

000110 100

Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi Konya Journal of Engineering Sciences

KONJES 055 E-155N-2667-8055

2023 - Cilt : 11 - Sayı : 1 2023 - Volume : 11 - Issue : 1

KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES) KONYA MÜHENDISLIK BILIMLERI DERGISI

HAKEMLİ DERGİDİR

<u>OWNER/SAHİBİ</u>

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

> 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. Hüseyin DEVEC Prof. Dr. hsan ÖZKAN Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR Assoc. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN Assist. Prof. Dr. Sercan BÜLBÜL 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 POTSIOU, 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
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 Androkhanov, 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 Deveci, 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/Electronic)

Cilt	11	Mart	2023	Sayı	1
Volume	11	March	2023	Issue	1

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

INVESTIGATION OF THE USE OF CALCIUM CARBONATE AS NANOPARTICLES IN NUCLEAR REACTORS Nükleer Reaktörlerde Nanoparçacık Olarak Kalsiyum Karbonat Kullanımının Araştırılması Sinem UZUN, Yasin GENÇ, Adem ACIR (English) 1-9 OPTIMAL PID CONTROLLER DESIGN FOR TRAJECTORY TRACKING OF A DODECAROTOR UAV BASED ON GREY WOLF OPTIMIZE Dodecarotor İHA'nın Yörünge Takibi için Bozkurt Optimizasyon Algoritması Temelli Optimal PID Denetleyici Tasarımı Şahin YILDIRIM, Nihat ÇABUK, Veli BAKIRCIOĞLU (English) 10-20 PERLİT GENLEŞTİRMEDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN AGREGA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME-YENİ BİR YAKLAŞIM An Investigation on the Effects of Temperature Change on Aggregate Characteristics in Perlite Expansion - A New Approach Lütfullah GÜNDÜZ, Şevket Onur KALKAN 21-40 KÖPRÜ AYAK TİPİ VE VEREVLİĞİNİN SU YÜZÜ PROFİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI Experimental and Numerical Investigation of the Effect on the Water Surface Profiles of Bridge Pier Type and Skew Angle Kutsi Savaş ERDURAN, Uğur ÜNAL, Ahmet Şakir DOKUZ, Mustafa Çağrı NAS 41-58 INVESTIGATING THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE COLD FORGING OF 27MnB4 STEEL VIA CALPHAD METHODOLOGY AND FEM 27MnB4 Çeliğinin Soğuk Dövülmesinde Isıl İşlem Etkisinin Calphad ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi Yağız AKYILDIZ, Ümit KUTSAL, Yağız ARSLAN, Adnan AKMAN, Atıf KARKINLI, Mert SAĞLAM, Rıdvan YAMANOĞLU (English) 59-70 COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF A FEED-FORWARD NEURAL NETWORK-BASED MPPT FOR RAPIDLY CHANGING CLIMATIC CONDITIONS Hızla Değişen İklim Koşulları İçin İleri Beslemeli Sinir Ağı Tabanlı MPPT'nin Karşılaştırmalı Performans Analizi Fuad ALHAJ OMAR (English) 71-86

