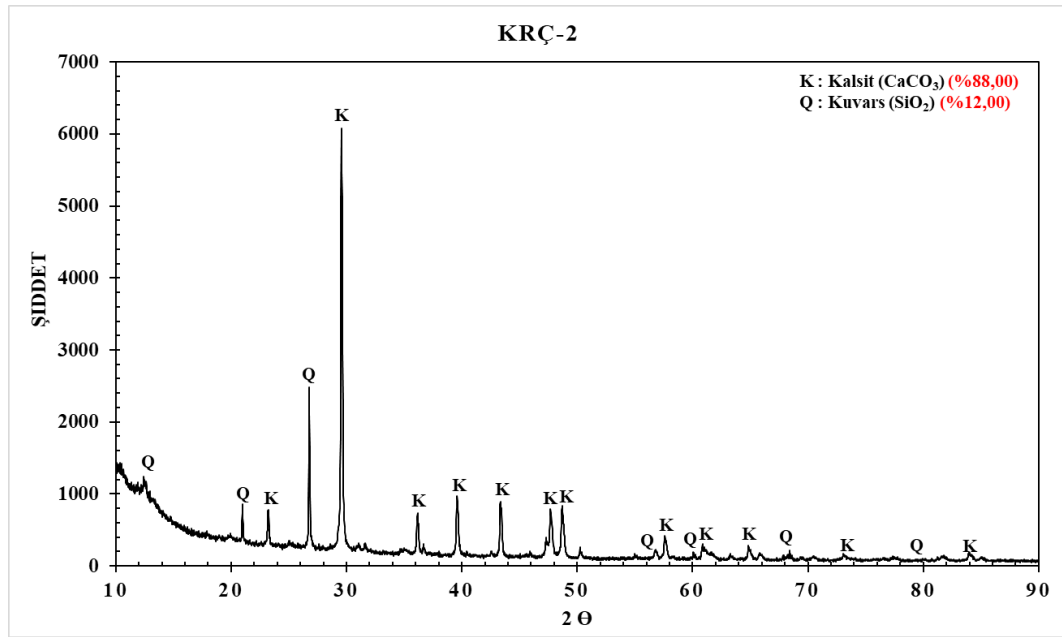
İncelenen iki kireçtaşı numunesinin XRD analiz sonucu Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir. XRD analizi sonucunda kireçtaşlarının büyük oranda kalsit ve kuvars minerallerinden meydana geldiği belirlenmiştir. Bunlara ek olarak dolomite benzer koşullarda oluşan ankerit minerali ve simektit grubu kil minerali olan nontronit mineralleri tespit edilmiştir.



Şekil 6. KRÇ-1 numunesine ait XRD grafiği ve içeriği oluşturan minerallerin % dağılımı

Figure 6. The XRD graph of the KRÇ-1 sample and the % distribution of the minerals that make up the content





**Şekil 7.** KRÇ-2 numunesine ait XRD grafiği ve içeriği oluşturan minerallerin % dağılımı  
*Figure 7. The XRD graph of the KRÇ-2 sample and the % distribution of the minerals that make up the content*

### Kireçtaşlarının Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of Limestones)

Kireçtaşlarının içerdiği ana element oksit bileşiklerini belirlemek amacıyla yapılan 2 adet kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. Bu çizelgeye göre kireçtaşlarında CaO %42.73-50.09, A.Z (Ateş Zayıtı) % 35.55 - 42.78 arasında değişmektedir. Kimyasal analiz verilerine göre, incelenen KRÇ1 numunesi CaO miktarı %50'den fazla ve MgO miktarı %2'den az olduğu için kireçtaşı, KRÇ2 ise CaO miktarı %50'den ve MgO miktarı %2'den az olması sebebiyle saf olmayan kireçtaşı olarak değerlendirilmektedir (Elçi ve diğ., 2014). Kireçtaşlarında az oran da MgO bulunması dolomitin, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bulunması ise pirit, hematit gibi demir minerallerinin bulunduğunu ifade etmektedir. SiO<sub>2</sub> varlığı ise kil mineralleri ve kuvars minerallerinden kaynaklanmaktadır (Yılmaz ve diğ., 2011). Elde edilen sonuçlar mineralojik ve petrografik analizi desteklemektedir. Ayrıca beton agregası olarak kullanılacak kayaların MgO oranının ise, %3'ün altında olması istenmektedir.

**Çizelge 3.** Kireçtaşlarının kimyasal analiz sonucu kimyasal ana oksit yüzdeleri

*Table 3. Chemical main oxide percentages of limestones as a result of chemical analysis*

Örnek Numarası	Bileşim (%)							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*AZ
KRÇ1	50.09	2.82	1.31	1.19	1.12	0.34	0.08	42.78
KRÇ2	42.73	12.00	4.39	2.20	1.04	1.20	0.12	35.55

\*AZ: Ateş Zayıtı

Kireçtaşı agregaların bünyesinde betonun katılaşmasına veya sertleşmesine zarar veren, betonun işlevselliğini azaltan kükürt, sülfat, klorür içerikleri ile humus muhtevası TS EN 1744-1+A1 (2013)' e uygun olarak kimyasal analizler ile belirlenmiştir (Tuğrul ve diğ., 2008). Bu zararlı kimyasal bileşenler ile ilgili veriler Çizelge 4'te sunulmuştur. Ayrıca humus muhtevası (organik madde tayini) deneyinde agrega numuneleri üzerindeki sıvının standart renk çözeltisine göre daha açık renkte olduğu için agrega numunesi önemli miktarda organik madde içermemektedir.

Agregaların suda çözülebilen klorür oranı %0.001 olarak belirlenmiştir. TS EN 1744-1+A1 (2013) göre beton agregaların klorür oranının en fazla %0.01 olabileceği belirtilmiştir. Standartta betonda kullanılacak

agregaların toplam kükürt içeriğinin %1 den az olması istenmektedir. İncelenen agregaların kükürt içeriği bu değer çok altında kaldığından zararsız niteliktedir.

Agregalarda bulunan sülfatlar, betonun toplam sülfat içeriğini arttırarak betonda zararlı etkilere sebep olabilir. Bu sülfat etkisi sonucu oluşan reaksiyon ürünleri sertleşmiş betonda genleşme oluşturarak agrega-çimento aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açmaktadır (Tosun ve diğ., 2003). İncelenen kireçtaşı agregaların asitte çözünen sülfat içeriği en düşük kategori olan  $AS_{0.2}$  (%0.2)' den daha düşüktür.

**Çizelge 4.** Kireçtaşlarının bünyesinde bulunan zararlı kimyasal bileşenler

*Table 4. Harmful chemical components in limestones*

Deney Adı	Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Deney Sonucu	TS EN 1744-1+A1 Standardı Kategori Değerleri
Asitte çözülen sülfat içeriği ( $SO_3$ ) (%)	0-4 Kırma kum	KRÇ 1	0.04	<%1
		KRÇ 2	0.06	
Toplam kükürt içeriği (S) (%)	0-4 Kırma kum	KRÇ 1	0.08	<%1
		KRÇ 2	0.10	
Klorür oranı (Cl-) (%)	0-4 Kırma kum	KRÇ 1	0.001	< %0.01
		KRÇ 2	0.001	
Humus Muhtevası	0-4 Kırma kum	KRÇ 1	Oluşan renk standart renkten açıktır.	Koyu Kırmızı renk kullanılamaz.
		KRÇ 2		

#### Kireçtaşı Agregalarının Fiziksel Özellikleri (Physical Properties of Limestone Aggregates)

##### Tane büyüklüğü dağılımı tayini (Determination of grain size distribution)

Kireçtaşından elde edilen agregaların tane büyüklüğü dağılımını belirlemek amacıyla TS EN 933-1 (2012)'e göre elek analizi deneyi yapılmıştır. Agregaya yığının gradasyonunun saptanmasında tane boyutu dağılımı (elek analizi) deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır (Hasdemir, 2007). Elek analizlerinde 4 mm açıklı elekten geçen agregalar ince agregaya, 4 mm açıklı elek üzerinde kalan agregalar ise iri agregalar olarak tanımlanmaktadır. Beton agregası olabirliği incelenen Gebze Bölgesinden alınan kireçtaşı agregalarına ait granülometri eğrileri Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. Yapılan elek analizi sonuçlarına göre agregaların tane boyutu dağılımı her farklı agregaya grubu için ideal bir izlenim vermektedir (Çizelge 5 ve Çizelge 6).

**Çizelge 5.** İncelenen KRÇ-1 kireçtaşı agregalarının tane boyu dağılımı

Table 5. Grain size distribution of investigated limestone aggregates KRÇ-1

Elek Aralığı (mm)	Kırma kum (0-4mm)			Yıkanmış Kırma kum (0-4mm)			Kırmataş 1 (4-12mm)			Kırmataş 2 (12-22mm)		
	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen
22,4	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100
16	-	-	100	-	-	100	-	-	100	385	29.07	71
11,2	-	-	100	-	-	100	18	1.36	99	823	91.23	9
8	-	-	100	-	-	100	435	34.41	66	-	-	0
5,6	12	0.96	99	-	-	100	667	85.09	15	-	-	0
4	168	14.43	86	-	-	100	174	98.31	2	-	-	0
2	372	44.26	56	169	13.94	86	14	99.37	1	-	-	0
1	263	65.35	35	367	44.22	56	-	-	0	-	-	0
0,5	168	78.82	21	257	65.42	35	-	-	0	-	-	0
0,25	98	86.67	13	170	79.44	21	-	-	0	-	-	0
0,125	34	89.39	11	115	88.92	11	-	-	0	-	-	0
0,063	30	91.79	8	64	94.26	6	-	-	0	-	-	0
Toplam (g)	1247			1212			1316			1324		

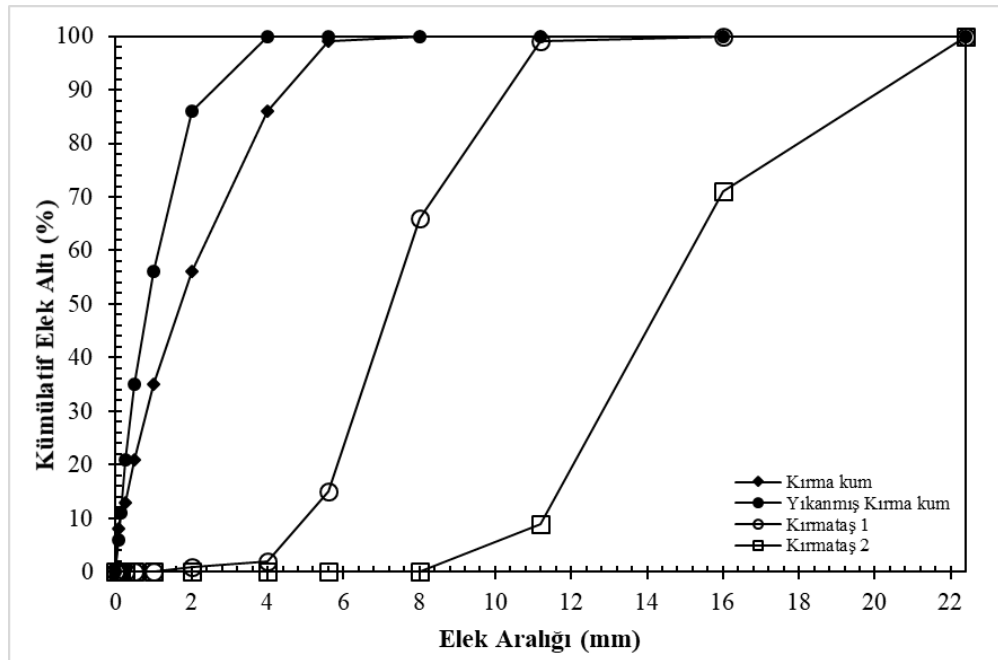
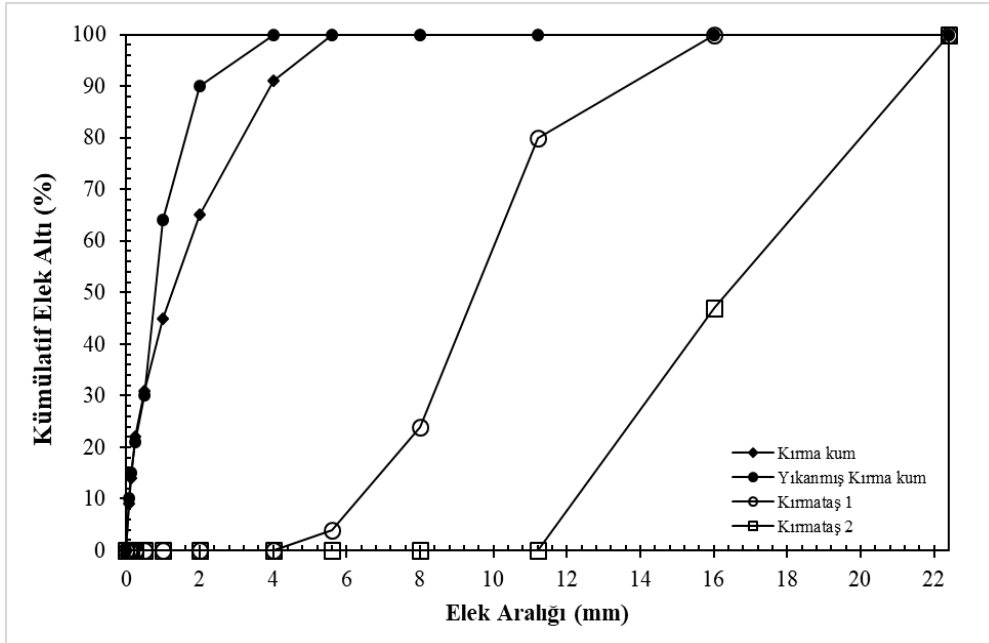
**Şekil 8.** İncelenen KRÇ-1 kireçtaşı agregalarının granülometri eğrisi

Figure 8. The grading curve of the investigated limestone aggregates KRÇ-1

Çizelge 6. İncelenen KRÇ-2 kireçtaşı agregalarının tane boyu dağılımı

Table 6. Grain size distribution of investigated limestone aggregates KRÇ-2

Elek Aralığı (mm)	Kırma kum (0-4mm)			Yıkanmış Kırma kum (0-4mm)			Kırmataş 1 (4-12mm)			Kırmataş 2 (12-22mm)		
	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen	Küm. Kalan (g)	% Kalan	% Geçen
22,4	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100
16	-	-	100	-	-	100	-	-	100	685	53.34	47
11,2	-	-	100	-	-	100	271	20.40	80	-	-	0
8	-	-	100	-	-	100	744	76.42	24	-	-	0
5,6	-	-	100	-	-	100	265	96.37	4	-	-	0
4	115	9.39	91	-	-	100	-	-	0	-	-	0
2	319	35.45	65	124	10.03	90	-	-	0	-	-	0
1	244	55.38	45	323	36.16	64	-	-	0	-	-	0
0,5	171	69.35	31	418	69.97	30	-	-	0	-	-	0
0,25	111	78.41	22	117	79.43	21	-	-	0	-	-	0
0,125	99	86.49	14	65	84.68	15	-	-	0	-	-	0
0,063	57	91.14	9	63	89.77	10	-	-	0	-	-	0
Toplam (g)	1224			1236			1328			1284		



Şekil 9. İncelenen KRÇ-2 kireçtaşı agregalarının granülometri eğrisi

Figure 9. The grading curve of the investigated limestone aggregates KRÇ-2

### Çok ince malzeme muhtevası (Fine content)

Çok ince malzeme muhtevası; agrega içerisindeki TS 933-1 (2012) standardına göre tane büyüklüğü 0.063 mm den geçen malzeme miktarı olarak tanımlanır. İnce malzemeler betonda birçok olumsuzluğa sebep olabilmektedir.

Çok ince malzemeler agrega tanelerinin etrafını sararak çimento hamuru ile arasındaki aderansın azalmasına neden olmaktadır (Fookes, 1980). Beton üretiminde karma suyu miktarını artırarak betonun dayanım ve durabilitesine olumsuz etki etmektedir (Erdoğan, 2003). Bu nedenle, çok ince madde oranıyla birlikte bu malzemenin kalitesinin de belirlenmesi gerekmektedir.

TS 706 EN 12620 (2003) Standardında ince agregalarda çok ince madde oranı % 3'ü, iri agregalarda ise %1'i aştığında bunların kalitesinin belirlenmesi gerektiği ifade edilmektedir. İncelenen agregaların çok ince madde miktarının (0,063mm geçen) ince agregalarda (kıрма kum, yıkanmış kıрма kum) %3' den fazla olduğu, iri agregaların (kırmataş 1, kırmataş 2) ise %1' den az olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 5 ve Çizelge 6).

### Metilen mavisi deneyi (methylene blue test)

Metilen mavisi deneyi, ince agrega içindeki kil, demir oksit ve organik madde miktarını sınırlandırmak için kullanılan, deney yöntemidir. Yöntem özel ekipman gerektirmediği ve kolay uygulanışı ile beton üretiminde yaygın kullanılmaktadır.

İnce agregalar üzerinde yapılan metilen mavisi deneyi TS EN 933-9+A1 (2014) uygun olarak yapılmış sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Metilen mavisi sonuçları ortalama olarak kıрма kum 1g/kg ve yıkanmış kıрма kum ise 0.50 g/kg'dır. Metilen mavisi sonuçlarının belli bir standardı olmamak ile birlikte sonuçların 2.50 g/kg değerini aşmaması istenmektedir. KRÇ-1 ve KRÇ-2 numunelerine yapılan metilen mavisi deneyinde elde edilen değerlerin sınır değerini (%2,5) altında olduğu ve beton agregası olarak kullanılabilceği saptanmıştır.

Çizelge 7. Kireçtaşı agrega numunelerine ait metilen mavisi değerleri

Table 7. Methylene blue values of limestone aggregate samples

Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Deney Numunesi Miktarı (g)	İlave Edilen Metilen Mavisi Çözeltisi (ml)	Metilen Mavisi Değeri (MB) (%)	Metilen Mavisi Sınır Değeri (MB) (%)
0-4 kuru	KRÇ-1	200	20	1.00	2.5
0-4 kuru	KRÇ-2	200	20	1.00	
0-4 yıkanmış	KRÇ-1	200	10	0.50	
0-4 yıkanmış	KRÇ-2	200	10	0.50	

### Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini (Determination of particle density and water absorption rate)

Tane yoğunluğu (özgül ağırlık) ve su emme deneyleri TS EN 1097-6 (2013) uygun olarak yapılmıştır. Agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranı beton karışım hesaplarında kullanılmaktadır. İnce agregaların su emmesi iri agregalara göre yüksek değerler vermiştir. Özgül ağırlığın ise birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Çizelge 8). Bu değerler agregaların özgül ağırlıklarının, normal beton değerlerinin içerisinde yer aldığını göstermektedir.

**Çizelge 8.** Kireçtaşı agregaların ortalama tane yoğunlukları ve su emme oranları*Table 8. Mean particle densities and water absorption rates of limestone aggregates*

Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Doğun Yüzey Kuru Tane Yoğunluğu (Mg/m <sup>3</sup> )	Su Emme Oranı (%)
0-4 kuru	KRÇ-1	2.71	1.0
0-4 kuru	KRÇ-2	2.67	1.2
0-4 yıkanmış	KRÇ-1	2.70	1.4
0-4 yıkanmış	KRÇ-2	2.68	1.8
4-12	KRÇ-1	2.72	0.5
4-12	KRÇ-2	2.68	0.7
12-22	KRÇ-1	2.73	0.4
12-22	KRÇ-2	2.69	0.6

Agregaların su emme değerleri don etkilerinin tespitinde etkili bir değerlendirme ölçütü olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer yandan beton karışımlarında karma suyunu etkilemesi ve betonun dayanımını düşürmesi sebebiyle önem kazanmaktadır.