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ABSORPTION AND THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF NANOPARTICLES WITH MOTOR OIL BASED NANOFLUIDS Motor Yağı Bazlı Nanoakışkanlar ile Farklı Tipteki Nanoparçacıkların Absorpsiyon ve Termal
Analizinin Deneysel Olarak İncelenmesi Jasim Mohammad Abid ALENEZY, Rafet YAPICI, Amar Hasan HAMEED (English) 87-102
MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLI VE MİKRO OYUKLU ISI ALICIDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ
Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Micro Pin Fin and Micro
Cavitied Heat Sinks
Durak MARKAL, Deyzahur KOL 105-125
ACCURACY ASSESSMENT TOWARD MERGING OF TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT DATA AND UNMANNED AERIAL SYSTEM POINT DATA
Yersel Lazer Tarayıcı Nokta Verileri ile İnsansız Hava Aracı Nokta Verilerinin Entegrasyonunda
Lütfiye KARASAKA, Hasan Bilgehan MAKİNECİ, Kasım ERDAL (English) 124-135
ANELS DASED DEAL TIME DOWED ESTIMATION FOD WIND TUDDINES
Rüzger Türbinleri İdin ANEIS Tahanlı Corcek Zamanlı Cüc Tahmini
Göksel GÖKKUŞ (English) 136-149
KOMSU İZOLE SACII MA SAVISININ ALGORİTMASI
Algorithm of Neighbor Isolated Scattering Number
Mehmet Aykut TOSUN, Ersin ASLAN, Emin BORANDAĞ 150-159
INVESTIGATION OF DRILLING PERFORMANCE OF REINFORCED POLYAMIDE 6
POLYMER COMPOSITE
Katkılı Poliamid 6 Polimer Kompozitin Delinme Performansının İncelenmesi
Abdurrahman GENÇ, Ferhat YILDIRIM, Murat KOYUNBAKAN, Salih Hakan YETGİN, Volkan
ESKİZEYBEK, Gözde KUŞ (English) 160-179
MİKROKRİSTALİN SELÜLOZ VE ELMA KABUĞU KATKILI POLİLAKTİK ASİT ESASLI FİLMLERIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Investigation of Properties of Microcrystalline Cellulose and Apple Peel Incorporated Polylactic Acid
Based Films P1nar TERZİOĞLU, Kemal Can TOHUMCU180-190
· · · ·
EVALUATION OF THE HISTORICAL IPLIKÇI MOSQUE ACCORDING TO DBYBHY 2007 AND TBDY 2018 REGULATIONS
Tarihi İplikci Camisinin DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 Yönetmeliklerine Göre Değerlendirilmesi
Elifnur ŞAKALAK, Mahmud Sami DÖNDÜREN (English) 191-204
PREDICTION OF CERVICAL DISC HERNIATION DISEASE UTILIZING TRAPEZIUS sEMG SIGNALS WITH MACHINE LEARNING TECHNIQUES BASED ON FREQUENCY DOMAIN
FEATURE EXTRACTION
Frekans Alanı Öznitelik Çıkarımına Dayalı Makine Öğrenme Teknikleri ile Trapezius Yüzey EMG Sinyallerini Kullanarak Servikal Disk Fıtığı Hastalığının Tahmini
Burak YILMAZ, Güzin ÖZMEN, Ahmet Hakan EKMEKÇİ (English) 205-219
SİLAH GERİ TEPME VE ŞAHLANMA TEST MAKİNASI TASARIMI VE SİMULASYONU
Design and Simulation of Gun Rebound and Rampancy Test Machine
Orhan KOÇ, Mustafa TINKIR 220-246

KEKİK YAĞI İLE HAZIRLANMIŞ BİYOPOLİMER KOMPOZİT FİLMLER VE BU FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Investigation of the Properties of Biopolymer Composite Films Prepared with Thyme Oil
Ülkü SOYDAL, Fadim SÖYLEMEZ GÜNBATTI
BİYOKÜTLEDEN GÖZENEKLİ KARBONLU MALZEME ÜRETİMİ: BİYOKÜTLE TİPİ VE SICAKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ
Production of Porous Carbon Materials From Biomass: The Effect of Biomass Type and Temperature
on Physiochemical Properties
Aynur AŞMA, Elif YAMAN, Sinan

Derleme Makalesi (Review Article)

AKILLI MALZEME OLARAK POLİMERLER	VE UYGULAMALAF	RI		
Polymers as Smart Materials and Their Applicat	tions			
Derya MUTLU, İdris KARAGÖZ	••••••••••••••••••			74-299
HAVACILIKTAKİ VİDEO VERİ YOLU	STANDARDININ	AKILLI	TAŞITLAR	İÇİN
KULLANIM OLASILIĞI ÜZERİNE BİR İNCE	LEME			
A Review On the Possibility of Using the Video	Data Bus Standard in	Aviation f	or Smart Vehi	cles
Aslıhan PAMUK, Ufuk SAKARYA	•••••••••••••••••		3	00-311



INVESTIGATION OF THE USE OF CALCIUM CARBONATE AS NANOPARTICLES IN NUCLEAR REACTORS

^{1*}Sinem UZUN^(D), ²Yasin GENÇ^(D), ³Adem ACIR^(D)

¹Erzincan Binali Yıldırm University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering Department, Erzincan, TÜRKİYE
²Ministry of Interior, Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, TÜRKİYE
³Gazi University, Technology Faculty, Energy Systems Engineering Department, Ankara, TÜRKİYE
¹sinemuzun@erzincan.edu.tr, ²ysngnc@gmail.com, ³adema@gazi.edu.tr

Highlights

- Radiation shielding properties for CaCO₃ were investigated.
- Thermal analyzes were made with COBRA code.
- Coolant temperature increased with the nanoparticle ratio.

Graphical Abstract



Relative power distrubiton for CaCO3 nanoparticle (a) 0.01%, (b) 0.02%, (c) 0.03%



INVESTIGATION OF THE USE OF CALCIUM CARBONATE AS NANOPARTICLES IN NUCLEAR REACTORS

^{1*}Sinem UZUN^(D), ²Yasin GENÇ^(D), ³Adem ACIR^(D)

 ¹Erzincan Binali Yıldırım University, Engineering and Architecture Faculty, Mechanical Engineering Department, Erzincan, TÜRKİYE
 ²Ministry of Interior, Disaster and Emergency Management Presidency, Ankara, TÜRKİYE
 ³Gazi University, Technology Faculty, Energy Systems Engineering Department, Ankara, TÜRKİYE
 ¹sinemuzun@erzincan.edu.tr, ²ysngnc@gmail.com, ³adema@gazi.edu.tr

(Received: 01.07.2022; Accepted in Revised Form: 31.10.2022)

ABSTRACT: In this study, calcium carbonate (CaCO₃) was considered as nanoparticle. In the first part of the study, half-value layer (HVL) and mean free path (MFP) values, which are radiation shielding parameters, were investigated in determined energy ranges by Phy-X open access software. At increasing energy levels, the HVL value reached approximately 10 cm, while the MFP value reached approximately 17 cm. In the second part of the study, the reactor core geometry was modeled with the MCNP code and then the relative power distribution values were determined. COBRA code input was prepared with the determined relative power distribution values and thermal analyzes were made. These analyzes were performed for three different nanoparticle ratios. As a result of the analysis, the temperature value at the end of the channel was 613 K when only water was used as a coolant, while the temperature value at the end of the channel was 611.19 K when 0.03% nanoparticles were used. Although the coolant temperature was used.

Keywords: Calcium carbonate, COBRA, MCNP, Nanoparticle, Phx-X software

1. INTRODUCTION

Calcium carbonate is a compound present in almost all food products. Although it is known as limestone among the people, it is found in the form of rock in nature. Travertines, chalks and marbles come to mind when calcium carbonate (CaCO₃) is mentioned. Although it is frequently used in the fields of construction and industry, academic research on CaCO₃ is also quite abundant [1-4]. In the literature, especially in recent years, the effect of nanoparticles in academic studies has begun to be examined. Many systems using CaCO₃ as nanoparticles are being investigated by researchers.

Some of the studies examining the mechanical properties of materials and making mechanical improvements are as follows. In one of these studies; by preparing nanocomposites containing calcium carbonate, the thermal, mechanical and morphological properties of these composites were investigated [5]. As a result of the examination, the researchers concluded that the CaCO₃ ratio was 3.75%, where the nanocomposite used showed the highest impact and tensile strength. There are researchers who examine the modification of adhesive bonds with nano-CaCO₃ to increase the shear strength of epoxy adhesives and also investigate the adhesive properties with the tensile overlap shear test [6]. In a study examining the effect of nano-CaCO₃ particles on the interlayer shear strength (ILSS) and fracture toughness properties of carbon fiber reinforced epoxy composites [7], composite materials were prepared by vacuum assisted resin method. As a result of the tests applied to the material afterwards, it was concluded that adding 2% by weight of nano- CaCO₃ to the epoxy increased the interlayer shear strength (ILSS) up to 24%. To increase the wear performance of epoxy/carbon fiber (CF) composites, CaCO₃ was added as nano

reinforcement and a 65% reduction in friction coefficient and 75% reduction in specific wear rate was observed [8]. Cementitious matrices in which nano-CaCO₃ is also used were investigated in a study that carried out studies to increase concrete strength. In particular, their mechanical and durability properties were investigated and they concluded that the use of nanomaterials in cement concrete with the necessary properties of building materials confirmed the feasibility [9]. Investigating the mechanical, thermal, morphological effect of two types of fillers, micro CaCO₃ and nano-CaCO₃, on Polypropylene (PP) composite material [10], they concluded that the inclusion of nanofillers revealed better thermomechanical properties. In the study conducted with nanocomposites containing calcium carbonate, the change of mechanical properties such as flexural strength, flexural modulus, impact strength was investigated. The sample sample containing 4% by weight nano CaCO₃ provided positive results in terms of flexural strength, flexural modulus, impact strength compared to pure epoxy matrix [11]. Researchers [12], who examined the effect of nano calcium carbonate particles on stone mastic asphalt (SMA), concluded, as a result of a series of mechanical tests, that the fatigue life of SMA mixtures increased and the final stresses decreased with the addition of nano CaCO₃ particles.

In the study where the effect of clinker mineral component and nanomaterials (nano-SiO₂, nano-CaCO₃ and nano-TiO₂) on cement composites was investigated [13], HCSC's (high content calcium silicate phase cement) curing time is shortened and its strength is significantly increased. There are some studies [14-16] investigating the nano-calcium carbonate effect like these, and the general conclusion from these studies is that the use of calcium carbonate as nanoparticles improves the mechanical and strength properties of the systems in which it is used.