Agrega numunelerinin su emme değerleri ortalama olarak ince agregalar %1.1-%1.6 ve iri agregalarda %0.5-%0.6 olduğu belirlenmiştir. Betonda kullanılacak agreganın su emme değerinin % 3'den az olması istenmektedir (TS 706 EN 12620, 2003). İncelenen agregaların su emme değerlerinin standartlara uygun olduğu görülmektedir (Çizelge 8).

#### Yassılık endeksi (Flakiness index)

Beton içerisinde kullanılan agregaların en az boşluk oluşturacak şekilde olması istenir. Bu yüzden agrega tanelerinin şekli, olabildiğince küresel ve kübik olmalıdır. Böylece agrega yığını daha iyi bir biçimde yerleşerek taneler arası boşluklar en aza iner. Beton içerisinde yer alan yassı taneler, kolaylıkla çimento ile bağ kurabildiği gibi karışım içerisindeki bazı yassı taneler, yığın içerisinde açık boşluklar oluşturabilmektedir (Elçi, 2011). Bu boşluklar betondaki çimento ihtiyacını artıracak için yassı tanelerin varlığını tespit etmek önem teşkil etmektedir.

Kireçtaşı iri agregalar (4-12 mm ve 12-22 mm) üzerinde yapılan yassılık endeksi deneyi TS EN 933-3 (2012) uygun olarak yapılmış deney sonuçları Çizelge 9' de belirtilmiştir. Deney sadece 4-80 mm arasında tane boyutuna sahip agregalarda uygulanmaktadır (Çelik ve diğ., 2018). Betonun işlenebilirliği, su gereksinimi ve betonun iyi yerleşebilmesi açısından yassılık endeksinin % 20 değerini geçmemesi iyi sayılmaktadır (Keskin, 2011).

**Çizelge 9.** Kireçtaşı agregalarının yassılık endeksi değerleri*Table 9. Flakiness index values of limestone aggregates*

Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Deneye Giren Toplam Malzeme Miktarı (g)	Yassı Malzeme Miktarı (g)	Yassılık Endeksi Değeri (%)
4-12	KRÇ-1	1595	268	16.8
4-12	KRÇ-2	1640	282	17.2
12-22	KRÇ-1	1543	196	12.7
12-22	KRÇ-2	1624	216	13.3

Deney sonucunda kırmataş 1 (4-12 mm) agregaların ortalama yassılık endeksinin %17 ve kırmataş 2 (12-22 mm) agregaların ise ortalama yassılık endeksinin %13 olarak bulunmuştur. Kireçtaşı agregaların

ortalama yassılık endeksi değerinin TS 706 EN 12620 (2003) standardı açısından en uygun alan olan  $FI_{15}$  kategorisinde yer aldığı belirlenmiştir.

### Kireçtaşı Agregalarının Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Limestone Aggregates)

#### Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles) (Determination of resistance to fragmentation)

Bu testte agreganın darbeye karşı dayanımını saptamak amacıyla yapılan bir dayanım testidir. Özellikle dinamik baskıların yüksek olduğu alanlarda beton agregası olarak kullanılacak betonun aşınması açısından büyük önem taşımaktadır. Agregaların darbeye karşı dayanımı ve aşınabilirliğini belirlemek amacıyla TS EN 1097-2 (2010) standardına göre "Los Angeles Aşınma Deneyi" yapılır. Kireçtaşı iri agregalar üzerinde parçalanma direncinin tayini için Los Angeles deneyi TS EN 1097-2 (2010) uygun olarak yapılmış ve elde edilen deney sonuçları Çizelge 10'de verilmiştir.

**Çizelge 10.** Kireçtaşı agregalarının Los Angeles deneyi ile parçalanmaya karşı direncin tayini

*Table 10. Determination of resistance to disintegration of limestone aggregates by Los Angeles test*

Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Numunenin Başlangıç Kuru Ağırlığı, g	1,6 mm Elek Üstü Malzeme Miktarı, g	Los Angeles Katsayısı (LA) (%)
4-12	KRÇ-1	5000	4061	19.3
4-12	KRÇ-2	5000	4042	18.7
12-22	KRÇ-1	5000	4030	19.4
12-22	KRÇ-2	5000	4068	18.6

Beton agregalarında TS EN Standartlarına göre Los Angeles parçalanma oranının %50'yi geçmemesi istenmektedir. İncelenen iri agregaların ortalama Los Angeles parçalanma deneyi 500 devirde %19 kayıp bulunmuştur. Bu değer agregaların parçalanma deneyi açısından son derece uygun olan  $LA_{20}$  kategorisinde olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuca göre agregaların beton agregası olarak değerlendirilebilir özellikte olduğu söylenebilir.

#### Aşınmaya Karşı Direnç (Mikro-Deval Katsayısı) (Abrasion Resistance)

Mikro-Deval aşınma deneyi, iri agregaların bir miktar su katılarak tamburda çelik bilyeler ile dönmesi sonucu 1,6 mm açıklıklı eleğin üzerinde kalan malzemenin yüzdesini belirlemek için kullanılan yöntemdir (TS EN 1097-1, 2011). Kireçtaşı agregalarının aşınmaya karşı direncini belirlemek için Mikro-Deval deneyi TS EN 1097-1 (2011) uygun olarak yapılmış deney sonuçları Çizelge 11'de belirtilmiştir.

**Çizelge 11.** Kireçtaşı agregalarının Mikro-Deval aşınma değerleri

*Table 11. Micro-Deval abrasion values of limestone aggregates*

Agrega Boyutu (mm)	Numune No	Numunenin Başlangıç Kuru Ağırlığı (g)	1,6 mm Elek Üstü Malzeme Miktarı, g	Mikro-Deval Katsayısı (M <sub>DE</sub> ) (%)
4-12	KRÇ-1	5000	4118	18.4
4-12	KRÇ-2	5000	4078	17.6
12-22	KRÇ-1	5000	4086	18.3
12-22	KRÇ-2	5000	4115	17.7

İri agregaların TS EN Standartlarına göre Mikro-Deval aşınmaya karşı direncin %35 den az olması istenmektedir. Aşınma dayanım değeri ne kadar az ise tanelerin mekanik etkilere karşı dayanımı o derece

yüksek kabul edilmektedir. İncelenen iri agregaların ortalama olarak aşınmaya karşı direncinin % 18 olduğu görülmektedir (Çizelge 11). Bu değerler ile agregalar aşınma deneyi açısından  $M_{DE20}$  kategorisinde yer almaktadır. Elde edilen veriler kireçtaşının aşınmaya ve parçalanmaya karşı direncinin uygun olduğunu göstermektedir.

#### Alkali-Silis Reaksiyonu (Alkali-Silica Reaction)

Petrografik araştırmalarda incelenen kireçtaşlarının içerisinde aktif silis içeren mineraller bulunmaktadır. Bu minerallerin fazla bulunması ve ortamın rutubetli olması betonda alkali-silika reaksiyon riskini oluşturabilir. Agregalıcıları olan beton firmaları kireçtaşının içerisindeki aktif silis oranını belirlemek istedikleri için bu deney yapılmaktadır. Bu sebeple, kireçtaşı numuneleri ile ASTM C 1260-14 (2014) standardına uygun olarak hızlandırılmış harç çubuğu deneyleri yapılmıştır. Deneyler ile kireçtaşı agregalarının çimento hamuru ile oluşturabileceği reaksiyon sonucu genleşmelerine bağlı boy uzamaları belirlenmiştir (Şekil 10). Deneylerde TS EN 197-1 (2012) standardına uygunluk gösteren CEM-I 42,5 türü çimento kullanılmış ve kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 12’de verilmiştir. Deneyler üç numune üzerinde yapılmış olup, 3, 7 ve 14 günlük ortalama boy uzama oranları belirlenmiştir (Çizelge 13).

**Çizelge 12.** Deneylerde kullanılan çimentonun özellikleri

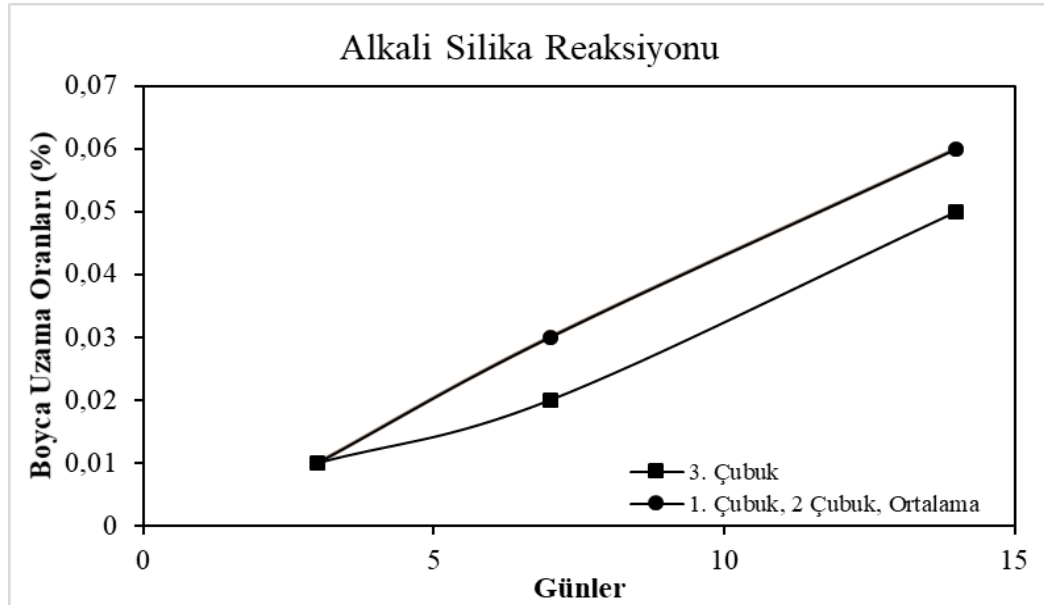
*Table 12. Properties of the cement used in the experiments*

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO <sub>2</sub> (%)	18.70	Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.90	Özgül Yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /gr)	3810
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.31	Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)	1
CaO (%)	63.51	Priz Başlama Süresi (dk.)	137
MgO (%)	1.34	Priz Sona Erme Süresi (dk.)	216
SO <sub>3</sub> (%)	3.29	İncelik (45 µm) (%)	3.1
Cl (%)	0.03	İncelik (90 µm) (%)	0.2
Na <sub>2</sub> O (%)	0.20	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>	
K <sub>2</sub> O (%)	0.83	2 Gün	39
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.49	7 Gün	53.4
Kızdırma Kaybı (%)	3.45	28 Gün	61.9



**Çizelge 13.** Kireçtaşının genleşmeye bağlı boy uzama oranları*Table 13. Lengthening rates of limestone due to expansion*

Zaman (Gün)	1.Çubuk Uzama Oranı (%)	2.Çubuk Uzama Oranı (%)	3.Çubuk Uzama Oranı (%)	Ortalama Uzama Oranı (%)	ASTM C 1260 Standardı Sınır Değerleri
3	0.01	0.01	0.01	0.01	Ortalama Uzama Oranı >0,20 Zararlı agregalar
7	0.03	0.03	0.02	0.03	Ortalama Uzama Oranı >0,20 Zararlı agregalar
14	0.06	0.06	0.05	0.06	Ortalama Uzama Oranı >0,20 Zararlı agregalar

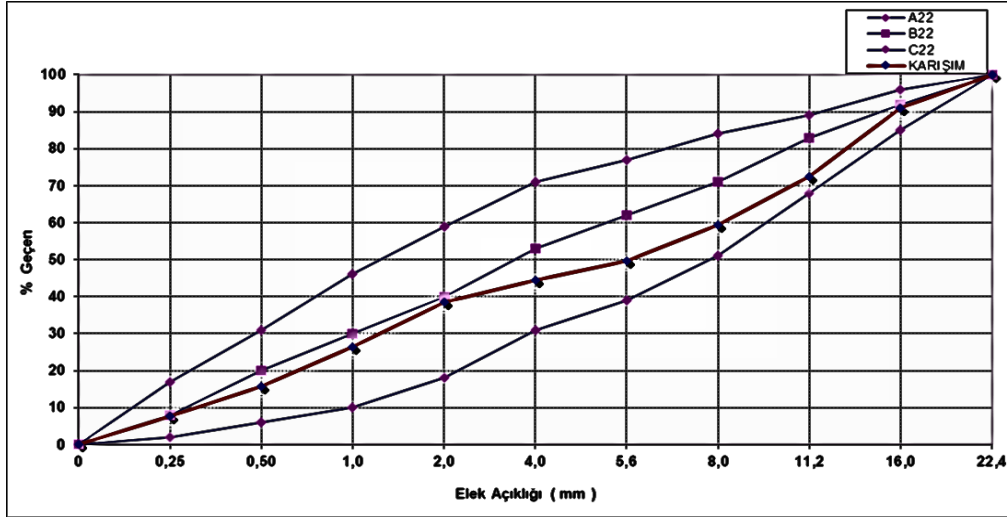
**Şekil 10.** Kireçtaşının genleşmeye bağlı boy uzamalarının karşılaştırılması*Figure 10. Comparison of limestone growth rates due to expansion*

Grafikte de görüldüğü gibi 3, 7 ve 14 günlük boy uzama oranları 1.Çubuk, 2.Çubuk ve Ortalama Uzama Oranların da aynı değerler ölçülmüştür (Şekil 10). ASTM C 1260-14 (2014) Standardı; harçların 14 gün sonunda boy uzamaları (genleşmeleri) %0.20'den büyük ise incelenen agreganın alkali reaktivitesi bakımından zararlı olabileceğini belirtmektedir. Deney sonuçları ortalama boy uzama oranının %0.10'un altında kaldığından alkali silika reaksiyonu yönünden zararsız niteliktedir.

#### **Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri (Fresh and Hardened Concrete Properties)**

İncelenen Gebze kireçtaşı agregalarının özellikleri birbirine yakın değerler de olduğu için beton araştırmalarında, kireçtaşları agregaları ayırım yapılmadan üretimde kullanılmıştır. Gebze kireçtaşlarından elde edilen ince ve iri agregaların beton özelliklerine etkilerini araştırmak amacıyla laboratuvar ortamında 4 seriden oluşan deneme betonları üretilmiştir. Taze betonda yapılan deneyler; çökme deneyi ve birim ağırlık, sertleşmiş beton üzerinde ise beton basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında incelenen kireçtaşı agregaları kullanılarak, çimento dozajları farklı ( $275 \text{ kg/m}^3$ ,  $325 \text{ kg/m}^3$ ,  $345 \text{ kg/m}^3$  ve  $395 \text{ kg/m}^3$ ) dört beton karışımı hazırlanmıştır (Çizelge 14). Karışım için en ideal granülometri seçilmiş, aynı tür çimento ve doğal kum kullanılarak farklı su/çimento oranına sahip dört farklı deneme betonu üretilmiştir. Deneme betonlarda kullanılan agregaya karışım oranları Şekil 11’de verilmiştir. Çalışmalarda bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 (2012) standardına uygunluk gösteren CEM-I 42,5 türü çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 12’de verilmiştir. Beton karışımında işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini geliştirebilmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 11. Beton üretiminde kullanılan agregaya karışım oranları

Figure 11. Aggregate mixing ratios used in concrete production

Sertleşmiş beton özelliklerini belirlemek amacıyla üretilen taze betondan  $10 \times 10 \times 10$  cm boyutunda küp kalıplarla numuneler alınmıştır. Numuneler kırılma gününe kadar sıcaklığı  $20 \pm 2$  °C’ olan kirece doymun su ile dolu kür havuzunda bekletilmiştir. TS EN 12390-3 (2019)’e göre 2, 7 ve 28 günlük yaşlar sonrası basınç dayanımı deneyi uygulanmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 15’de verilmiştir.

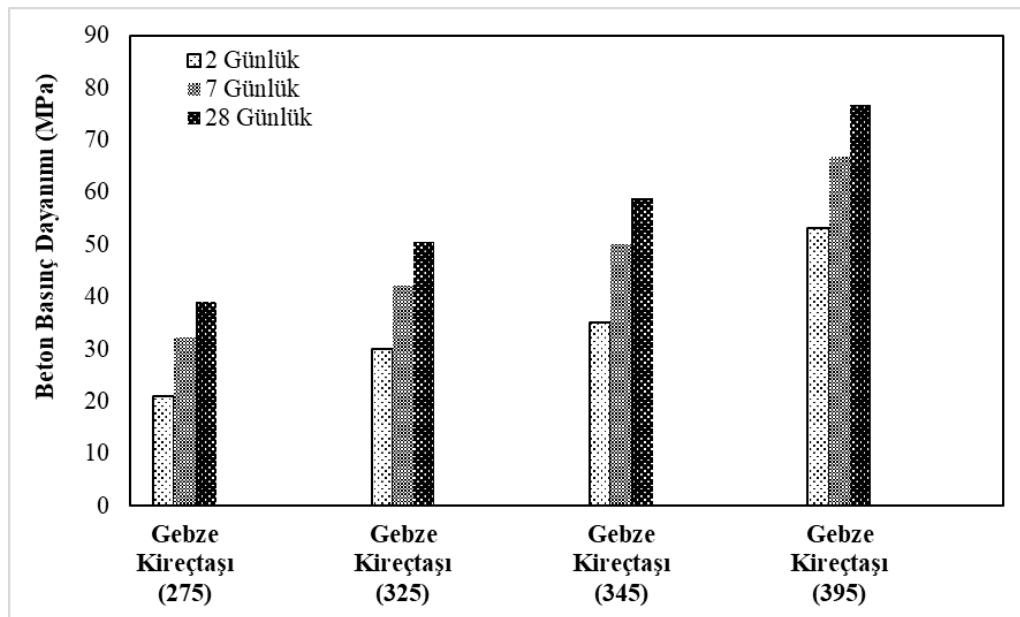
Taze betonun kıvamını ölçmek için TS EN 12350-2 (2019)’e göre üretilen deneme betonların çökme deneyi yapılmıştır. Kireçtaşı agregalarından üretilen deneme betonlarında çökme değeri 170-190 mm arasında ölçülmüştür (Çizelge 15). Çökme deneyi betonun sadece kıvamını ölçmenin yanı sıra betonun işlenebilirliğine dair önemli bilgiler vermektedir. Üretilen deneme betonların birim ağırlıkları ise TS EN 12350-6 (2019)’e göre belirlenmiştir. Kireçtaşı agregalarından üretilen deneme betonlarında birim ağırlık  $2306 \text{ kg/m}^3$  ile  $2345 \text{ kg/m}^3$  arasında ölçülmüştür (Çizelge 15). Kireçtaşı agregaları ile üretilen betonların beton sınıfı arttıkça beton basınç dayanımı artmaktadır (Çizelge 15). Bunun sebebi beton sınıfı arttıkça üretilen betonların su/çimento oranının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. İncelenen kireçtaşı agregaya ile hazırlanan deneme betonlarının 28 günlük basınç dayanımları farklı beton sınıflarında uygun değerlere ulaşmıştır (Çizelge 15). Çimento dozajı arttırıldığında, üretilen deneme betonlarının basınç dayanımlarında C35 betonlarda %29 artış, C40 betonlarda %17 artış ve C50 betonlarda ise %30 artış görülmüştür (Şekil 12).