The use of nanoparticles in nuclear systems has recently started to increase. Because of the thermal conductivity properties of the nanoparticles used, the efficiency of the system can be increased [17-18]. The nanoparticles used so far have had a positive effect on the system efficiency by increasing the coolant temperature. Some of these nanoparticles are; Al₂O₃, CuO, TiO₂, Al, Cu, Si, Ag.

In this study, firstly, open access software Phy-X [19] was used to examine the radiation shielding properties. Since radiation shielding is very important in nuclear reactors, it is important to know the radiation properties of the materials used.

In the second part of the study, it was investigated how the coolant properties of nuclear reactors containing calcium carbonate nanoparticle coolant water changed. To do this, first of all, relative power distributions were determined with the Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP) [20] code used for neutronic analysis.

The power distributions values obtained from the use of the MCNP code are used in the COBRA code. The COBRA code [21] was used to obtain the thermal analysis values. The COBRA code can determine the thermal values of the reactor coolant by performing the subchannel analysis.

2. CALCIUM CARBONATE AND RADIATION SHIELDING

The issue of protection from ionizing radiation is very important in the world. Researchers working on this subject are doing improvement studies against radiation protection on some materials [4, 22-25]. For example, [22] investigated the shielding properties of some low-temperature superconducting brazing alloys. The highest mass absorption coefficient and half value layer values were determined [22]. In a study that applied solution polymerization to produce water-soluble polyurethane, CaCO₃ was used as fake gunpowder. And as a result, the tensile strength of the 40% diisocyanate-treated CaCO₃ WPU composites was increased and the elongation at break was also significantly improved [4]. Half value layer (HVL) and mean free path (MFP) values are very important in radiation protection investigations. HVL value is the thickness of the material at which the intensity of radiation entering it is reduced by one half. HVL is related to linear attenuation coefficient (μ) and it is represented by Equation 1 [26].

Another important parameter is the MFP value, which is the average path a photon can travel between two consecutive interactions with the material and it is calculated as in Equation 2 [27].

(1)

MFP=1 /
$$\mu$$
 (2)

3. THERMAL ANALYSIS

In this part of the study, thermal properties of reactor coolant water containing calcium carbonate nanoparticles were investigated. Most nuclear reactors in the world are pressurized water reactors and generally use water as a coolant. It is expected that the coolant material used to absorb the heat generated by the chain fission reactions occurring in the nuclear reactor core will absorb the maximum heat from the system. In order to do this, there are suggestions about adding nanoparticles to the coolant water in order to improve the heat conduction properties [17-18].

The relative power distribution of the calcium carbonate nanofluid was obtained using the MCNP code which is a time-dependent Monte Carlo radiation transport code with continuous energy and generalized geometry that can track many particle types in various energy ranges. It can simulate particle interactions involving neutrons, photons and electrons, as well as for simulating the fission event. While preparing the MCNP input, data such as reactor geometry, fuel and coolant properties (such as density) are used.

With the obtained relative power values, the COBRA input that performs the subchannel analysis was prepared. COBRA code is a thermal-hydraulic code that performs subchannel analysis by dividing the examined system into channels in the number and size determined by the user. As a result of the operation of this code, thermal data of the fuel and clad regions, especially the coolant, can be obtained in the examined system. There are a total of 163 fuel bundles in the hexagonal reactor core and 312 fuel rods in each fuel bundle. The channel figure used in the COBRA code is shown in Figure 1 [28].



Figure 1. Schematic channel flow surface

COBRA code makes solutions by using conservation equations in its infrastructure. The mass, momentum and energy conservation equations are shown in equations 3-4 and 5, respectively [29].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \overrightarrow{\nu} \right) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla . \rho \vec{v} \vec{v} = -\nabla P + \nabla . \vec{\tau} + \rho \vec{g}$$
(4)

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla . \left(\rho U \overrightarrow{v}\right) = -\nabla . \overrightarrow{q} + q \overrightarrow{v} - P \nabla . \overrightarrow{v}$$
(5)

4. RESULTS AND DISCUSSION

Open access software Phy-X was used to examine the radiation shielding property of the calcium carbonate compound [19]. While using this software, determined energy ranges (0.015 MeV - 15 MeV) were selected. The variation of HVL and MFP values for CaCO₃ is shown in Figure 2. According to this; While the HVL value reached approximately 10 cm at increasing energy levels, the MFP value reached approximately 17 cm. The MFP value defines the average distance between two photon interactions, while the HVL value can be defined as a measure of the thickness required to reduce radiation and represents the one-half value of the first photon that helps determine the material thickness for shielding [22]. HVL value is an indicator of radiation protection performance. In other words, the lower HVL value of any material shows better radiation shielding performance as it will need a lower thickness [30]. A low HVL value indicates that the material has good protection properties [31]. The MFP value increased with the increase in energy, which is consistent with the literature [27].



Figure 2. HVL and MFP values for CaCO₃

Low MFP and HVL values are important in radiation shielding materials. In this examination for calcium carbonate, HVL and MFP values increased in line with the literature [32].

Since the reactor type considered in this study is VVER type pressurized water reactor, the reactor geometry is hexagonal. While the image shows ((a) contains 0.01% CaCO₃, (b) 0.02% and (c) 0.03% CaCO₃) the distribution of relative power densities of the nanofluid containing in Fig.3.



Figure 3. Relative power distrubiton for CaCO₃ nanoparticle (a) 0.01%, (b) 0.02%, (c) 0.03%

The changes in the thermal properties of the coolant along the channel were investigated as a result of the calculations and analysis using the varying ratios of calcium carbonate. The temperature change of the coolant containing nanoparticles along the channel was shown in Figure 4. Accordingly, although the temperature increased with the increasing ratio of CaCO₃ nanoparticles, there was a decrease in temperature when only water was used. While only water was used, the coolant temperature value at the end of the channel was approximately 613 K, while the temperature reached 610.64 K at the rate of 0.1%, 611.04 K at the rate of 0.2% and 611.19 K at the rate of 0.3% with the addition of nanoparticles. In a study using nanoparticle added coolant, the temperature increased with increasing nanoparticle ratio, similar to this study [33].



Figure 4. Temperature value

The enthalpy change of the coolant containing calcium carbonate was given in Figure 5. According to the figure, although the enthalpy increased with the increase of the nanoparticle ratio, the enthalpy value decreased compared to the case where only water was used. When only water is used at the end of the channel, the enthalpy value reaches 1598 kJ/kg, while this value reaches 1562 kJ/kg in the coolant containing 0.01% CaCO₃. The temperature and enthalpy changes are similar to other studies using nanofluid coolants [33-35].



5. CONCLUSION

Within the scope of this study, it was carried out to examine the effect of CaCO₃ composition, which is used in many industrial and technological fields, on nuclear systems. Accordingly, firstly, the half value layer (HVL) and mean free path (MFP) values were examined using Phy-X software. According to the results obtained from the analysis for CaCO₃, the HVL value reached approximately 10 cm at increasing energy levels, while the MFP value reached approximately 17 cm.

In the thermal analysis part, although the temperature increased with the increasing ratio of CaCO₃ nanoparticles, there was a decrease in temperature compared to the case where only water was used. Similarly, the enthalpy value decreased when only water was used. While an increase in the coolant water temperature is expected in nuclear systems with the addition of nanoparticles, the use of CaCO₃ reduced the temperature a little. This shows that the heat conduction properties of the CaCO₃ compound are more ineffective than other nanoparticles (Al₂O₃, TiO₂, CuO etc.) used in nuclear systems.

Declaration of Ethical Standards

Authors declare to comply with all ethical guidelines, including authorship, citation, data reporting, and original research publication.

Credit Authorship Contribution Statement

Sinem UZUN: The author has done research and analysis. Yasin GENÇ: The author analyzed and wrote the article. Adem ACIR: The author has written and edited the article.

Declaration of Competing Interest

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

Funding / Acknowledgements

The authors declare that they have not received any funding or research grants during the review, research or assembly of the article.

Data Availability

Research data has not been made available in a repository.

REFERENCES

- S. B. Baştürk, "An Investigation on the Flexural and Thermo-mechanical Properties of CaCO 3" Epoxy Composites, vol. 18, no.2, p. 161–167, 2022.
- [2] S., Leblebici, G. Işık, "The Effects of Calcium Carbonate (Caco3) Application At Different Concentrations on Seed Germination of Different Varieties of Carthamus Tinctorius L. (Asteraceae)", Anadolu University Journal Of Science And Technology –C Life Sciences and Biotechnology, vol. 7, no.1, p.1–1, 2018.
- [3] A. Şenlikci, M. Doğu, E. Eren, E. Çetinkaya, S. Karadağ, "Pressure calcimeter as a simple method for measuring the CaCO3 content of soil and comparison with Scheibler calcimeter", *Toprak Dergisi, vol. Special Issue*, p. 24–28, 2015.
- [4] E. Wondu, Z. Lule, J. Kim, "Polyisocyanate-based water-soluble polyurethane/CaCO3 composites for gunpowder storage", *Polymer Testing*, vol. 99, 107211, 2021.
- [5] A.E. Abd El-Hakim, A.E.M. Fettouh , A.A.A. Haroun, A.G.M. Rabie, G.A.M. Ali, M.Y.M. Abdelrahim, "Improving the mechanical and thermal properties of chlorinated poly(vinyl chloride) by incorporating modified CaCO3 nanoparticles as a filler", *Turkish Journal of Chemistry*, vol. 43, no.3, p. 750–759, 2019.
- [6] H.B. Kaybal, H. Ulus, A. Avci, "Influence of Nano-CaCO3 Particles on Shear Strength of Epoxy Resin Adhesives", Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi, vol. 9, no.3, p. 29–35, 2017.