**Çizelge 14.** Üretilen deneme betonların karışım miktarları*Table 14. Mixture quantities of the produced trial concretes*

	Deneme-1	Deneme-2	Deneme-3	Deneme-4
Beton Sınıfı	C30/37	C35/45	C40/50	C50/60
Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	275	325	345	395
Su (kg/m <sup>3</sup> )	150	164	155	127
Su/Çimento	0.55	0.50	0.45	0.32
Doğal Kum (kg/m <sup>3</sup> )	310	270	270	240
Kırma Kum (kg/m <sup>3</sup> )	550	570	548	539
Kırmataş 1 (kg/m <sup>3</sup> )	385	382	382	385
Kırmataş 2 (kg/m <sup>3</sup> )	645	653	656	656
Katkı Miktarı (kg/m <sup>3</sup> )	2.20	2.92	4.14	5.53

**Çizelge 15.** Deneme betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımı*Table 15. Fresh concrete properties and compressive strength of trial concretes*

Karışım Numarası ve Beton Sınıfı	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Çökme Değeri (cm)	Basınç Dayanımı (MPa)		
			2 Gün	7 Gün	28 Gün
Deneme-1 C30/37	2306	18	21.1	32.2	39.1
Deneme-2 C35/45	2328	18	30.1	42.1	50.5
Deneme-3 C40/50	2337	17	35.1	50.1	59.0
Deneme-4 C50/60	2345	19	53.2	66.9	76.8

**Şekil 12.** Kireçtaşı agregalarına ait beton basınç dayanım değerleri*Figure 12. Concrete compressive strength values of limestone aggregates*

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kocaeli Gebze Tavşanlı bölgesinde yayılım gösteren Triyas yaşlı kireçtaşlarının beton agregası olarak kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Agregada hammaddesi olan kayaçların agrega kalitesini belirlemek için farklı lokasyonlarda örnekleme yapılmıştır. Bu örnekler; petrografik ve mineralojik özelliklerine göre, oomikritik kireçtaşı, yarı mikritik-fosilli kireçtaşı olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca kireçtaşlarının içerdikleri karbonat minerallerinin yüzdelerine göre ise kireçtaşı, saf olmayan kireçtaşı olarak sınıflandırılmıştır. İncelenen kireçtaşlarının ince agregaları, çok ince madde içeriği (0,063mm geçen) %3'ü geçtiği için metilen mavisi deneyi yapılmıştır. Metilen mavisi ve su emme değerleri, betonda kullanım açısından uygundur. Kireçtaşlarının boşluk oranının az olması, kil ve silt gibi betonda zararlı ince taneler olan malzemelerin düşük seviyelerde olması, agrega kalitesini artırmaktadır. Agregaların ortalama tane yoğunluğu (özellik ağırlığı), 2.69 Mg/m<sup>3</sup>-2.71 Mg/m<sup>3</sup> aralığında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu değerler agregaların özgül ağırlıklarının, betonda yaygın olarak kullanılan normal beton değerlerinin içerisinde yer aldığını göstermektedir.

Sülfat, klorür ve toplam kükürt içeriği bakımından incelenen kireçtaşlarının betonda zararlı etkileri bulunmamaktadır. İncelenen kireçtaşlarının iri agregalarının yassılık endeksi standartta göre en uygun alanda bulunmaktadır. Ayrıca iri agregaların Los Angeles parçalanma direnci ve Mikro-Deval aşınmaya karşı direncinin de beton kullanımı için oldukça uygun sonuçlar vermiştir. Kireçtaşları üzerinde yapılan hızlandırılmış harç çubuğu deney sonuçlarının 14 günlük genleşme oranlarının %0.10'un altında kaldığından alkali silis reaksiyonu yönünden zararsız niteliktedirler. İncelenen kireçtaşı agregalarıyla üretilen deneme betonlardan elde edilen sonuçlara göre, kireçtaşı agregaları normal dayanımlı beton üretimi için uygun özelliktedirler. Günümüzde artan teknoloji ile birlikte betonun kaliteli ve sürekli kullanılması için uygun özellikli agregalar tercih edilmelidir. İncelenen kireçtaşlarının standartlarda belirtilen kabul edilebilir limitler arasında bulunması nedeniyle beton üretiminde beton agregası olarak kullanılmasının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar bu çalışma kapsamında, sağlanan veriler için İSMAİL DEMİRTAŞ Beton A.Ş.'ye ve laboratuvar çalışmalarını sırasında vermiş oldukları katkılardan dolayı İSMAİL DEMİRTAŞ Beton A.Ş.'nin çalışanlarına, özellikle bilgi ve deneyimlerini aktaran Sn. Hakkı YILDIRIM ve Koray TUĞ'a ve makalenin gelişimine katkı veren hakemlere teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Al-Jassar, S., Hawkins, A.B., 1991, "The Carboniferous limestone of the Bristol area: a review of the influence of the lithology and chemistry on its use as a geomaterial.", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24, pp. 143-158
- Arsoy, Z., Ersoy, B., Sert, M., Çiftçi, H., Çelik, M.Y., Evcin, A., Yentürk, F., 2018, " Afyonkarahisar Organize Sanayi Bölgesi Mermer Atıklarının Beton Agregası Olarak Dayanım Özelliklerinin Belirlenmesi" , Araştırma Makalesi, 1st International Engineering and Technology Symposium, Batman University, Sayı:1, 1020-1024, Batman.
- ASTM C 1260-14 (2014). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Çelik, M.Y., Arsoy, Z., Sert, M., Ersoy, M., Şahbaz, A., 2018, "İscehisar (Afyonkarahisar) Andezitinin Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi" , Araştırma Makalesi, 1st International Engineering and Technology Symposium, Batman University, Sayı:1, 948-954, Batman.
- Eep, Ş., 1987, "Tavşanlı-Demirci (Gebze-Adapazarı) Köyleri Çevresinin Jeolojisi", Bitirme Tezi, İTÜ Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Elçi, H., 2011, "Karaburun Yöresi Doğal Yapı Taşlarının Mühendislik Jeolojisi" , Doktora Tezi, D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 287-302, İzmir.

- Elçi, H., Türk, N., İşintek, İ., 2014, "İzmir Karaburun Yarımadasındaki Farklı Kireçtaşlarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi", Araştırma Makalesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Sayı:38, 118-127, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- Eren, H., Nasuf, E., Ökten, G., Energen, T., 1996, "Kocaeli-Gebze İlçesi, Tavşanlı Köyü Civarındaki Kireçtaşı Sahalarının Jeolojisi, Rezerv Analizi ve İstanbul Metropolü Yönünden Önemi", 1. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 53-68, İstanbul.
- Folk, R. L., 1962, Spectral Subdivision of Limestone Types. In: W.E. Ham (ed.), Classification of Carbonate Rocks, American Association Petroleum Geologist, 1, 62-84.
- Fookes, P.G., 1980, "An Introduction to the Influence of Natural Aggregates on the Performance and Durability of Concrete", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 123, 207-229.
- Gutierrez, P., and Canovas, M.F., 1996, "High Performance Concrete Requirements for Constituent Materials and Mix Proportioning", *ACI Materials Journal*, 93, 233-241.
- Güler, B., Tuğrul, A., Hasdemir, S., Şahin, S.Y., 2010, "İstanbul'da Üretilen Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkileri", Mühendislik Jeolojisi Bülteni, Sayı:30, 53-72, Ankara.
- Gürsel, E., Erenson, C., 2017, "Kayaç Türünün Betonun Yüksek Dayanımına Etkisinin Petrografik Olarak İncelenmesi", Ulusal Mühendislik Jeolojisi-Jeoteknik Sempozyumu, Adana.
- Halili, A., Gözübol A.M., 1999, "Hereke Formasyonunun (Gebze Kireçtaşı) Kırmataş Özelliği ve Kıрма Eleme Tesislerindeki Davranışı", 2. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 89-98, İstanbul.
- Hasdemir, S., 2007, "Marmara Bölgesindeki Farklı Kökenli Doğal Kumların Beton Özelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keskin, G., 2011, "Cendere Vadisi Kayaçlarının Beton Agregası Olarak Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Poitevin, P., 1999, "Limestone Aggregate Concrete, Usefulness and Durability", *Cement and Concrete Composites*, 21, 89-97.
- Sayar, C., 1976, "Haliç ve Civarının Jeolojisi" B.Ü. İstanbul Haliç Sorunları ve Çözüm Yolları Ulusal Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 355-374, İstanbul.
- Taşdemir, C., 1998, "The Influence of Aggregate Type on the Mechanical Properties of Concrete", Proceedings of the 12th European Ready Mixed Concrete Congress, Lisbon, pp. 633-640.
- Tosun, K., Yazıcı, H., Yiğiter, H., Baradan, B., 2003, "Uçucu Kül İçeren Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 17-26, İstanbul.
- TS EN 197-1, 2012, Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-1, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini – Eleme Yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-3, 2012, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 3: Tane Şekli Tayini – Yassılık Endeksi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9+A1, 2014, Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini – Metilen Mavisini Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-1, 2011, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 1: Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Mikro-Deval), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, 2010, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Yöntemler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2013, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1+A1, 2013, Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 1: Kimyasal Analiz, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2019, Taze Betonda Çökme (Slump) Deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-6, 2019, Taze Betonda Yoğunluk Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2019, Deney Numunelerinin Basınç Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS 706 EN 12620, 2003, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuğrul, A., Yılmaz, M., Ündül, Ö., Kara, G., ve Buldum, M., 2008, "İstanbul'un Anadolu Yakasındaki Kumtaşlarının Beton Üretiminde Kullanılabilirlikleri", Beton 2008 Kongre Bildirileri, 130-144, İstanbul.
- Uribe-Afif, R., 1994, Study of petrous aggregates for concrete in Zimapán arch dam in Mexico, Proceedings of 7th International IAEG Congress, pp. 3229-3233.
- Williams, D.M., and McNamara, K., 1992, "Limestone to dolomite to dedolomite conversion and its effect on rock strength: a case study.", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24, pp. 131-135.
- Yılmaz, F., Koltka, S., Sabah, E., 2011, "Emirdağ-Adaçal (Afyonkarahisar) Kireçtaşlarının Beton Agregaları Standardına Uygunluğunun Araştırılması", Araştırma Makalesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Sayı:11, 1-12, Afyonkarahisar.
- Zarif, İ.H., Tuğrul, A., ve Dursun, G., 2003, "İstanbul'daki Kireçtaşlarının Agregat Kalitesi Yönünden Değerlendirilmesi", İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yerbilimleri Dergisi, 16, 61-70.



## CO<sub>2</sub> CAPTURE USING POLYETHYLENEIMINE FUNCTIONALIZED SILICA XEROGELS

<sup>1</sup>Gülcihan GÜZEL KAYA , <sup>2</sup>Hüseyin DEVECİ   
<sup>1</sup>ggkaya@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>hdeveci@ktun.edu.tr

<sup>1,2</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Chemical Engineering, Konya,  
TURKEY

(Geliş/Received: 28.10.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.11.2021)

**ABSTRACT:** CO<sub>2</sub> capture technologies using solid adsorbents are promising approach to reduce environmental pollution resulting from CO<sub>2</sub> emission. In this study, silica xerogel derived from cheap precursor was used as a CO<sub>2</sub> adsorbent after polyethyleneimine (PEI) functionalization. Fourier transform infrared (FTIR) analyses indicated that PEI functionalized silica xerogels were successfully prepared. N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms revealed that PEI loading decreased specific surface area and pore volume of the neat silica xerogel in contrast to pore size. An increase in particle size of the neat silica xerogel was observed in the case of PEI loading. Positively surface charged silica xerogels were obtained with PEI loading of the neat silica xerogel which had negatively charged surface. CO<sub>2</sub> adsorption measurements showed that CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the neat silica xerogel (0.98 mmol g<sup>-1</sup>) significantly increased with increasing PEI loading (30 – 70 wt%). At optimum PEI loading (50 wt%), CO<sub>2</sub> adsorption capacity of silica xerogel was determined as 1.94 mmol g<sup>-1</sup>. After 5 adsorption-desorption cycles, PEI functionalized silica xerogels still exhibited high CO<sub>2</sub> adsorption capacity. The hopeful results showed that PEI functionalized silica xerogels can be used as an adsorbent with a good CO<sub>2</sub> adsorption performance and stability.

**Key Words:** CO<sub>2</sub> adsorption, Silica xerogel, PEI functionalization, Amine impregnation, Regenerability

### Polietilenimin ile Modifiye Edilmiş Silika Kserojellerin Kullanımı ile CO<sub>2</sub> Tutumu

**ÖZ:** CO<sub>2</sub> emisyonundan kaynaklı çevre kirliliğinin azaltılmasında katı adsorbentlerin kullanıldığı CO<sub>2</sub> tutma teknolojileri umut vadeden bir yaklaşımdır. Bu çalışmada ucuz başlangıç malzemesinden elde edilen silika kserojel, polietilenimin (PEI) modifikasyonunun ardından CO<sub>2</sub> adsorbent olarak kullanılmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi analizleri PEI ile modifiye edilmiş silika kserojellerin başarılı bir şekilde hazırlandığını göstermiştir. N<sub>2</sub> adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi PEI yüklemesinin silika kserojelin gözenek boyutunun aksine spesifik yüzey alanı ve gözenek hacmini azalttığını açığa çıkarmıştır. PEI yüklemesi sırasında silika kserojelin partikül boyutunun arttığı gözlenmiştir. Negatif yüzey yüküne sahip silika kserojele PEI yüklenmesiyle pozitif yüzey yüklü PEI ile modifiye edilmiş silika kserojeller elde edilmiştir. CO<sub>2</sub> adsorpsiyon ölçümleri artan PEI yüklemesiyle (ağırlıkça %30 - 70) silika kserojelin CO<sub>2</sub> adsorpsiyon kapasitesinin (0.98 mmol g<sup>-1</sup>) önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Optimum PEI yüklemesinde (ağırlıkça %50), silika kserojelin CO<sub>2</sub> adsorpsiyon kapasitesi 1.94 mmol g<sup>-1</sup> olarak belirlenmiştir. 5 kez yapılan adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsünün ardından PEI ile modifiye edilmiş silika kserojeller hala yüksek CO<sub>2</sub> adsorpsiyon kapasitesi göstermiştir. Bu ümit vadeden sonuçlar PEI ile modifiye edilmiş silika kserojellerin iyi bir CO<sub>2</sub> adsorpsiyon performansı ve kararlılığı ile adsorbent olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** CO<sub>2</sub> adsorpsiyonu, Silika kserojel, PEI modifikasyonu, Amin emdirme, Yenilenebilirlik

## 1. INTRODUCTION

Climate change is a serious problem that affects environment and human health adversely. Greenhouse gases, especially CO<sub>2</sub> which absorbs infrared radiation leading an increase in temperature, are primary factors for global warming (Mondal *et al.*, 2012). It is known that CO<sub>2</sub> emission annually increases by more than 30 billion tons (Li *et al.*, 2013). So, many legislations and agreements have been applied to decrease or stabilize CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. For example, the European Commission has made a decision related to a decrease in carbon release by 20-95% until 2050 with respect to 1990s (Sher *et al.*, 2020). And also, different technologies have been developed for CO<sub>2</sub> capture: (1) pre-combustion (chemical adsorption, physical adsorption, chemical/physical absorption, chemical looping and membrane technology), (2) post-combustion (oxygen transport membrane boilers, ceramic auto-thermal recovery process, ion transport and membrane technology, cryogenic oxygen, chemical looping and chemical/physical absorption) and (3) oxy-fuel combustion (chemical adsorption, physical adsorption, chemical absorption, cryogenics separation, membrane technology and ionic liquids) (Sang Sefidi and Luis, 2019).

Many studies have focused on CO<sub>2</sub> capture by post-combustion method including adsorption process (Dutcher *et al.*, 2015). Compared to other methods, adsorption using solid adsorbents is one of the promising methods with the advantages of minimized equipment corrosion, easy handling, low energy and money consumption, and easy regeneration of adsorbents (Li *et al.*, 2015). Nowadays, carbon or silica based adsorbents have been derived from low-cost industrial by-products (fly ash, steel slag, *etc.*), biomass by-products (almond shell, coconut shell, bagasse, rice husk, soybean, *etc.*), water treatment wastes (sewage sludge, *etc.*), and household wastes (plastic waste, carpet waste, *etc.*). For instance, low-cost silica based materials such as MCM-41, MCM-48, SBA-15, and silica aerogel have been used as a CO<sub>2</sub> adsorbent resulting in favorable CO<sub>2</sub> adsorption capacity (Olivares-Marín and Maroto-Valer, 2012; Sher *et al.*, 2020).

Silica xerogels are one of the newly designed materials for CO<sub>2</sub> capture. Through atmospheric pressure drying, silica xerogels are synthesized from silica gels by sol-gel method. Silica xerogels have many unique properties including low-density, high surface area, controllable pore size and volume, and high thermal stability (Dos Santos *et al.*, 2020; S. Aquino *et al.*, 2019; Witoon *et al.*, 2011). Surface property of silica xerogels is an important factor that influences interactions with CO<sub>2</sub> molecules. Depending on various surface functionalization/modification methods, surface properties of silica xerogels show an alteration. Generally, to increase CO<sub>2</sub> adsorption capacity and selectivity, active sites on the surface of silica based materials are increased by surface functionalization using amine based materials (tetraethylenepentamine, polyethyleneimine, N-(3-trimethoxysilylpropyl) diethylenetriamine, (3-aminopropyl) trimethoxysilane, *etc.*) (Panek *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019). Amine loading are conducted with three common methods: (1) physically impregnation, (2) chemical grafting and (3) direct single step (Linneen *et al.*, 2013). Physical impregnation is the simplest method in which amine groups physically attached to silica scaffold. Firstly, amine is dissolved in a suitable solvent. After mixing amine solution with silica scaffold, amine functionalized silica based materials are prepared by evaporation of the solvent (Chen *et al.*, 2017).

The present work aimed to investigate the CO<sub>2</sub> adsorption performance of amine functionalized silica xerogel. Polyethyleneimine (PEI) functionalized silica xerogel was synthesized with physically impregnation method. Structural, textural and surface properties of functionalized silica xerogel were studied with different analyses. The CO<sub>2</sub> adsorption capacity of functionalized silica xerogel was specified by thermogravimetric analyses (TGA). The effects of different PEI loading on the CO<sub>2</sub> adsorption capacity of functionalized silica xerogel were examined. CO<sub>2</sub> adsorption-desorption cycles were carried out to determine regenerability and stability of the functionalized silica xerogel. Finally, the CO<sub>2</sub> adsorption capacity of functionalized silica xerogel was compared to that of the silica based materials in literature.



## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1. Materials

Volcanic tuff, which consists of highly SiO<sub>2</sub> ~ 71.5%, was used as a silica precursor. Isopropanol (Merck, ≥ 99.8%), NaOH (Sigma-Aldrich, ≥ 97%), HCl (Sigma-Aldrich, 37%), *n*-hexane (Merck, 98.5%) and PEI (Sigma-Aldrich, average molecular weight: 800) were supplied. The materials were used as received.

### 2.2. Preparation of PEI functionalized silica xerogels

Firstly, synthesis of silica xerogel was conducted according to our previous study (Guzel Kaya *et al.*, 2019). PEI functionalization of silica xerogel was carried out by physical impregnation method. Different amount of PEI (30, 50 and 70 wt%) was used to functionalize silica xerogel. PEI was mixed with 15 mL isopropanol for 30 min. After adding silica xerogel into PEI solution, the slurry was stirred at 500 rpm for 24 h at room temperature. The final material was dried at 50 °C under vacuum. Silica xerogels were denoted as silica xerogel-PEI-30, silica xerogel-PEI-50 and silica xerogel-PEI-70, respectively, depending on PEI loading.

### 2.3. Characterization of PEI functionalized silica xerogels

Fourier transform infrared (FTIR) spectra were recorded to investigate chemical bonding of the samples using Bruker Vertex 70 FTIR spectrometer (4000 - 400 cm<sup>-1</sup>). Based on N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms obtained by Micromeritics Tristar II 3020 analyzer, BET method was used to determine specific surface area of the samples. And also, pore properties of the samples such as pore volume and pore size were examined utilizing BJH method. Mass of the samples was divided to their volume to specify bulk density of the samples. Particle size of the samples was obtained by Malvern Zetasizer analyzer after dispersing the samples in water (w/v: 1/1). And also, zeta potential of the samples was specified with dispersing the samples in water (w/v: 1/1) by the Malvern equipment.