- [7] H. B.Kaybal, "Tabakalararası kayma mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerine deneysel bir çalışma: CaCO3 nanoparçacıkları ile iyileştirilmiş karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler", Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 10, no. 2, p. 777–783, 2021.
- [8] E. F. Şükür, "Dry Sliding Friction And Wear Properties Of Caco3 Nanoparticle Filled Epoxy/Carbon Fiber Composites", *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.9, no. 2, p. 1108–1117. 2020.
- [9] J.A. Abdalla, B.S. Thomas, R.A. Hawileh, J. Yang, B.B. Jindal, E. Ariyachandra,"Influence of nano-TiO2, nano-Fe2O3, nanoclay and nano-CaCO3 on the properties of cement/geopolymer concrete", *Cleaner Materials*, vol. 4(March), 100061, 2022.
- [10] M. Al-Samhan, F. Al-Attar, "Comparative analysis of the mechanical, thermal and barrier properties of polypropylene incorporated with CaCO3 and nano CaCO3", *Surfaces and Interfaces*, vol. 31(May), 102055, 2022.
- [11] A. Misra, M. Shukla, M.K. Shukla, D. Srivastava, A.K. Nagpal, "Nano CaCO3 modified multifunctional epoxy nanocomposites: A study on flexural and structural properties", *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, p. 3295–3300, 2021.
- [12] A. M. Yarahmadi, G. Shafabakhsh, A. Asakereh, "Laboratory investigation of the effect of nano Caco3 on rutting and fatigue of stone mastic asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 317, 126127, 2022.
- [13] C. Luan, Y. Zhou, Y. Liu, Z. Ren, J. Wang, L. Yuan, S. Du, Z. Zhou, Y. Huang, "Effects of nano-SiO2, nano-CaCO3 and nano-TiO2 on properties and microstructure of the high content calcium silicate phase cement (HCSC)", *Construction and Building Materials*, vol. 314(PA), 125377, 2022.
- [14] T. Alomayri, "Performance evaluation of basalt fiber-reinforced geopolymer composites with various contents of nano CaCO3", *Ceramics International*, vol. 47(21), 29949–29959, 2021.
- [15] K. Cui, D. Lau, Y. Zhang, J. Chang, "Mechanical properties and mechanism of nano-CaCO3 enhanced sulphoaluminate cement-based reactive powder concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 309, 125099, 2021.
- [16] M. Sun, J. Zhu, T. Sun, Y. Chen, X. Li, W. Yin, J. Han, "Multiple effects of nano-CaCO3 and modified polyvinyl alcohol fiber on flexure–tension-resistant performance of engineered cementitious composites", *Construction and Building Materials*, vol. 303, 124426, 2021.
- [17] A. Acir, S. Uzun, Y. Genç, Ş. Asal, "Thermal Analysis Of The Vver-1000 Reactor With Thorium Fuel And Coolant Containing Al2o3, Cuo, And Tio2 Nanoparticles", *Heat Transfer Research*, vol. 52(4), 79-93, 2021.
- [18] Y.Genc, S. Uzun, A. Acir, "Evaluation of the al/, cu/, si/, ag/water nanofluid effects on heat transfer characteristics in vver-1200 loaded with plutonium-thorium-based fuel". *Heat Transfer Research*, vol. 52(16), 1–12, 2021.
- [19] E. Şakar, Ö. F. Özpolat, B. Alım, M.I. Sayyed, M. Kurudirek, "Phy-X / PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry", *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 166, 2020.
- [20] J.F. Briesmeister "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", LA-13709M, Los Alamos National Laboratory, MCNP, 2020.
- [21] B.J. Webb, "COBRA-IV PC: A Personal Computer Version of CobraIV-I For Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores". U.S. Department of Energy under Contract DE-AC06-76RLO 1830, 1988.
- [22] C. Aksoy, S. Dizman, B. Çakir, T. E. Koparan, E. Tiraşoğlu, "The Radiation Shielding Properties of the Low Temperature Alloys". *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, vol. 21(5), 1022–1026, 2021.
- [23] Z. Aygun, N. Yarbasi, M. Aygun, "Spectroscopic and radiation shielding features of Nemrut, Pasinler, Sarıkamıs and Ikizdere obsidians in Turkey: Experimental and theoretical study", *Ceramics International*, vol. 47, no. 24, p. 34207-34217, 2021.
- [24] Z. Aygun, M. Aygun, "A study on usability of Ahlat ignimbrites and pumice as radiation shielding

materials, by using EpiXS code", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 19, p. 5675–5688, 2022.