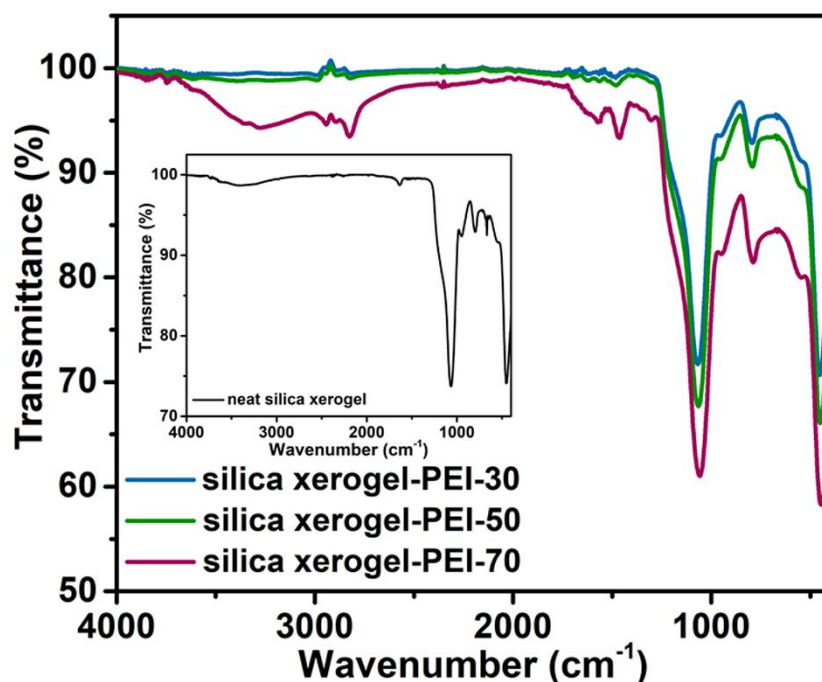
### 2.4. CO<sub>2</sub> adsorption measurements

CO<sub>2</sub> adsorption measurements were conducted by thermogravimetric analyses (TGA) using METTLER STAR SW equipment. 10 mg of sample was put in a pan and heated to 100 °C with heating rate of 10 °C min<sup>-1</sup> under Argon gas (100 mL min<sup>-1</sup>) for 30 min to remove residual solvents and water molecules. The temperature was decreased to 25 °C with cooling rate of 10 °C min<sup>-1</sup>, and subsequently pure CO<sub>2</sub> was inserted into the pan with the flow rate of 100 mL min<sup>-1</sup> for 1 h at 1 bar. CO<sub>2</sub> equilibrium adsorption capacity of the samples was calculated with gained mass throughout the adsorption process.

CO<sub>2</sub> adsorption-desorption cycles were carried out to show regenerability and stability of PEI functionalized silica xerogels. The samples were heated to 100 °C under Argon gas for 30 min, and then cooled to 25 °C in which CO<sub>2</sub> gas was switched for 1 h at 1 bar. The temperature was again increased to 100 °C under Argon gas for 30 min. The process was repeated for 5 times.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Effective PEI functionalization of the silica xerogel was confirmed by FTIR spectra (Figure 1). After PEI loading, new peaks belonging to PEI were observed. The peaks at 1464 cm<sup>-1</sup> and 1558 cm<sup>-1</sup> were contributed to -NH<sub>2</sub> symmetric and asymmetric bending vibrations, respectively (Taheri *et al.*, 2019). The stretching vibrations of -CH<sub>2</sub> attributed to formation of the peak at 2829 cm<sup>-1</sup> and 2942 cm<sup>-1</sup> (Niu *et al.*, 2016). While the amount of PEI was increasing, intensity of many peaks showed an increase. Especially an increase in intensity of the broad band at around 3370 cm<sup>-1</sup> in the FTIR spectrum of silica xerogel loaded with 70 wt% PEI was assigned to -NH stretching vibrations (Lou *et al.*, 2020).



**Figure 1.** FTIR spectra of PEI functionalized silica xerogels (inset: FTIR spectrum of neat silica xerogel)

Figure 2 shows N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherms of PEI functionalized silica xerogels. It was clear that the amount of adsorbed N<sub>2</sub> significantly decreased in the case of increasing PEI loading. As shown in Table 1, specific surface area ( $S_{BET}$ ) and pore volume ( $V_p$ ) of the neat silica xerogel decreased after PEI functionalization. Silica xerogel loaded with 70 wt% PEI had the surface area and pore volume as low as 8 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> and 0.04 cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>, respectively. It was resulted from filling pores of functionalized silica xerogels with PEI through PEI diffusion into the pores by pressure and concentration difference force in addition to PEI adsorption on the pore walls (Kong *et al.*, 2016). A slight increase in pore size of the neat silica xerogel was observed in the presence of PEI molecules. In the case of functionalization, smaller pores were generally blocked by functionalization agents; however, larger pores are preserved (Zhao *et al.*, 2019). So, pore size of the materials can show an increase in spite of a decrease in pore volume.

**Table 1.** Pore structure properties and bulk density of PEI functionalized silica xerogels

Samples	$S_{BET}$ (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	$V_p$ (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	Pore size (nm)	Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )
Neat silica xerogel	195	0.50	10	0.037
Silica xerogel-PEI-30	40	0.22	18	0.165
Silica xerogel-PEI-50	18	0.11	18	0.176
Silica xerogel-PEI-70	8	0.04	17	0.190

The neat silica xerogel exhibited ultra-low bulk density which is very significant for gas capture processes. However, PEI functionalization caused a sharp increase in bulk density of the neat silica xerogel due to the presence of organic moieties belonging to PEI. Impregnation of PEI molecules into the neat silica xerogel increased the solid part of the silica network resulting in higher bulk density (Guzel Kaya *et al.*, 2020). Bulk density of the neat silica xerogel increased up to 0.190 g cm<sup>-3</sup> with the loading of 70 wt% PEI (Table 1).

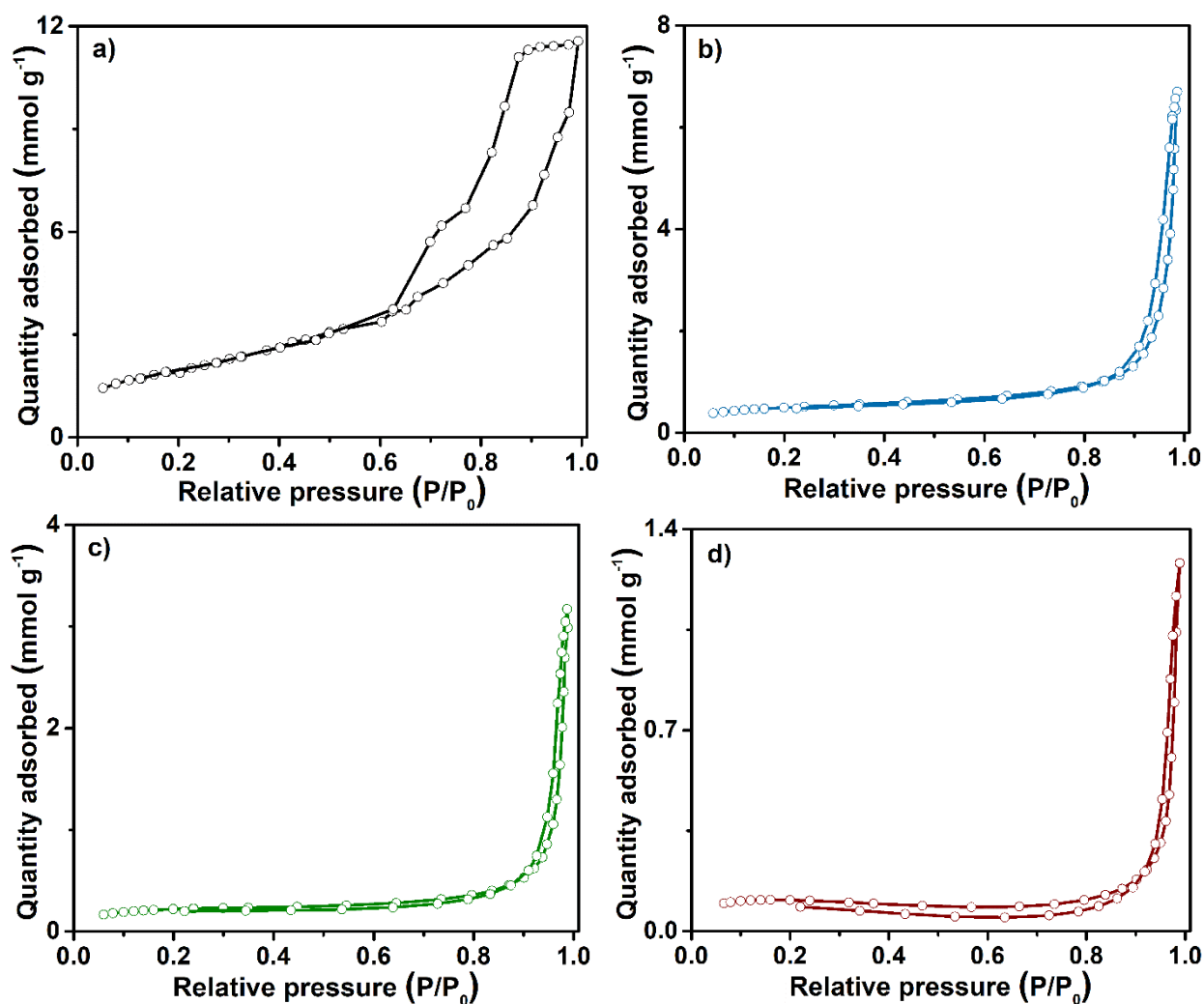


Figure 2. N<sub>2</sub> adsorption-desorption isotherm of a) neat silica xerogel, b) silica xerogel-PEI-30, c) silica xerogel-PEI-50 and d) silica xerogel-PEI-70

The particle size of the adsorbents is one of the important factors that affects CO<sub>2</sub> capture process in fixed-bed columns, especially CO<sub>2</sub> adsorption rate (Balsamo *et al.*, 2013; Santiago *et al.*, 2019). Figure 3 shows average particle size of PEI functionalized silica xerogels as a function of PEI loading. The average particle size of the neat silica xerogel was 86 nm. With PEI loading, particle size of PEI functionalized silica xerogels changed between 120 nm and 250 nm. PEI molecules on the silica xerogel surface behaved like a coating which led to increase particle size of the samples.

Zeta potential of the adsorbents is another important factor that reveals surface charge of the materials. The neat silica xerogel exhibited negative zeta potential value which was indication of negative surface charge as shown in Figure 3. In the case of PEI loading, PEI functionalized silica xerogels with positively charge were obtained. It is known that zeta potential of CO<sub>2</sub> molecules without surfactants changes from ~ -14 mV to ~ 32 mV depending on pH (2 - 12) (Kim and Kwak, 2017). So, it can be said that good interactions between PEI functionalized silica xerogels and CO<sub>2</sub> molecules are expected.

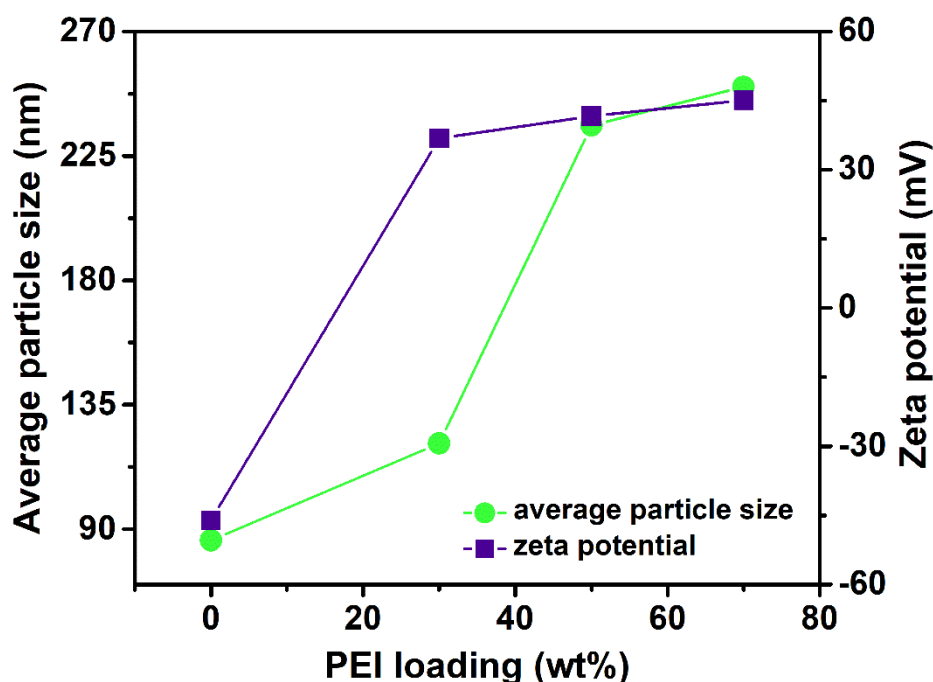


Figure 3. Average particle size and zeta potential of PEI functionalized silica xerogels as a function of PEI loading

Figure 4a shows CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the neat silica xerogel and PEI functionalized silica xerogels. It was observed that CO<sub>2</sub> adsorption occurred through two stages including quick initial CO<sub>2</sub> uptake (in ~ 10 min) followed by slower CO<sub>2</sub> uptake. In the first stage, CO<sub>2</sub> adsorption rate was considerably high due to more active sites for CO<sub>2</sub> adsorption. With CO<sub>2</sub> saturation of the samples, CO<sub>2</sub> uptake became slower (Sanz-Pérez *et al.*, 2017).

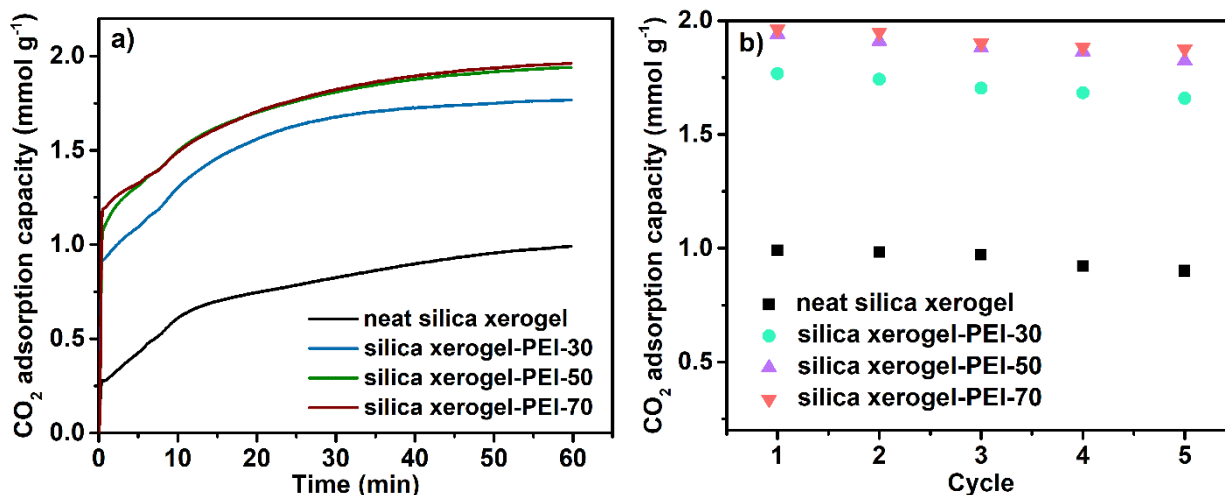


Figure 4. a) CO<sub>2</sub> adsorption capacity and b) CO<sub>2</sub> adsorption-desorption cycles of the neat silica xerogel and PEI functionalized silica xerogels

CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the neat silica xerogel (0.98 mmol g<sup>-1</sup>) was significantly increased in the case of PEI loading. An increase in amount of PEI had synergistic effects on CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the samples that was contributed to more amine content promoting higher CO<sub>2</sub> adsorption. CO<sub>2</sub> adsorption capacity of silica xerogel loaded with 50 wt% PEI was determined as 1.94 mmol g<sup>-1</sup>. Compared to CO<sub>2</sub> adsorption capacity of silica xerogel loaded with 50 wt% PEI, 70 wt% PEI loading provided a slight increase in CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the silica xerogel (1.96 mmol g<sup>-1</sup>). It is known

that excessive PEI loading generally decreases or slightly increases CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the materials. It is originated from PEI agglomerations on the surface of materials as well as increasing pore size making mass transfer difficult (Thi Le *et al.*, 2014). And also, the time required to achieve 90% of the equilibrium CO<sub>2</sub> adsorption capacity showed an increase from 21.9 min to 24.6 min with increasing PEI loading from 30 wt% to 70%, respectively. An increase in the time can be explained with PEI coating on the material surface in addition to PEI filled pores decelerates CO<sub>2</sub> diffusion (Panek *et al.*, 2017).

Under dry conditions, CO<sub>2</sub> adsorption mechanism is explained with reactions between amine groups and CO<sub>2</sub> molecules resulting in carbamate formation as expressed by the following equation. Firstly, zwitterion intermediate is formed by nucleophilic attack of amine group to CO<sub>2</sub>. And then, the zwitterion is deprotonated by another amine group in which formation of carbamate, consists of two nitrogen, is observed (Wang *et al.*, 2015; Zeleňák *et al.*, 2008).



Table 2 exhibits CO<sub>2</sub> adsorption capacity of other PEI functionalized silica based materials. Compared to that of the other materials, CO<sub>2</sub> adsorption capacity of PEI functionalized silica xerogel was higher. And also, when considered using cheap silica precursor to synthesize silica xerogel, the material can be regarded as a potential CO<sub>2</sub> adsorbent.

**Table 2.** Comparison of CO<sub>2</sub> adsorption capacity of other PEI functionalized silica based materials

Material	PEI loading (wt%)	Adsorption capacity (mmol g <sup>-1</sup> )	Reference
MCM-36	16.3	0.27	(Cogswell <i>et al.</i> , 2015)
SBA-15	43	0.81	(Gargiulo <i>et al.</i> , 2014)
MCM-41	50	1.00	(Xu <i>et al.</i> , 2002)
Core-shell 5A/silica	40	1.06	(Liu <i>et al.</i> , 2016)
Silica gel bead	15	1.16	(Minju <i>et al.</i> , 2015)
Fumed silica	50	1.70	(Goepfert <i>et al.</i> , 2011)
Silica xerogel	50	1.94	In this study
HMS	45	2.90	(Chen <i>et al.</i> , 2010)
KIT-6	50	3.07	(Son <i>et al.</i> , 2008)
Pore expanded MCM-41	55	4.77	(Heydari-Gorji <i>et al.</i> , 2011)

In CO<sub>2</sub> adsorption processes, regeneration of adsorbents is substantial for energy and cost saving. Generally, temperature swings (50 – 120 °C) are preferred to regenerate the adsorbent under an inert gas. However, at high temperatures, amine degradation caused a decrease in CO<sub>2</sub> adsorption capacity of amine functionalized adsorbents (Chen *et al.*, 2017). Figure 4b shows CO<sub>2</sub> adsorption capacity of PEI functionalized silica xerogels for each cycle. A slight decrease was observed in CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the materials after 5 cycles that was assigned to possibility of amine leaching as well as deactivation of available sites on material surface (Kishor and Ghoshal, 2017). As a result, PEI functionalized silica xerogel with good stability can be used for long-term CO<sub>2</sub> adsorption processes.

#### 4. CONCLUSION

PEI functionalized silica xerogels were successfully prepared by physical impregnation method.

Effective PEI functionalization of the neat silica xerogel was supported by FTIR results. With increasing PEI loading from 30 wt% to 70%, specific surface area of the neat silica xerogel considerably decreased. While pore volume of the neat silica xerogel was decreased in the case of PEI loading, an increase in pore size of the neat silica xerogel was observed. Due to the behaviour of PEI molecules as a coating on the silica xerogel surface, particle size of PEI functionalized silica xerogels was higher than that of the neat silica xerogel. PEI loading provided to increase zeta potential of the neat silica xerogel that improved interactions between CO<sub>2</sub> and amine groups on the silica xerogel. Synergistic effects of PEI functionalization on the CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the neat silica xerogel were specified. Up to 50 wt% PEI loading, a significant increase in CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the neat silica xerogel was observed. However, 70 wt% PEI loading slightly increased CO<sub>2</sub> adsorption capacity compared to CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the silica xerogel loaded with 50 wt% PEI. At the end of CO<sub>2</sub> adsorption-desorption cycles, PEI functionalized silica xerogels showed good regeneration and stability. According to the results, it can be said that PEI functionalized silica xerogels are potential adsorbents for long-term CO<sub>2</sub> capture applications regarding as energy and cost saving.

## REFERENCES

- Balsamo, M., Rodríguez-Reinoso, F., Montagnaro, F., Lancia, A., Erto, A., 2013, "Highlighting the Role of Activated Carbon Particle Size on CO<sub>2</sub> Capture from Model Flue Gas", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 12183-12191.
- Chen, C., Son, W.-J., You, K.-S., Ahn, J.-W., Ahn, W.-S., 2010, "Carbon dioxide capture using amine-impregnated HMS having textural mesoporosity", *Chemical Engineering Journal*, 161, 46-52.
- Chen, C., Zhang, S., Row, K. H., Ahn, W.-S., 2017, "Amine-silica composites for CO<sub>2</sub> capture: A short review", *Journal of Energy Chemistry*, 26, 868-880.
- Cogswell, C. F., Jiang, H., Ramberger, J., Accetta, D., Willey, R. J., Choi, S., 2015, "Effect of Pore Structure on CO<sub>2</sub> Adsorption Characteristics of Aminopolymer Impregnated MCM-36", *Langmuir*, 31, 4534-4541.
- Dos Santos, L. M., Bernard, F. L., Polesso, B. B., Pinto, I. S., Frankenberg, C. C., Corvo, M. C., ... & Einloft, S., 2020, "Designing silica xerogels containing RTIL for CO<sub>2</sub> capture and CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation: Influence of ILs anion, cation and cation side alkyl chain length and ramification", *Journal of Environmental Management*, 268, 110340.
- Dutcher, B., Fan, M., Russell, A. G., 2015, "Amine-based CO<sub>2</sub> capture technology development from the beginning of 2013-a review", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 2137-48.
- Gargiulo, N., Peluso, A., Aprea, P., Pepe, F., Caputo, D., 2014, "CO<sub>2</sub> Adsorption on Polyethylenimine-Functionalized SBA-15 Mesoporous Silica: Isotherms and Modeling", *Journal of Chemical & Engineering Data*, 59, 896-902.
- Goeppert, A., Czaun, M., May, R. B., Prakash, G. K. S., Olah, G. A., Narayanan, S. R., 2011, "Carbon Dioxide Capture from the Air Using a Polyamine Based Regenerable Solid Adsorbent", *Journal of the American Chemical Society*, 133, 20164-20167.
- Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., Deveci, H., 2019, "A novel silica xerogel synthesized from volcanic tuff as an adsorbent for high-efficient removal of methylene blue: parameter optimization using Taguchi experimental design", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 94, 2729-2737.
- Guzel Kaya, G., Yilmaz, E., Deveci, H., 2020, "Synthesis of sustainable silica xerogels/aerogels using inexpensive steel slag and bean pod ash: A comparison study", *Advanced Powder Technology*, 31, 926-936.
- Heydari-Gorji, A., Belmabkhout, Y., Sayari, A., 2011, "Polyethylenimine-Impregnated Mesoporous Silica: Effect of Amine Loading and Surface Alkyl Chains on CO<sub>2</sub> Adsorption", *Langmuir*, 27, 12411-12416.
- Kim, M.-S., Kwak, D.-H., 2017, "Effect of Zeta Potential on Collision-Attachment Coefficient and Removal Efficiency for Dissolved Carbon Dioxide Flotation", *Environmental Engineering Science*, 34, 272-280.

- Kishor, R., Ghoshal, A. K., 2017, "Amine-Modified Mesoporous Silica for CO<sub>2</sub> Adsorption: The Role of Structural Parameters", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56, 6078-6087.
- Kong, Y., Jiang, G., Wu, Y., Cui, S., Shen, X., 2016, "Amine hybrid aerogel for high-efficiency CO<sub>2</sub> capture: Effect of amine loading and CO<sub>2</sub> concentration", *Chemical Engineering Journal*, 306, 362-368.
- Li, B., Duan, Y., Luebke, D., Morreale, B., 2013, "Advances in CO<sub>2</sub> capture technology: A patent review", *Applied Energy*, 102, 1439-1447.
- Li, K., Jiang, J., Tian, S., Yan, F., Chen, X., 2015, "Polyethyleneimine-nano silica composites: a low-cost and promising adsorbent for CO<sub>2</sub> capture", *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 2166-2175.
- Linneen, N. N., Pfeffer, R., Lin, Y. S., 2013, "Amine Distribution and Carbon Dioxide Sorption Performance of Amine Coated Silica Aerogel Sorbents: Effect of Synthesis Methods", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 14671-14679.
- Liu, X., Gao, F., Xu, J., Zhou, L., Liu, H., Hu, J., 2016, "Zeolite@Mesoporous silica-supported-amine hybrids for the capture of CO<sub>2</sub> in the presence of water", *Microporous and Mesoporous Materials*, 222, 113-119.
- Lou, F., Zhang, A., Zhang, G., Ren, L., Guo, X., Song, C., 2020, "Enhanced kinetics for CO<sub>2</sub> sorption in amine-functionalized mesoporous silica nanosphere with inverted cone-shaped pore structure", *Applied Energy*, 264, 114637.
- Minju, N., Abhilash, P., Nair, B. N., Mohamed, A. P., Ananthakumar, S., 2015, "Amine impregnated porous silica gel sorbents synthesized from water-glass precursors for CO<sub>2</sub> capturing", *Chemical Engineering Journal*, 269, 335-342.
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., Varshney, P., 2012, "Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review", *Energy*, 46, 431-441.
- Niu, M., Yang, H., Zhang, X., Wang, Y., Tang, A., 2016, "Amine-Impregnated Mesoporous Silica Nanotube as an Emerging Nanocomposite for CO<sub>2</sub> Capture", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8, 17312-17320.
- Olivares-Marín, M., Maroto-Valer, M. M., 2012, "Development of adsorbents for CO<sub>2</sub> capture from waste materials: a review", *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2, 20-35.
- Panek, R., Wdowin, M., Franus, W., Czarna, D., Stevens, L. A., Deng, H., ... & Snape, C. E., 2017, "Fly ash-derived MCM-41 as a low-cost silica support for polyethyleneimine in post-combustion CO<sub>2</sub> capture", *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 22, 81-90.
- S. Aquino, A., O. Vieira, M., Ferreira, A. S. D., Cabrita, E. J., Einloft, S., O. de Souza, M., 2019, "Hybrid Ionic Liquid-Silica Xerogels Applied in CO<sub>2</sub> Capture", *Applied Sciences*, 9, 2614.
- Sang Sefidi, V., Luis, P., 2019, "Advanced Amino Acid-Based Technologies for CO<sub>2</sub> Capture: A Review", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 20181-20194.
- Santiago, R., Lemus, J., Hospital-Benito, D., Moya, C., Bedia, J., Alonso-Morales, N.,... & Palomar, J., 2019, "CO<sub>2</sub> Capture by Supported Ionic Liquid Phase: Highlighting the Role of the Particle Size", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 13089-13097.
- Sanz-Pérez, E. S., Dantas, T. C. M., Arencibia, A., Calleja, G., Guedes, A. P. M. A., Araujo, A. S., & Sanz, R., 2017, "Reuse and recycling of amine-functionalized silica materials for CO<sub>2</sub> adsorption", *Chemical Engineering Journal*, 308, 1021-1033.
- Sher, F., Iqbal, S. Z., Albazzaz, S., Ali, U., Mortari, D. A., Rashid, T., 2020, "Development of biomass derived highly porous fast adsorbents for post-combustion CO<sub>2</sub> capture", *Fuel*, 282, 118506.
- Son, W.-J., Choi, J.-S., Ahn, W.-S., 2008, "Adsorptive removal of carbon dioxide using polyethyleneimine-loaded mesoporous silica materials", *Microporous and Mesoporous Materials*, 113, 31-40.
- Taheri, F. S., Ghaemi, A., Maleki, A., Shahhosseini, S., 2019, "High CO<sub>2</sub> Adsorption on Amine-Functionalized Improved Mesoporous Silica Nanotube as an Eco-Friendly Nanocomposite", *Energy & Fuels*, 33, 5384-5397.
- Thi Le, M. U., Lee, S.-Y., Park, S.-J., 2014, "Preparation and characterization of PEI-loaded MCM-41 for CO<sub>2</sub> capture", *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 12340-12346.

- Wang, X., Chen, L., Guo, Q., 2015, "Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO<sub>2</sub> capture", *Chemical Engineering Journal*, 260, 573-581.
- Witoon, T., Tatan, N., Rattanavichian, P., Chareonpanich, M., 2011, "Preparation of silica xerogel with high silanol content from sodium silicate and its application as CO<sub>2</sub> adsorbent", *Ceramics International*, 37, 2297-2303.
- Xu, X., Song, C., Andresen, J. M., Miller, B. G., Scaroni, A. W., 2002, "Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO<sub>2</sub> Capture", *Energy & Fuels*, 16, 1463-1469.
- Zeleňák, V., Badaničová, M., Halamová, D., Čejka, J., Zukal, A., Murafa, N., & Goerigk, G., 2008, "Amine-modified ordered mesoporous silica: Effect of pore size on carbon dioxide capture", *Chemical Engineering Journal*, 144, 336-342.
- Zhang, S., Chen, C., Ahn, W.-S., 2019, "Recent progress on CO<sub>2</sub> capture using amine-functionalized silica", *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 16, 26-32.
- Zhao, P., Zhang, G., Xu, Y., Lv, Y., 2019, "Amine functionalized hierarchical bimodal mesoporous silicas as a promising nanocomposite for highly efficient CO<sub>2</sub> capture", *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 34, 543-557.





## ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYALAR VE TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Muhammet Yasin KABA , <sup>2</sup>Orhan KALKAN , <sup>3</sup>Ali CELEN 

*Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 24002, Erzincan, TÜRKİYE*

<sup>1</sup>mykaba@yahoo.com, <sup>2</sup>orhan.kalkan@erzincan.edu.tr, <sup>3</sup>alicelen@erzincan.edu.tr

**(Geliş/Received: 31.05.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.09.2021)**

**ÖZ:** Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip araçlarla karşılaştırıldıklarında çevreci ve daha yüksek verimli olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaktadırlar. Elektrikli araçları oluşturan önemli ekipmanlardan biri olan bataryanın seçimi ve termal yönetimi önemlidir. Bu çalışmada, elektrikli araçların genel görünümü (tarihçesi, sınıflandırılması, satış sayıları, pazar payları), elektrikli araçlarda kullanılacak batarya türleri ve batarya termal yönetim sistemleri araştırılmıştır. Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan farklı batarya çeşitleri karakteristik özelliklerine göre karşılaştırılmış olup bu bataryalar arasından elektrikli araçlarda kullanılacak/kullanılan batarya türünün yüksek özgül enerji (118-250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve ideal çalışma sıcaklığı (-20°C-60°C) özellikleri ile lityum iyon bataryalar olduğu görülmüştür. Bu bataryalardan en fazla performansın elde edilmesi için kullanılacak termal yönetim sistemleri incelenmiş olup bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Düşük ısı yüküne sahip araçlarda (hibrit elektrikli araçlar vb.) hava ile soğutmanın yeterli olduğu görülmüş olup yüksek ısı yüküne sahip araçlarda (tam elektrikli araçlarda) ise sıvı akışkanlı ve hibrit soğutma yöntemlerinin kullanımının uygun olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araçlar, Bataryalar, Batarya termal yönetim sistemleri

### The Investigation of Batteries and Thermal Management Systems Used in Electric Vehicles

**ABSTRACT:** Nowadays, electric vehicles come to the fore more than vehicles with internal combustion engines since electric vehicles are environmentally friendly and highly more efficient. Selection and thermal management of the battery, which is one of the most important equipment that constitutes electric vehicles, is important. In this study, the general view (history, classification, sales numbers, market shares) of electric vehicles, battery types that can be used in electric vehicles and battery thermal management systems were investigated. Different types of batteries commonly used in applications are compared according to their characteristics, and among these batteries, it has been observed that the type of battery that can be used in electric vehicles is lithium-ion batteries which have high specific energy (118-250 Wh/kg), high energy density (200-400 Wh/L), high specific power (200-430 W/kg), high cycle life (2000) and ideal operating temperature (-20°C-60°C). The thermal management systems, which can be used to obtain maximum performance from these batteries, are investigated and advantages and disadvantages of these methods are investigated. While it has been seen that air cooling is sufficient in vehicles with low thermal load (hybrid electric vehicles, etc.), it is observed that the use of liquid and hybrid cooling methods is appropriate in vehicles with high thermal load (full electric vehicles).

**Key Words:** Electric vehicles, batteries, battery thermal management systems

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

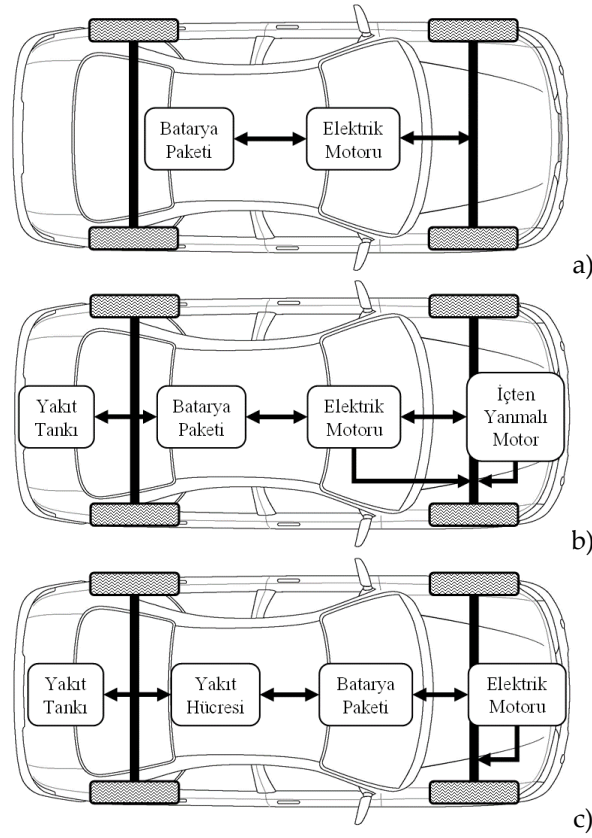
Günümüzde içten yanmalı motorlara sahip araçlarla karşılaştırıldıklarında çevreci ve daha yüksek verimli olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaktadırlar. Elektrikli araçların tarihçesi 19. yüzyıl dönemine dayanmakta olup tarihte bilinen ilk elektrikli aracı (lokomotif) Thomas Davenport 1835 yılında Amerika'da üretmiştir. Robert Anderson aynı yıllarda (1832-1839) İskoçya'da yaptığı çalışmalar sonucunda bir elektrikli araç (otomobil) geliştirmiş olup bu araç şarj edilebilen bataryalara sahip değildi (Fessler, 2019). 19. Yüzyılın sonlarına gelindiğinde ise Belçikalı yarışçı Camille Jenatzy'nin 1899 yılında geliştirdiği 'La Jamais Contente' olarak da bilinen elektrikli aracı 106 km/h hız ile karada 100 km/h hız sınırını aşan ilk araç olmuştur. Bu yıllardan sonra elektrikli araçlara talep artmış ve lokomotif, bisiklet ve otomobil üretilmeye başlanmıştır (Larminie ve Lowry, 2012). Üretilen otomobillerin dünyadaki ilk elektrikli taksi olarak New York'ta yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu elektrikli araçların kullanımı ile elektrikli araçlar %38'lik bir pazar payına sahipti. Dönemin piyasasında üretilen içten yanmalı motora sahip araçlar oldukça pahalı olup zor ve gürültülü çalışmaktaydı. 1908 yılında Henry Ford tarafından ilk seri üretilen Model T adlı benzinli araç 1912 yılına gelindiğinde Amerikan araç piyasasında büyük değişikliklere yol açmıştır. Bu değişikliklerin başında seri üretildikleri için benzinli araçların fiyatlarının düşük ve menzillerinin ise daha yüksek olması gelmiştir. Bu sebeple elektrikli araçlar piyasadaki önemlerini kaybetmişlerdir. 1960'lı yılların başında Avrupa ve Amerika'daki hava kirliliğinin oluşumunda büyük bir rol oynayan yoğun üretim yapan fabrikalar, binlerce kişinin sağlık sorunları yaşamasına ve hatta hayatını kaybetmesine neden olmuştur. Yine aynı zamanlarda araç sayısının artması ve ısınmada kullanılan zararlı yakıtlar sebebi ile elektrikli araçlar tekrar gündeme gelmişlerdir (Hedef Filo, 2021). 1971 yılında ise General Motors ve Boeing tarafından NASA için LRV (Lunar Roving Vehicle) adında Ay'ın düşük yer çekimli ortamında çalışmak üzere tasarlanmış hafif, elektrikli bir araç üretilmiştir. Bu araç Ay yüzeyinde hareket etme kabiliyetine sahip olup, Apollo astronotlarının uzay dışı faaliyetlerinin kapsamını genişletmelerine izin vermiştir. Bunun yanı sıra elektrikli araçların prestijini de yükseltmeye faydada bulunmuştur (Nasa Space Science Data Coordinated Archive, 2021). Alman araç üreticisi BMW, 1972 yılında 1602 E adlı bir konsept araç tasarlayıp, bu aracı dönemin Münih Olimpiyat Oyunları'nda sergilemiş olmasına rağmen asla üretime geçememiştir. 1973 yılında çıkan OPEC Petrol Krizi sebebi ile benzin maliyetlerinin yükselmesi elektrikli araç konusunun tekrar gündeme gelmesine olanak sağlamıştır. Takip eden yıllarda Vanguard-Sebring adlı markanın üretmiş olduğu CitiCar adlı model, Washington DC'deki Elektrikli Araç Sempozyumunda sergilenmiştir. CitiCar aracın amaçlanan kullanımı şehir içi olmasına rağmen, aracın klima ve açılır pencerelere sahip olmaması kamuoyunun bu araç hakkındaki fikrini olumsuz yönde etkilemiştir. 1975'te Consumer Reports adlı kuruluş CitiCar'ı kabul edilemez olarak derecelendirinceye kadar aracın 2000 adetten fazla satışı yapılmıştır (Palinski, 2017). 1996 yılında General Motors tarafından EV1 isimli elektrikli araç Amerika'da üretilmiş ve finansal kiralama (leasing) aracılığıyla kullanıcıyla buluşturulmuştur. Daha sonra bu araç kullanıcılardan çok olumlu tepkiler almasına rağmen aracın üretimi durdurulmuş ve kiralanan araçlar firma tarafından geri çağırılmıştır (Fessler, 2019). 1998 yılına gelindiğinde ise Toyota, Prius adlı modelini tanıtmıştır. Bu model dünyada ilk kez ticari olarak pazarlanan ve seri üretilen hibrit araç olma özelliğini taşımaktadır. Üretildiği yıl yaklaşık 18 bin adet satılmış olup dünya çapında satışa sunulduğu ilk yıl ise 50 bin adet satılmıştır (Hedef Filo, 2021). 2010 yılında General Motors firması tarafından Chevrolet Volt adlı araç piyasaya sürülmüştür. Bu araç ticari olarak satılan ilk şarjlı hibrit araç olma özelliğini taşımaktadır. Yine 2010 yılının sonlarında Japon araç üreticisi Nissan, tamamen elektrikli, Nissan Leaf adlı modeli piyasaya sürmüştür. 2011 yılında Mitsubishi i-MiEV 10 binden fazla satış yapan ilk elektrikli araç olma unvanını almıştır. 2012 yılında Tesla şirketi dünyanın önde gelen otomobil gazetecileri ve tüketici teknolojisi inceleme şirketi Consumer Reports'tan hızla en yüksek puanları alan modelini (Model S) piyasaya sürmüştür. Bu araç çoğu kişi tarafından, dünyadaki her türden en iyi seri üretim arabası olarak kabul edilmiştir. 2013 yılında Nissan Leaf 50 binden fazla satış yapan ilk elektrikli araç olmuştur. Yine 2013 yılının belirli aylarında Nissan Leaf ve Tesla Model S, Norveç'te tüm araç kategorilerinde en çok satış yapan elektrikli araç olma unvanını kazanmıştır. Aynı yıl Renault ve Nissan firmaları bir çatıda birleşerek dünya çapında 100 bin şarjlı hibrit araç satışı gerçekleştirmiş ve bunu yapan ilk şirket olmuşlardır. 2014 yılında araç üreten

firmaların büyük bir çoğunluğu mevcut modellerine hibrit araçlar ekleyerek veya tam elektrikli araçlar üreterek elektrikli araç piyasasında yer kazanmışlardır (Clean Technica, 2021).