- [25] Z. Aygun, M. Aygun, "Radiation Shielding Potentials of Rene Alloys by Phy-X/PSD Code", *ACTA PHYSICA POLONICA A*, vol. 141, no. 5, p. 507-515, 2022.
- [26] H. Knipe, F. Macori, "Half-value layer". Reference article, Radiopaedia.org. (accessed on 05 Sep 2022) https://doi.org/10.53347/rID-22271.
- [27] M. Şekerci, H. Özdoğan, A. Kaplan, "An Investigation on Gamma-Ray Shielding Properties of Zr-Based Bulk Metallic Glasses", *HNPS Advances in Nuclear Physics*, vol. 27, p. 48–55, 2019.
- [28] M.H. Rahimi, G. Jahanfarnia, "Thermal-Hydraulic Core Analysis Of The VVER-1000 Reactorusing A Porous Media Approach", *Journal Of Fluids And Structures*, vol.51, p. 85-96, 2014.
- [29] N.E.Todreas, M.S. Kazimi, "Nuclear Systems II Elements of Thermal Hydraulic Design", *Taylor & Francis*, New York, 2001.
- [30] O.E. Özkan, "Investigation of the Radiation Shielding Properties of Black Pine Wood Impregnated with Boric Acid", *Kastamonu Univ., Journal of Forestry Faculty*, 20(2), 200-207, 2020.
- [31] G, ALMisned Zakaly, SAM Issa, A. Ene, G. Kilic, O. Bawazeer, A. Almatar, D. Shamsi, E. Rabaa, Z. Sideig, HO. Tekin, "Gamma-Ray Protection Properties of Bismuth-Silicate Glasses against Some Diagnostic Nuclear Medicine Radioisotopes: A Comprehensive Study". (2021). *Materials*, 14(21), 6668.
- [32] O. Ağar, "Investigation on Gamma Radiation Shielding Behaviour of CdO–WO3–TeO2 Glasses from 0.015 to 10 MeV", *Cumhuriyet Science Journal*, 39(4), 983-990, 2018.
- [33] V.Ghazanfari, M. Talebi, J. Khorsandi, R. Abdolahi, "Effects of water based Al2O3, TiO2, and CuO nanofluids as the coolant on solid and annular fuels for a typical VVER-1000 core", *Progress in Nuclear Energy*, 91, 285–294, 2016.
- [34] E. Zarifi, G. Jahanfarnia, F. Veysi, "Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 51, p. 203-212, 2013.
- [35] H. Saadati, K. Hadad, A. Rabiee, A.H. Kamalinia, "Evaluation of nanofluid coolant effects on VVER-1000/V-446 reactor using 3-D full core coupled neutronic and thermohydraulics analysis", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 152, 107995, 2021.



OPTIMAL PID CONTROLLER DESIGN FOR TRAJECTORY TRACKING OF A DODECAROTOR UAV BASED ON GREY WOLF OPTIMIZER

¹Şahin YILDIRIM^(D), ^{2*}Nihat ÇABUK^(D), ^{2,3}Veli BAKIRCIOĞLU^(D)

¹ Erciyes University, Engineering Faculty, Mechatronics Engineering Department, Kayseri, TÜRKİYE
 ² Aksaray University, Vocational School of Technical Sciences, Aksaray, TÜRKİYE
 ³ Middle East Technical University, Center for Robotics and AI (ROMER), Ankara, TÜRKİYE
 ¹sahiny@erciyes.edu.tr, ²nihatcabuk@aksaray.edu.tr, ³vbakirci@metu.edu.tr

Highlights

- A cascaded PID control algorithm was employed to control the proposed dodecarotor,
- Obtained optimal gains of the controllers for the position and orientation of the proposed dodecarotor,
- Auto-tuning of gains was done comparatively based on PSO and GWO algorithms.