Karbondioksit, karbon monoksit, hidrokarbonlar, nitrojen oksitler gibi zararlı gazların çevreye salınımının olmadığı elektrikli motorlu araçların üretiminin ve piyasada kazandığı önemin artmasıyla birlikte, günümüzde araştırmacılar da elektrikli araçlar üzerine çalışmalarını arttırmışlardır. Yapılan çalışmalarda, içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük maliyetli işletme koşullarına sahip, egzoz emisyonu düşük ve sessiz bir ortam sağlayan elektrik motorlu araçların geliştirilmesi de ele alınmıştır (Tie ve Tan, 2013). Toplumdaki çevreye duyarlılığın da bu ölçütte artmasına ile birlikte küresel ısınma ve fosil yakıtların azalması gibi insan hayatını etkileyen birçok etkiden dolayı elektrikli araçlar birçok tüketicinin de tercihi olmaktadır (Şenlik, 2015).

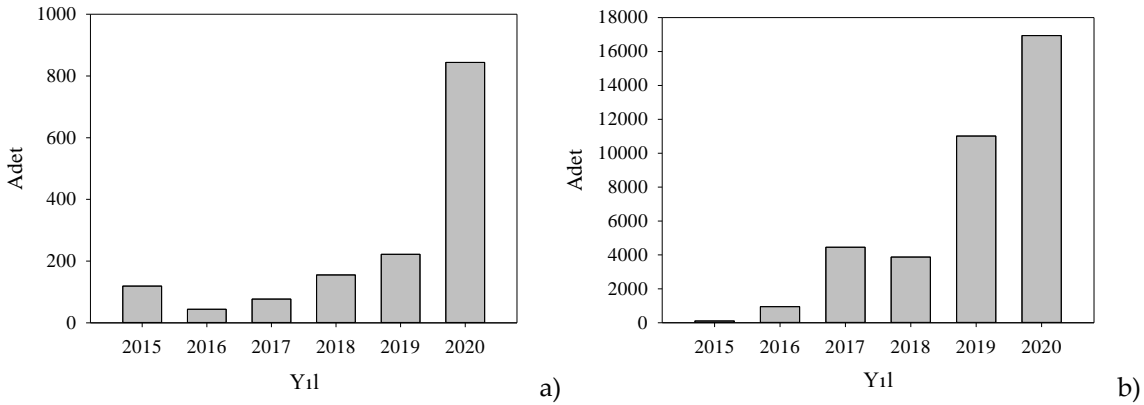
Elektrikli araçlar, tamamen elektrikli araç, hibrit araç ve yakıt hücreli araç olmak üzere üç ana sınıfa ayrılırlar (Ehsani ve diğ., 2018). Şekil 1a'dan da görülebileceği üzere, tamamen elektrikli araçlar temel olarak bünyesinde büyük hacme sahip bir batarya paketi ve elektrik motorunu barındırırlar. Bataryadan alınan enerji kullanılarak elektrik motorlar sayesinde hareket sağlanması ve rejeneratif frenleme sayesinde bataryanın şarj edilebilmesi elektrikli araçların avantajları olarak sıralanırken, hibrit araçlara kıyasla daha büyük ağırlıklara sahip bataryalar kullanılması, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla kısıtlı menzile sahip olmaları ve tam şarjlarının uzun süre almaları gibi dezavantajları da mevcuttur. Şekil 1b'de şematik resmi verilen hibrit araçlar ise küçük hacme sahip bir batarya paketi, elektrik motoru, içten yanmalı bir motor ve yakıt tankından oluşmaktadır. Hibrit araçlar elektrik güçlerine göre mikro (2-5 kW), küçük (10-20 kW), tam (15-100 kW) ve şarjlı hibrit (70 kW'dan büyük) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu araçların avantajları hem elektrik motorlarına hem de içten yanmalı motorlara sahip olmaları dolayısıyla veriminin büyük ölçüde artması ve egzoz emisyonlarının önemli oranda azalması olarak ifade edilebilirken dezavantajları ise elektrikli motor kullanılarak kat edilebilecek menzilin kısıtlı olması ve araç maliyetlerinin yüksek olmasıdır (Dinçer ve diğ., 2016). Şekil 1c'de şematik resmi verilen yakıt hücreli araçlarda ise güç, havanın ve yakıtın elektrokimyasal tepkimesi sonucu elektrik üreten yakıt hücresi sistemleri aracılığıyla elde edilir. Yakıt hücreleri genellikle anot, katot ve elektrolitten oluşurlar. Bu hücrelere sahip araçlarda hücreler, elektrik motorunun ihtiyacı olan enerjiyi ürettikleri için elektrikli araç sınıfına girmektedirler. Yakıt hücreli araçlar yakıt hücresi, yakıt tankı, elektrik motoru ve bataryadan oluşmaktadır. Yüksek verimlilik, egzoz emisyonlarının önemli oranda az olması, gürültüsüz olmaları, hafif ve kompakt yapıda olmaları gibi avantajları varken, pahalı olmaları, hidrojenin üretimi, dağıtımı ve depolanmasının zorlukları gibi dezavantajları vardır (Mustafa ve diğ., 2010).

Elektrikli araçlar için günümüzün en yaygın problemlerinden birisi de şarj konusu olup çeşitli güçlerde şarj istasyonları ve çeşitli tiplerde şarj soketleri mevcuttur. Elektrikli araçlarda şarj, temaslı ve temassız olmak üzere ikiye ayrılır. Temaslı şarj elektrikli aracın bir kablo aracılığıyla şebeke ya da şarj istasyonuna bağlanması sonucu gerçekleşir. Temassız şarj ise cep telefonu gibi birçok elektronik cihazda kullanılan hem kablosuz hem de hızlı şarj teknolojisinin elektrikli araçlarda da uygulanması durumudur (Durmuş ve Kaymaz, 2020).



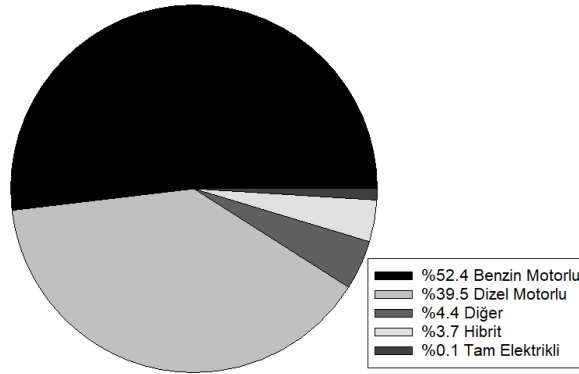
**Şekil 1.** Elektrikli araçların temel bileşenleri, a) %100 elektrikli araçlar, b) hibrit araçlar ve c) yakıt hücreli araçlar

*Figure 1. Basic components of electric vehicles a) 100% electric vehicles, b) hybrid vehicles and c) fuel cell vehicles*



**Şekil 2.** Türkiye’de elektrikli araç satışlarının yıllara göre değişimi a) %100 elektrikli araçlar, b) hibrit araçlar (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

*Figure 2. Change in electric vehicle sales in Turkey by years a) 100% electric vehicles and b) hybrid vehicles (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)*

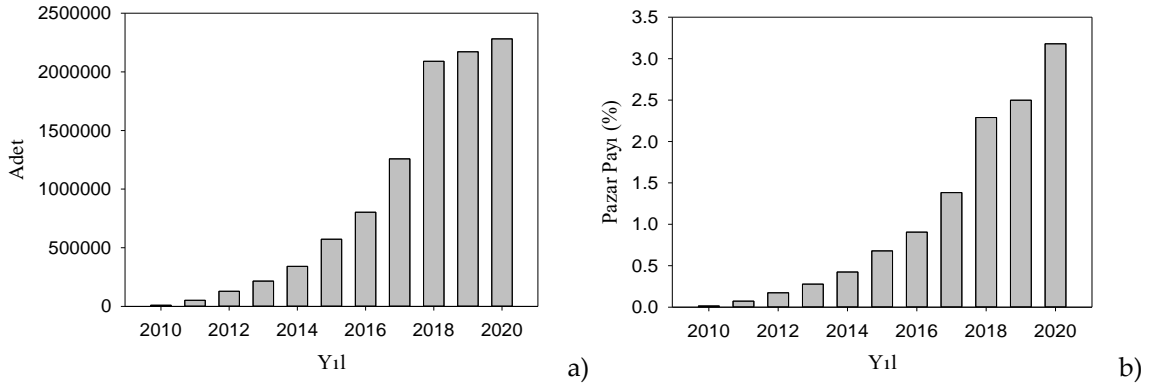


**Şekil 3.** 2020 yılı Türkiye otomobil pazarı (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

*Figure 3.* Turkish automobile market in 2020 (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021)

Ülkemizde önceki yıllar ile karşılaştırıldığında 2020 yılında elektrik araçlara olan talebin artmış olduğunu ve bu elektrikli araçlar arasından hibrit araçların daha çok tercih edildiği fark edilmektedir. Bu fark Şekil 2a) ve Şekil 2b)'deki elektrikli araç satışlarının yıllara göre değişimini gösteren grafikten de açıkça görülmektedir. 2020 Türkiye Otomobil Pazarına bakıldığında ise elektrikli araçlar bu pazarın %3,8'ini kapsamaktadırlar. Şekil 3'te de görüldüğü üzere bu pazarın geri kalan %52,4'ünü benzin motorlu araçlar, %39,5'ini dizel motorlu araçlar ve geriye kalan %4,4'ünü ise diğer araçlar oluşturmaktadır (Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, 2021).

Şekil 4a ve Şekil 4b'de verilen grafiklerde sırası ile 2010-2020 yılları arasında küresel çapta elektrikli araçların satış sayıları ve bu satışların otomobil piyasasındaki pazar payı görülebilmektedir (International Energy Agency, 2021). Bu grafiklerden de anlaşılacağı üzere elektrikli araçların satış adetleri 2018 yılından itibaren hızla artmış ve dünya pazarında daha fazla yer almaya başlamışlardır.



**Şekil 4.** 2010-2020 yılları arasında a) dünyadaki elektrikli araçların satış sayısı, b) elektrikli araçların küresel pazardaki payı (International Energy Agency, 2021)

*Figure 4.* Between the years 2010-2020 a) the number of sales of electric vehicles in the world and b) the share of electric vehicles in the global market (International Energy Agency, 2021)

2021 yılı için yapılan bir araştırmada dünya çapındaki birçok araç üreticisi arasından seçilmiş en iyi elektrikli ve hibrit araçların (Forbes, 2021a; Forbes, 2021b) batarya kapasitesi, beygir gücü, tork, yakıt tüketimi menzil ve fiyatlarına göre karşılaştırmalı listesi Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** 2021 yılına ait bazı elektrikli ve hibrit araçlar*Table 1. Some electric and hybrid vehicles of 2021*

Araç Adı	Model Yılı	Tipi	Batarya Kapasitesi	Beygir Gücü	Tork	Karışık Yakıt Tüketimi	Menzil	Fiyat
			kWh	hp	lb-ft	MPGe		
Audi e-tron (Car and Driver, 2021a)	2021	EV	95	355	414	78	220	80195
Chevrolet Bolt (Car and Driver, 2021b)	2021	EV	60	200	266	118	259	42695
Ford Mustang Mach-E (Car and Driver, 2021c)	2021	EV	68	266	428	93	211	50800
Honda Insight (Car and Driver, 2021d)	2021	HEV	1,2	151	99	48	540	30035
Honda Accord (Car and Driver, 2021e)	2021	HEV	1,3	212	129	48	614	35805
Hyundai Ioniq (Car and Driver, 2021f)	2020	HEV	1,6	139	109	55	654	32195
Hyundai Kona (Car and Driver, 2021g)	2021	EV	64	201	291	120	258	45600
Hyundai Sonata (Car and Driver, 2021h)	2021	HEV	1,62	192	139	47	594	36305
Kia Optima (Car and Driver, 2021i)	2020	HEV	1,76	192	271	42	668	23390
Lexus ES (Car and Driver, 2021j)	2020	HEV	29,1	215	163	44	567	39900
Porsche Taycan (Car and Driver, 2021k)	2021	EV	93,4	750	774	68	190	204330
Tesla Model 3 (Car and Driver, 2021l)	2021	EV	82	506	487	315	113	51190
Tesla Model Y (Car and Driver, 2021m)	2021	EV	75	456	471	303	111	55190
Toyota Avalon (Car and Driver, 2021n)	2021	HEV	-	215	163	43	567	44395
Toyota Camry (Car and Driver, 2021o)	2021	HEV	1,6	208	163	46	580	33715
Toyota Corolla (Car and Driver, 2021p)	2020	HEV	1,3	121	105	52	700	24095
Toyota Prius (Car and Driver, 2021q)	2021	HEV	8,8	121	105	52	610	33645
Toyota RAV4 Prime (Car and Driver, 2021r)	2021	HEV	18,1	219	163	40	594	33975
Volkswagen ID.4 (Car and Driver, 2021s)	2021	EV	82	201	229	97	250	45190

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA TİPLERİ VE ÖZELLİKLERİ (BATTERY TYPES AND SPECIFICATIONS USED IN ELECTRIC VEHICLES)

Bir elektrikli/hibrit araç tasarımında en önemli parametrelerden birisi uygun batarya tipinin seçimidir. Uygun batarya seçimi aracın performansı ve menzilinı doğrudan etkilemektedir. Elektrikli araçlarda kullanılacak birçok batarya çeşidi bulunmaktadır. Bu batarya çeşitleri Çizelge 3'te nominal gerilim, şarj, deşarj, minimal gerilim, spesifik enerji, şarj hızı, deşarj hızı, çevrim ömrü, termal sınır ve uygulama alanlarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Batarya terminolojisinde önemli kavramlardan olan nominal gerilim, bataryanın deşarjı süresince sağladığı gerçek gerilim değeridir. Minimal gerilim, bataryanın üretici firma tarafında tavsiye ettiği deşarj kesme gerilimi olarak tanımlanabilir. Bir bataryanın spesifik enerjisi birim ağırlık başına sahip olduğu enerji miktarını temsil etmektedir. Bataryanın şarj ve deşarj hızı olarak bilinen değerler ise sırasıyla bataryaya aktarılan ve bataryadan çekilen akım miktarlarının, batarya kapasitesine oranı olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte bataryanın kaç adet şarj/deşarj döngüsü yapabildiği, bataryanın çevrim ömründen anlaşılmaktadır. Bataryalar için belirlenen termal sınır ise batarya sıcaklığının çıkabileceği maksimum değeri göstermektedir (Battery University Group, 2021a; Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c; Battery University Group, 2021d).

Bu bataryalar içinden genellikle lityum iyon bataryalar, yüksek özgül enerji (118-250 Wh/kg), yüksek enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve ideal çalışma sıcaklığı (-20°C-60°C) gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler (Yong ve diğ., 2015).

Lityum iyon bataryalar genelde silindirik veya prizmatik geometrik yapıya sahiptir. Lityum iyon bataryalar kendi aralarındaki elektrikselsel bağlantı konfigürasyonları değiştirilerek (seri ya da paralel) elektrikli araçlarda kullanılmak üzere gruplar, modüller ve batarya paketlerini oluşturmaktadırlar. Tek bataryalar hücre olarak adlandırılmaktadırlar. Hücrelerin birbirlerine bağlanması ile gruplar, grupların birbirlerine bağlanmasıyla modüller, modüllerin birbirlerine bağlanmasıyla ise batarya paketleri oluşmaktadır (Lelie ve diğ., 2018).

**Çizelge 2.** Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi (Celen ve Kaba, 2021)*Table 2. Schematic representation of battery pack formation in electric vehicles (Celen and Kaba, 2021)*

	Gerilim	Akım
Hücre (Tek Batarya)	3,75 V ↓	3,1 Ah ↓
Grup (74 adet bataryanın birbirleri ile paralel bağlanması)	3,75 V ↓	229,4 Ah ↓
Modül (6 adet grubun birbirleri ile seri bağlanması)	22,5 V ↓	229,4 Ah ↓
Paket (16 adet modülün birbirleri ile seri bağlanması)	360 V	229,4 Ah

Çizelge 2’de silindirik lityum iyon bataryaların kullanılması ile oluşturulan bir %100 elektrikli araca ait batarya paketi görülmektedir. Çizelge 2’de gösterildiği gibi, bir adet batarya (hücre) 3,75 V gerilime, 3,1 Ah akıma ve 11,625 Wh güce sahiptir. 74 adet bataryanın birbirleri ile paralel bağlanması sonucu bir adet grup oluşmaktadır. Bu grup 3,75 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 860,25 Wh güce sahiptir. 6 adet grubun birbirleri ile seri bağlanması sonucunda bir adet modül oluşmaktadır. Bu modül 22,5 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 5161,5 Wh güce sahiptir. 16 adet modülün birbirleri ile seri bağlanması sonucunda ise bir adet batarya paketi oluşmaktadır. Bu batarya paketi 360 V gerilime, 229,4 Ah akıma ve 82584 Wh güce sahiptir (Celen ve Kaba, 2021).

Lityum iyon bataryalar belirli çalışma sıcaklıkları aralığında verimli çalışmaktadır. Batarya sıcaklığının 15°C-40°C aralığının dışında ve bataryalar arası maksimum sıcaklık farkının 5°C’nin üzerinde olması durumunda, bataryaların performansının, ömrünün ve güvenliğinin olumsuz yönde etkilendiği farklı araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Arora, 2018; Chen ve diğ., 2016; Pesaran, 2002; Ye ve diğ., 2015).

Buna ek olarak, bataryalardaki sıcaklık artışının elektrikli araçların performansını etkilemesinin yanı sıra bataryaların ömrünü de olumsuz açıdan etkilemektedir. Sıcaklık, bataryadaki katı elektrot ara yüzey katmanının oluşum hızını ve çatlak yayılma hızını doğrudan etkilediği için batarya ömrünü belirleyen önemli bir faktördür. Daha düşük sıcaklıktaki çalışma koşulları, katı elektrot ara yüzey katmanının büyümesini yavaşlatarak batarya ömrünü uzatır. Sıcaklık artışına bağlı olarak oluşan lityum iyon kayıpları nedeni ile batarya kapasitesinin de azaldığı görülür. Daha yüksek sıcaklıklar, bataryadaki çatlak büyüme oranını ve elektrot ara yüzey katmanı tabakasının büyüme oranını artırarak, çatlak yüzeylerde daha fazla elektrot tabakası ara yüzey katmanı oluşumuna neden olur. Bataryada oluşan çatlak yayılması sıcaklığın artmasıyla artar ve bu çatlakların yayılmasının kapasite ve güç kaybına sebep olur (Li ve diğ., 2018).

#### **ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİ (BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS USED IN ELECTRIC VEHICLES)**

Elektrikli araçların bataryalarındaki sıcaklık artışını önlemek ve bataryaların performansının, ömrünün ve güvenliğinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacı ile birçok farklı termal yönetim sistemi araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Batarya termal yönetim sistemleri Şekil 5’te de görüldüğü üzere enerji tüketimine göre, yöntemde kullanılan akışkanın türüne göre ve soğutma sisteminin düzenine göre sınıflandırılmaktadır (Arora, 2018).

**Çizelge 3.** Uygulamalarda kullanılan batarya çeşitleri (Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c; Battery University Group, 2021d)

*Table 3. Battery types used in applications (Battery University Group, 2021a; Battery University Group, 2021b; Battery University Group, 2021c)*

Kullanım	Termal Sınır (°C)	Çevrim Ömrü	Deşarj Hızı (C)	Şarj Hızı (C)	Spesifik Enerji (Wh/kg)	Minimal Gerilim (V)	Deşarj (V)	Şarj (V)	Nominal Gerilim	Kurşun Bazlı					Nikel Bazlı					Lityum Bazlı				
										SLI (Sulu)	Derin Döngülü (Sulu)	AGM (Kuru)	Jel (Kuru)	ALC	NiCd	NiMH	NiFe	NiZn	NiH	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA
Otomobiller (Marş, Işık)	-	12-15	Yüksek	0,1-0,5	30-50	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Az Sayıda Döngüye İhtiyaç Duyan Araç/ Cihazlar	-	150-200	Orta	>2-4	20-30	-	1,75	>2,40	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Askeri, Uçak, Yanış Araçları, Nascar Araçları, Denizcilik	-	5-10 Yıl	Orta veya Yüksek	>1	45-80	-	1,75	<2,40	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Otobüsler, Kamyonlar, Endüstri	-	>5-10	Yüksek	>1	60-120	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Otomobiller, Askeri, Enerji Depolama	-	>5-10	Yüksek	>1	20-30	-	1,75	2,45	2	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Uçaklar, Geniş Sıcaklık Aralığı Gereken Durumlar	-	1000	>1	>1	45-80	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Hibrit Araçlar, Tüketiciler	-	300-500	1	0,5-1	60-120	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Bombalar, Roketler, Madencilik, Demiryolu	-	20 Yıl	Orta	-	50	-	1,75	-	1,20	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Ticari Pazar	-	200-300	Yüksek	Düzenli	100	-	1,75	1,9	1,65	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Uydular	-	>70000	-	-	40-75	-	1,75	-	1,25	Nikel-kadmiyum	Nikel-metal hidrit	Nikel-demir	Nikel-çinko	Nikel-hidrojen	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Cep Telefonu, Tablet, Laptop, Kamera	150	500-1000	1	-	150-200	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Aletler, Tıbbi Cihazlar, Aktarma Organları	250	300-700	1-10	0,7-1	100-150	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Bisikletler, Tıbbi Cihazlar, Elektrikli Araçlar	210	1000-2000	1-2	0,7-1	150-220	-	3,00	>4,20	3,60-3,70	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Yüksek Akım ve Dayanıklılık Gerektiren Durumlarda	270	1000-2000	1-25	1	90-120	-	2,50	3,65	3,20-3,30	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Medikal, Endüstriyel, Elektrikli Araçlar	150	500	1	1	200-260	-	3,00	4,20	3,60	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				
Elektrikli Araçlar, Güneş Enerjili Aydınlatma	Yok	3000-7000	1-10	1-5	70-80	-	1,80	2,85	2,40	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-kobalt oksit	Lityum-manganez oksit	Lityum-nikel manganez oksit	Lityum-demir fosfat	Lityum-nikel kobalt	Lityum-titanat				



### **Akışkan Türüne Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems According to Fluid Type)**

#### **Hava ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with air)**

Hava ile batarya termal yönetim sistemleri doğal ve zorlanmış taşınımlı sistemler olmak üzere iki grupta incelenirler. Bu sistemlerde, bataryayı ısıtmak/soğutmak için kullanılacak hava doğrudan atmosferden ya da araç kabininden alınabilir (Sökmen ve Çavuş, 2017).

Batarya termal yönetim sistemlerinde akışkan olarak hava kullanılmasının avantajları düşük maliyet, kolay bakım, düşük ağırlık, basit tasarım ve kaçak sorununun olmaması iken dezavantajları havanın düşük ısıl performansı, bataryalar arasında oluşan yüksek sıcaklık farkı, sistemde kullanılan yüksek fan gücü ve gürültüsü olarak ifade edilebilir.

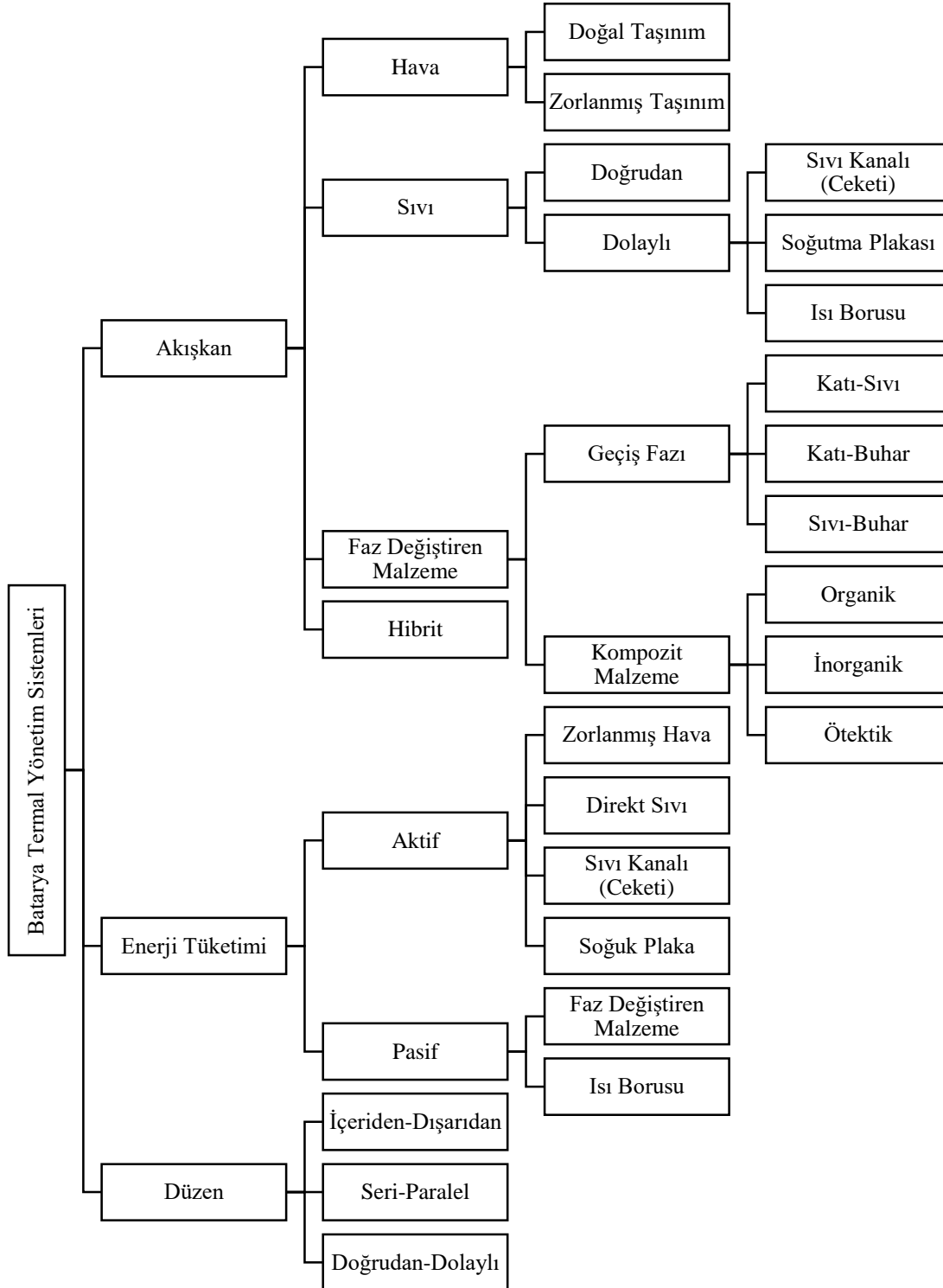
#### **Sıvı ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with liquid)**

Sıvı ile batarya termal yönetim sistemleri doğrudan ve dolaylı batarya termal yönetim sistemleri olarak iki gruba ayrılırlar.

Doğrudan batarya termal yönetim sistemlerinde bataryalar sıvı ile doğrudan temas halindedir. Bu sistemler, uygulamada yaygın olarak kullanılmasa da yüksek güce sahip batarya paketlerinin yüksek hızlardaki şarj/deşarj sırasında açığa çıkabilecek aşırı ısınmanın önüne geçebilmek için kullanılabilir. Bu sistemlerde kullanılan akışkanın düşük viskoziteye, yüksek termal iletkenliğe ve termal kapasiteye sahip dielektrik bir yapıda olması istenir. Şekil 6a'da doğrudan sıvı soğutmanın kullanıldığı bir batarya termal yönetim sistemi verilmiş olup bu sistemlerde akışkan bir ısıtıcı/soğutucu (ısı değiştiricisi) vasıtası ile şartlandırılır. Şartlandırma işleminin ardından sıvı, batarya paketine gönderilir ve batarya yüzeyine doğrudan temas ederek soğutma işlemini gerçekleştirir. Batarya paketinden ayrılan akışkan bir pompa aracılığı ile tekrar ısı değiştiricisine gönderilerek çevrimin tamamlanması sağlanır (Li ve Zhu, 2014).

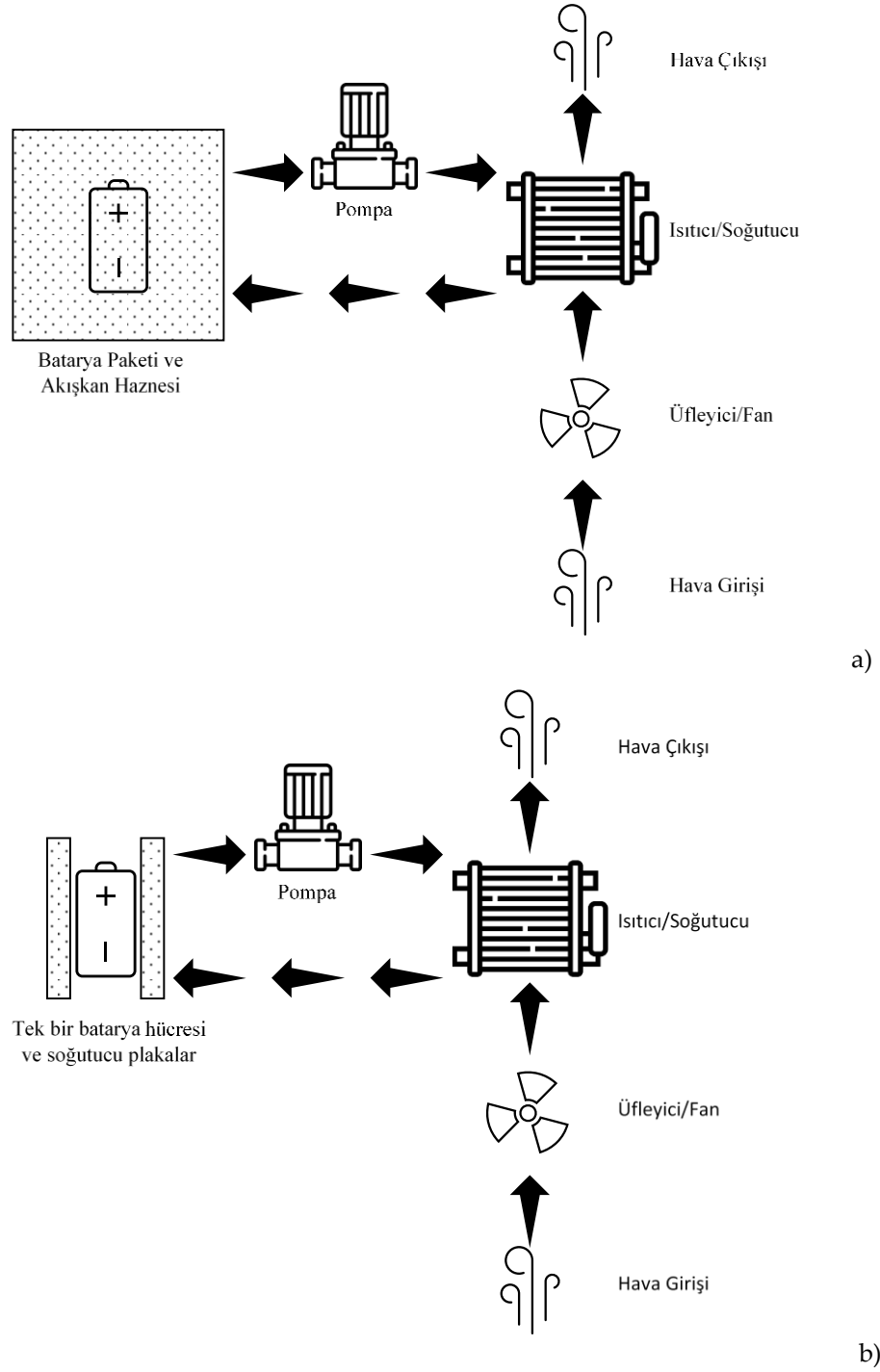
Dolaylı batarya termal yönetim sistemlerinde ise akışkan batarya yüzeyleri ile doğrudan temas etmemekte olup batarya ve akışkan arasında soğutucu plaka, sıvı kanalı (ceketi), ısı borusu vb. gibi ekipmanlar kullanılır. Akışkan olarak ise genellikle su-glikol karışımı kullanılmaktadır. Dolaylı batarya termal yönetim sistemleri, doğrudan batarya termal yönetim sistemleri ile karşılaştırıldıklarında pratikliği, güvenilirliği ve kararlılığı sebebi ile elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerden biri olarak soğutucu plaka ile soğutma yöntemi Şekil 6b'de gösterilmiştir. Isı borusu, sıvı kanalı (ceketi) vb. ekipmanların kullanıldığı soğutma sistemlerindeki kullanılan araçlar da neredeyse aynıdır. Bu sistemin çalışma prensibi doğrudan batarya termal yönetim sistemi ile aynı olup tek fark sıvının batarya yüzeyine doğrudan temas etmek yerine batarya ile sıvı yüzey arasında bulunan bir katı yüzey üzerinden akmasıdır (Moghaddam ve Mazyar, 2018).

Batarya termal yönetim sistemlerinde akışkan olarak sıvı kullanılmasının avantajları soğutma sistemi kompaktlığı, yüksek ısı yüklerinde etkin soğutma performansı ve bataryalar arası homojen sıcaklığı dağılımı iken dezavantajları sıvı kaçak sorunu ve ekipmanlarda meydana gelebilecek korozyon olarak karşımıza çıkmaktadır (Kalkan ve diğ., 2021).



Şekil 5. Batarya termal yönetim sistemlerinin sınıflandırılması (Arora, 2018)

Figure 5. Classification of battery thermal management systems (Arora, 2018)



Şekil 6. Sıvı ile batarya soğutma sistemleri a) doğrudan, b) dolaylı  
 Figure 6. Battery thermal management systems by liquid a) direct and b) indirect

#### Faz değıştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri (Battery thermal management systems with phase-changing material)

Elektrikli araçların bataryalarının termal yönetiminde kullanılan faz değıştiren malzemeler, bataryadaki fazla ısıyı emerek veya serbest bırakarak faz değışimine uğrarlar. Elektrikli aracın bataryasının ürettiğı fazla ısı, batarya paketine yakın faz değışim malzemeleri tarafından emilir ve

bataryanın sıcaklığı faz değişim malzemesinin erime sıcaklığına ulaşırsa, ısı gizli ısı biçiminde depolanıp batarya paketindeki sıcaklık artışı en aza indirilir. Faz değiştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri, bataryaların çalışma sıcaklığını nispeten sabit bir sıcaklık aralığında tutarlar (Talluri ve diğ., 2020). Bu yöntem, termal anlamda daha güçlü bir yönetim mekanizmasına sahiptir. Sıcaklık dağılımı bataryanın tamamında daha homojendir ve bitişik batarya hücrelerinde termal kaçak meydana gelirse, ortaya çıkabilecek kötü etkiyi sınırlayabilir. Faz değiştiren malzemenin gizli ısısı arttıkça daha yüksek sıcaklıklarda çalışan bataryalarda kullanılabilirliği artmaktadır (Bhattacharjee ve diğ., 2020).

Faz değiştiren malzeme ile batarya termal yönetim sistemleri, faz değiştiren malzemenin bileşimine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üçe, faz değiştiren malzemenin fazlarına göre katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar olmak üzere de üçe ayrılırlar. Organik faz değiştiren malzemeler, bileşiminde parafin olan ve parafin olmayan malzemeler olarak sınıflandırılırlar. Bunlar arasında parafin olmayan bileşikler, stearik asit, polioller, uzun zincirli alkanlar ve benzerlerini içerirler. Organik faz değiştiren malzemeler, korozyon direnci, zehirsiz olmaları, iyi kimyasal dayanıklılık ve neredeyse hiç aşırı soğutma yapmama avantajlarının yanında zayıf ısıl iletkenlik ve faz değiştirme işlemi sırasında kolayca sızdırma gibi dezavantajları da vardır. İnorganik faz değiştiren malzemeler arasında genellikle su, hidratlı tuzlar, eritilmiş tuzlar ve metal bulunur, bunların arasında hidratlı tuzlar ve metal yaygın olarak kullanılır. Yüksek gizli ısı kapasitesi, yanmazlık, sızıntı yapmama ve nispeten düşük maliyet avantajlarının yanında, hidratlı tuzların aşındırıcı olması, kolay faz ayrımı ve aşırı soğutma yapması gibi dezavantajları vardır. Ötektik faz değiştiren malzemeler, genellikle organikler, inorganikler veya hem inorganik hem de organik bileşikler dahil olmak üzere düşük erime sıcaklığına sahip iki veya daha fazla maddenin birleştirilmesiyle hazırlanırlar. Bu malzemeler eş zamanlı erime ve katılaşma ile karakterize edilebilen birkaç çözünür bileşenin kristal karışımlarıdır. Erime noktaları ve donma noktaları genellikle saf maddelerinkinden daha düşüktür. Mevcut inorganik tuzların ve organiklerin bol miktarda bulunması nedeniyle, ötektik faz değişim malzemeleri, inorganik ve organik bileşiklerin kombinasyonu ile artmaktadır. Bu artış ise her sıcaklık aralığına karşılık gelen ötektik seçeneğe yol açmaktadır; bu, organik veya inorganik faz değiştiren malzemeler ile karşılaştırıldığında üstün seçim avantajıdır (Liu ve diğ. 2020).

### **Hibrit batarya termal yönetim sistemleri (Hybrid battery thermal management systems)**

Hibrit batarya termal yönetim sistemleri, iki ya da daha fazla temel batarya termal yönetim sisteminin kombinasyonu ile oluşmaktadır. Farklı batarya termal yönetim sistemlerinin her birinin avantaj ve dezavantajları vardır. Hibrit batarya termal yönetim sistemleri bu sistemlerin avantajlarını birleştirir ve daha yüksek termal performansa ulaşır. Bunlara ek olarak, hibrit batarya termal yönetim sistemleri hacim, ağırlık ve enerji tüketimi ile ilgili bazı problemler içerebilirler. Temel hibrit batarya termal yönetim sistemleri türleri Çizelge 4'te listelenmiş olup hibritleşmede göz önüne alınması gerekenler aşağıda verilmiştir:

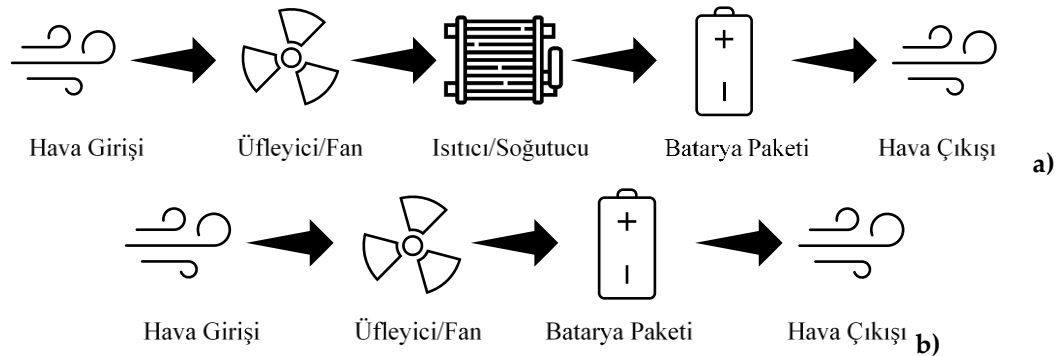
- Aktif soğutma yöntemleri, pasif soğutma yöntemleri ile kıyaslandığında ısı transferini iyileştirirler.
- Sıvı ile soğutmanın ısı transferi performansı hava ile soğutmadan daha üstündür, ancak düşük ısı yüklerinde zorlanmış hava ile soğutma genellikle yeterli olmaktadır.
- Hibrit termal yönetim sistemlerinde faz değiştiren malzemenin sisteme eklenmesi sahip oldukları önemli gizli ısıları nedeniyle termal homojenliği ve performansı artırır.
- Isı borusu ve termo-elektrik ile soğutma, yerel ısı transferini önemli ölçüde hızlı bir şekilde iyileştirir.
- Isı borusu/termo-elektrik ile soğutma ve faz değiştiren malzeme kombinasyonu daha iyi performans ve kararlılığa sahiptir. Isı borusunda, ısı emicisinin tasarımında iyileştirmeler yaparak performansı artırılabilir (Zhao ve diğ., 2020).

**Çizelge 4.** Hibrit batarya termal yönetim sistemi türleri (Zhao ve diğ., 2020)*Table 4. Types of hybrid battery thermal management system (Zhao et al., 2020)*

Tür		Hibrit Termal Yönetim Sistemi
1	Hava ya da sıvı ile birleştirilmiş ısı borusu ile aktif soğutma	Isı Borusu + Hava
		Isı Borusu + Sıvı
2	Isı borusu ile birleştirilmiş faz değiştiren malzeme	Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu
		Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu + Hava
		Faz Değiştiren Malzeme + Isı Borusu + Sıvı
3	Hava ya da sıvı ile birleştirilmiş faz değiştiren malzeme ile aktif soğutma	Faz Değiştiren Malzeme + Hava
		Faz Değiştiren Malzeme + Sıvı
4	Diğer termal yönetim sistemleri ile birleştirilmiş termoelektrik soğutma	Termoelektrik Soğutma + Hava + Sıvı
		Faz Değiştiren Malzeme + Termoelektrik Soğutma
5	Hava ile birleştirilmiş sıvı	Sıvı + Hava

#### Enerji Tüketim Yöntemine Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management Systems According to Energy Consumption Method)

Batarya termal yönetim sistemlerinde standart tanıma göre, soğutma/ısıtma sistemi ısı değiştiriciler, üfleyiciler/fanlar veya pompalar gibi güç tüketen herhangi bir ekipmanı içeriyorsa, bu sistem aktif bir sistem olarak kabul edilir, aksi takdirde pasif sistem olarak adlandırılır. Uygulamada aktif sistemler, soğutma hızının aktif olarak kontrol edildiği bir batarya termal yönetim sistemi olarak tanımlanır (Arora, 2018).

**Şekil 7.** Hava ile batarya termal yönetim sistemleri a) aktif ve b) pasif*Figure 7. Battery thermal management systems by air a) active and b) passive*

Elektrikli araçlarda kullanılan hava ile aktif batarya termal yönetim sistemlerinde Şekil 7a'dan da görülebileceği üzere hava, bir üfleyici/fan tarafından sisteme yönlendirilir. Ardından bir buharlaştırıcıdan ya da bir ısıtıcıdan geçerek batarya paketine gönderilir. Gerekli soğutma/ısıtma işlemi yapıldıktan sonra kullanılan hava egzoz tarafından atmosfere atılır. Hava ile pasif batarya termal yönetim sistemlerinde ise atmosferden ya da araç kabininden sisteme giren hava bir üfleyici tarafından batarya paketine gönderilir. Şekil 7b'de gösterildiği gibi batarya paketinde gerekli ısıtma/soğutma işlemi yapıldıktan kullanılan hava egzoz tarafından atmosfere atılır (Li ve Zhu., 2014).

### Soğutma Sisteminin Düzenine Göre Batarya Termal Yönetim Sistemleri (Battery Thermal Management System According to the Layout of the Cooling System)

Soğutma sisteminin düzenine göre batarya termal yönetim sistemleri üç ana başlıkta incelenir. Burada soğutma sisteminin düzeni, çalışma akışkanının batarya paket içerisindeki dağıtım yöntemini ifade eder. Bu yöntemler içeriden-dışarıdan, seri-paralel ve doğrudan-dolaylı olarak adlandırılır (Arora, 2018).

### BATARYA TERMAL YÖNETİM SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS)

Elektrikli araçların bataryalarının termal yönetim sistemlerinin üç ayrı başlıkta incelendiği ve sınıflandırmanın ise sistemdeki akışkan kullanımına, enerji kullanımına ve sistemin soğutma düzenine göre yapıldığı görülmüştür.

Çizelge 5'te batarya termal yönetim sistemleri kullanım kolaylığı, montaj, enerji verimliliği, sıcaklık değişimi, soğutma seviyesi, rejenerasyon oranı, COP, bakım, yatırım maliyeti, ölçeklendirilebilirlik, teknik risk ve geliştirme durumuna göre karşılaştırılmıştır (Arora, 2018). Bu sistemlerin tercih kriterlerinden en önemlisi araçların bataryalarının gerektirdiği soğutma gücüdür. Örneğin, hibrit araçlarda kullanılan bataryalar çok güçlü olmadığından hava ile termal yönetim sistemi kullanılırken tam elektrikli araçlarda ise bataryalar çok güçlü olduğundan sıvı ile termal yönetim sistemi kullanılmaktadır (Celen ve Kalkan, 2021; Kalkan ve diğ., 2021).

**Çizelge 5.** Batarya termal yönetim sistemlerinin karşılaştırılması (Arora, 2018)

*Table 5. Comparison of battery thermal management systems (Arora, 2018)*

Kriter	Zorlanmış Hava	Sıvı			Faz Değiştiren Malzeme
		Sıvı Kanalı (Ceketi)	Soğutma Plakası	Isı Borusu	
Kullanım Kolaylığı	Basit	Zor	Orta	Orta	Basit
Montaj	Basit	Zor	Orta	Orta	Basit
Enerji Verimliliği	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Değişimi	Yüksek	Orta	Orta	Orta	Düşük
Soğutma Seviyesi	Düşük	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Rejenerasyon Oranı	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Düşük
COP	0,4-0,7	1,8-2,1	1,5-1,9	-	-
Bakım	Zor	Basit	Orta	Orta	Zor
Yatırım Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Orta
Ölçeklendirilebilirlik	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek
Teknik Risk	Düşük	Yüksek	Orta	Orta	Düşük
Geliştirme Durumu	Ticari	Prototip	Ticari	Prototip	Prototip

### SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, elektrikli araçların tarihine, sınıflandırılmasına, Türkiye ve dünya pazarındaki satış durumuna, araçlarda kullanılan batarya tiplerine /özelliklerine, bataryaların çevrim ömrünü etkileyen termal sorunlara, elektrikli araçlarda batarya paketinin özellikleri ve elektrikli araçların batarya termal yönetim sistemlerine değinilen çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Türkiye'de ve dünyada elektrikli ve hibrit araçlar satışlarının 2016-2017 yıllarından sonra büyük oranda arttığı gözlemlenmiştir.
- Farklı batarya tipleri karakteristik özelliklerine göre karşılaştırıldıklarında Lityum bazlı bataryaların ağırlık, maliyet, performans ve çevrim ömrü gibi özellikleriyle elektrikli araçlarda kullanıma en uygun batarya tipleri olduğu ifade edilebilir.

- Uygulamada %100 elektrikli araçlardaki yüksek batarya soğutma ihtiyacı sıvı soğutma ile sağlanırken hibrit araçlarda ise düşük batarya soğutma ihtiyacı hava soğutma ile sağlanabileceği görülmüştür.
- Hava, sıvı ve faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı batarya termal yönetim sistemleri farklı kriterlere göre karşılaştırılmıştır.
- Çalışmada göz önüne alınan batarya termal yönetim sistemlerine ek olarak genellikle elektronik ekipmanların soğutulmasında kullanılan termo-elektrik, termo-akustik ve manyetik soğutma sistemlerinin etkinliklerinin geliştirilmesiyle elektrikli araçlarda kullanılabilmesi görülmüştür.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Arora, S., 2018, "Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies", *Journal of Power Sources*, 400, 621-640.
- Battery University Group, BU-205: *Types of Lithium-ion*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Battery University Group, BU-214: *Summary Table of Lead-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Battery University Group, BU-215: *Summary Table of Nickel-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021c.
- Battery University Group, BU-216: *Summary Table of Lithium-based Batteries*, <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021d.
- Bhattacharjee, A., Mohanty, R. K., and Ghosh, A., 2020, "Design of an Optimized Thermal Management System for Li-Ion Batteries under Different Discharging Conditions", *Energies*, 13(21), 5695.
- Car and Driver, 2020 Hyundai Ioniq Limited Hatchback Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/hyundai/ioniq/specs/2020/hyundai\\_ioniq\\_hyundai-ioniq-hybrid\\_2020/411990](https://www.caranddriver.com/hyundai/ioniq/specs/2020/hyundai_ioniq_hyundai-ioniq-hybrid_2020/411990), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Car and Driver, 2020 Kia Optima EX Auto Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/kia/optima/specs/2020/kia\\_optima\\_kia-optima-hybrid\\_2020/408076](https://www.caranddriver.com/kia/optima/specs/2020/kia_optima_kia-optima-hybrid_2020/408076), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Car and Driver, 2020 Lexus ES ES 300h FWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/lexus/es/specs/2020/lexus\\_es\\_lexus-es300h\\_2020/411185](https://www.caranddriver.com/lexus/es/specs/2020/lexus_es_lexus-es300h_2020/411185), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021c.
- Car and Driver, 2020 Toyota Corolla Hybrid LE CVT (Natl) Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/toyota/corolla/specs/2020/toyota\\_corolla\\_toyota-corolla-hybrid\\_2020/404764](https://www.caranddriver.com/toyota/corolla/specs/2020/toyota_corolla_toyota-corolla-hybrid_2020/404764), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021d.
- Car and Driver, 2021 Audi E-Tron / E-Tron Sportback Prestige Quattro Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/audi/e-tron/specs/2021/audi\\_e-tron\\_audi-e-tron\\_2021/416244](https://www.caranddriver.com/audi/e-tron/specs/2021/audi_e-tron_audi-e-tron_2021/416244), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021e.
- Car and Driver, 2021 Chevrolet Bolt EV Premier 5dr Wgn Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/chevrolet/bolt-ev-2021/specs/2021/chevrolet\\_bolt-ev\\_chevrolet-bolt-ev\\_2021/418205](https://www.caranddriver.com/chevrolet/bolt-ev-2021/specs/2021/chevrolet_bolt-ev_chevrolet-bolt-ev_2021/418205), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021f.
- Car and Driver, 2021 Ford Mustang Mach-E Premium AWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/ford/mustang-mach-e/specs/2021/ford\\_mach-e\\_ford-mach-e\\_2021/415586](https://www.caranddriver.com/ford/mustang-mach-e/specs/2021/ford_mach-e_ford-mach-e_2021/415586), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021g.
- Car and Driver, 2021 Honda Accord Touring Sedan Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/honda/accord/specs/2021/honda\\_accord\\_honda-accord-hybrid\\_2021/418420](https://www.caranddriver.com/honda/accord/specs/2021/honda_accord_honda-accord-hybrid_2021/418420), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021h.

- Car and Driver, 2021 Honda Insight Touring CVT Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/honda/insight/specs/2021/honda\\_insight\\_honda-insight\\_2021/413228](https://www.caranddriver.com/honda/insight/specs/2021/honda_insight_honda-insight_2021/413228), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021i.
- Car and Driver, 2021 Hyundai Kona Electric Ultimate FWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/hyundai/kona-electric/specs/2021/hyundai\\_kona-electric\\_hyundai-kona-electric\\_2021/416046](https://www.caranddriver.com/hyundai/kona-electric/specs/2021/hyundai_kona-electric_hyundai-kona-electric_2021/416046), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021j.
- Car and Driver, 2021 Hyundai Sonata Limited 2.0L Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/hyundai/sonata/specs/2021/hyundai\\_sonata\\_hyundai-sonata-hybrid\\_2021/416760](https://www.caranddriver.com/hyundai/sonata/specs/2021/hyundai_sonata_hyundai-sonata-hybrid_2021/416760), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021k.
- Car and Driver, 2021 Porsche Taycan Turbo S AWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/porsche/taycan/specs/2021/porsche\\_taycan\\_porsche-taycan\\_2021/418548](https://www.caranddriver.com/porsche/taycan/specs/2021/porsche_taycan_porsche-taycan_2021/418548), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021l.
- Car and Driver, 2021 Tesla Model 3 Performance AWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/tesla/model-3/specs/2021/tesla\\_model-3\\_tesla-model-3\\_2020/412469](https://www.caranddriver.com/tesla/model-3/specs/2021/tesla_model-3_tesla-model-3_2020/412469), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021m.
- Car and Driver, 2021 Tesla Model Y Performance AWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/tesla/model-y/specs/2021/tesla\\_model-y\\_tesla-model-y\\_2020/412746](https://www.caranddriver.com/tesla/model-y/specs/2021/tesla_model-y_tesla-model-y_2020/412746), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021n.
- Car and Driver, 2021 Toyota Avalon Hybrid Limited FWD (Natl) Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/toyota/avalon/specs/2021/toyota\\_avalon\\_toyota-avalon-hybrid\\_2021/413789](https://www.caranddriver.com/toyota/avalon/specs/2021/toyota_avalon_toyota-avalon-hybrid_2021/413789), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021o.
- Car and Driver, 2021 Toyota Camry Hybrid XSE CVT (Natl) Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/toyota/camry/specs/2021/toyota\\_camry\\_toyota-camry-hybrid\\_2021/416041](https://www.caranddriver.com/toyota/camry/specs/2021/toyota_camry_toyota-camry-hybrid_2021/416041), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021p.
- Car and Driver, 2021 Toyota Prius Limited (Natl) Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/toyota/prius/specs/2021/toyota\\_prius\\_toyota-prius\\_2021/413844](https://www.caranddriver.com/toyota/prius/specs/2021/toyota_prius_toyota-prius_2021/413844), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021q.
- Car and Driver, 2021 Toyota RAV4 Hybrid Hybrid XLE Premium AWD (Natl) Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/toyota/rav4-hybrid/specs/2021/toyota\\_toyota-rav4-hybrid\\_rav4-hybrid\\_2021/414763](https://www.caranddriver.com/toyota/rav4-hybrid/specs/2021/toyota_toyota-rav4-hybrid_rav4-hybrid_2021/414763), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021r.
- Car and Driver, 2021 Volkswagen ID.4 1st Edition RWD Features And Specs, [https://www.caranddriver.com/volkswagen/id4/specs/2021/volkswagen\\_i.d.-crozz\\_volkswagen-i.d.-crozz\\_2021/418044](https://www.caranddriver.com/volkswagen/id4/specs/2021/volkswagen_i.d.-crozz_volkswagen-i.d.-crozz_2021/418044), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021s.
- Celen, A., and Kaba, M. Y., 2021, "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33(1), 49-61.
- Celen, A., ve Kalkan, O., 2021, "Numerical Investigation on the Usage of Finned Surface in Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxides Batteries by Using Air Cooling Method", *Energy Storage*, e216.
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., and Pesaran, A., 2016, "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells", *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854.
- Clean Technica. *Electric Car Evolution*, <https://cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Dinçer, I., Hamut, H. S., and Javani, N., 2016, *Thermal management of electric vehicle battery systems*, John Wiley & Sons.
- Durmuş, F. S., and Kaymaz, H., 2020, "Elektrikli Araç Şarj Yöntemleri", *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(2), 123-139.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., and Ebrahimi, K. M., 2018, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, CRC press.
- Fessler, D. C., 2019, *The energy disruption triangle: three sectors that will change how we generate, use, and store energy*, John Wiley & Sons.



- Forbes, *Best Electric Cars For 2021*, <https://www.forbes.com/wheels/best/electric-cars/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021a.
- Forbes, *Best Hybrid Cars For 2021*, <https://www.forbes.com/wheels/best/best-hybrid-cars/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021b.
- Hedef Filo, *Elektrikli Araçların Tarihçesi*, <https://ev.hedeffilo.com/elektrikli-arac-tarihcesi#:~:text=Tarihte%20bilinen%20ilk%20elektrikli%20motor,batarya%20kullanılan%20küçük%20bir%20lokomotifti>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- International Energy Agency, *Global Electric Car Sales by Key Markets 2010-2020e*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-sales-by-key-markets-2010-2020>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Kalkan, O., Celen, A., Bakirci, K., ve Dalkilic, A. S., 2021, "Experimental investigation of thermal performance of novel cold plate design used in a Li-ion pouch-type battery", *Applied Thermal Engineering*, 191, 116885.
- Larminie, J., and Lowry, J., 2012, *Electric vehicle technology explained*, John Wiley & Sons.
- Lelie, M., Braun, T., Knips, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Zappen, H., and Sauer, D. U., 2018, "Battery management system hardware concepts: an overview", *Applied Sciences*, 8(4), 534.
- Li, J., Adewuyi, K., Lotfi, N., Landers, R. G., and Park, J., 2018, "A single particle model with chemical/mechanical degradation physics for lithium ion battery State of Health (SOH) estimation", *Applied energy*, 212, 1178-1190.
- Li, J., and Zhu, Z., 2014, *Battery thermal management systems of electric vehicles*, Master's thesis, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden.
- Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., and Huang, Q., 2020, "Phase Change Materials Application in Battery Thermal Management System: A Review", *Materials*, 13(20), 4622.
- Moghaddam, H. and Mazzyar, S., 2018, *Designing battery thermal management systems (BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD*, Master's thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden.
- Mustaffa, M. R., Atan, R., and Mohamed, W. A. N. W., "Preliminary analysis on fuel cell power plant design for racing vehicles", *International Conference on Advance in Mechanical Engineering*, Shah Alam, Malaysia, 2010.
- Nasa Space Science Data Coordinated Archive, *The Apollo Lunar Roving Vehicle*, [https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo\\_lrv.html](https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_lrv.html), Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Palinski, M., 2017, *A comparison of electric vehicles and conventional automobiles: costs and quality perspective*, Bachelor's Thesis, Novia University of Applied Sciences, Finland.
- Pesaran, A. A., 2002, "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations", *Journal of power sources*, 110(2), 377-382.
- Şenlik, İ., 2015, "Uyuyan Devrim: Elektrikli Araçlar", *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 455, 64-67.
- Sökmen, K. F., and Çavuş, M., 2017, "Review of batteries thermal problems and thermal management systems", *Journal of Innovative Science and Engineering (JISE)*, 1(1), 35-55.
- Talluri, T., Kim, T. H., and Shin, K. J., 2020, "Analysis of a battery pack with a phase change material for the extreme temperature conditions of an electrical vehicle", *Energies*, 13(3), 507.
- Tie, S. F., and Tan, C. W., 2013, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles", *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 82-102.
- Türkiye Elektrikli ve Hibrit Araçları Derneği, *2020 Yılı Elektrikli ve Hibrit Satış Rakamları Belli Oldu*, <http://tehad.org/2021/01/16/2020-yili-elektrikli-ve-hibrid-otomobil-satis-rakamlari-belli-oldu/>, Ziyaret tarihi: 27 Nisan 2021.
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., and Tay, A. A., 2015, "Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging", *Applied Thermal Engineering*, 86, 281-291.

- Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., and Mithulananthan, N., 2015, "A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 365-385.
- Zhao, C., Zhang, B., Zheng, Y., Huang, S., Yan, T., and Liu, X., 2020, "Hybrid Battery Thermal Management System in Electrical Vehicles: A Review", *Energies*, 13(23), 6257.