OPTIMAL PID CONTROLLER DESIGN FOR TRAJECTORY TRACKING OF A DODECAROTOR UAV BASED ON GREY WOLF OPTIMIZER

¹Şahin YILDIRIM^(D), ^{2*}Nihat ÇABUK^(D), ^{2,3}Veli BAKIRCIOĞLU^(D)

¹ Erciyes University, Engineering Faculty, Mechatronics Engineering Department, Kayseri, TÜRKİYE
 ^{2,3} Aksaray University, Vocational School of Technical Sciences, Aksaray, TÜRKİYE
 ³ Middle East Technical University, Center for Robotics and AI (ROMER), Ankara, TÜRKİYE
 ¹sahiny@erciyes.edu.tr, ²nihatcabuk@aksaray.edu.tr, ³vbakirci@metu.edu.tr

(Received: 10.09.2022; Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ABSTRACT: In this study, we aimed to find optimal PD controller gains to control orientation and position of a Dodecarotor UAV with minimum trajectory error. In this context, a cascaded PD controller approach which has velocity feedback in the inner loop and position feedback in the outer loop was adopted for each state (roll, pitch, yaw, altitude) in the flight control of the UAV. Subsequently, a fitness function was defined based on the system's time domain response and trajectory tracking error for each state, except the yaw angle, which is non-dominant in terms of trajectory tracking performance. Grey Wolf Optimizer (GWO) was used to obtain PD gains by minimizing the defined fitness function. At the same time, Particle Swarm Optimizer was used in order to benchmark the obtained results from GWO and to avoid a shallow solution space. The obtained PD controller parameters as a result of the optimization study of both algorithms were implemented to the system and the results were compared with each other. Finally, the gains that provided the best results for both algorithms were compared with each other and the results were discussed in terms of the time domain results and the actuator input smoothness. It has been observed that the GWO optimized controller provides a 40-46% improvement over PSO in all four different mass UAVs in terms of reducing axis position errors.

Keywords: PID control, GWO, Optimization, UAV

1. INTRODUCTION

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have become very popular in the past two decades, as developments in consumer rotorcrafts has led to lower prices for more and more advanced aircrafts. The rotorcrafts have become the most popular Vertical Take-Off and Landing (VTOL) vehicles and different from the classic helicopters, these vehicles have constant pitch blades and is controlled varying only the angular speed of each rotor. Due to its structure, these vehicles are practical prototypes for learning about aerodynamic phenomena and control of aerial vehicles. The popularity of rotorcrafts has grown so much today as it is the most used in the research field of aerial vehicles.

In applications which the UAV must be hold at stationary flight, the VTOL vehicles are the more convenient options because of their hovering capability. The attitude in a VTOL is automatically stabilized via an on-board controller in most applications, while its position is controlled by an operator through a remote-control system. Many in the research community focused on the design of position controllers for autonomous flights, resulting in remarkable advances in the field of rotor aircraft. PID controllers are the most common type of controller in many fields due to their simplicity, ease of implementation and efficiency [1-3]. If the parameters of the PID controller are not determined correctly, no matter which area of the industry is used, the system to which the controller is applied cannot perform at a satisfactory level. The use of heuristic algorithms [4-6], which is one of the algorithms developed for search purposes in many problems, has started to take on a lot of tasks related to the determination of controller parameters

[7]. Although the developed algorithms show different performances according to the structures of the systems to be controlled, most of them can give sufficient results.

In the literature, there are many studies on the control of standard UAVs such as quadrotor, hexarotor and octorotor [8-11]. Due to the proposed complicated control algorithms, which are sensitive to uncertainties in the system, stabilizing aerial vehicles is a hard task. Furthermore, tuning the gain of these controllers are also being a hard task and sometimes being time consuming. It is a known fact that system performance is affected by the nature of the commanded signal and the controller gains [12]. Incorrect selection of the commanded signal can adversely affect the overall performance of the system [13-14]. In addition, improper adjustment of controller gains can result in unsatisfactory performance. Therefore, trajectory design that directly affects the commanded signal and adjustment of controller gains should be done precisely [15].

Jabeur and Seddik [16] proposed PD and a PD-NN control schemes for a quadcopter. They stated that the PD-NN controller, which is optimized by artificial neural networks, gives excellent results against trajectory tracking and strong wind disturbances. Zareb et al. [17] used genetic algorithms to adapt and optimize the value of the controller parameters to obtain the best performance and decrease the consumed energy for Quadrotor UAV. Dewangan et al. [18] reported a solution for a path planning problem of multiple UAVs based on Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm. According to their results, they stated that the GWO algorithm outperforms other deterministic and meta-heuristic algorithms in path planning for 3D multiple UAVs. Shauqee et al. [19] designed a hybrid proportional double derivative and linear quadratic regulator (PD2-LQR) controller for altitude and attitude control of a quadrotor. They exploited GWO to search for optimal values of the controller's parameter. Through their simulation, they showed that the IGWO-based PD2-LQR controller can better monitor the desired reference input with shorter settling time and rise time, lower percent overshoot and minimum steady-state error and mean square error (RMSE). It can be said that the studies encountered in the literature are on the optimization of controller parameters related to multi-rotor aircraft, almost all of which have standard configurations.

In this context, this study is focused on the obtaining optimal gains of the controllers for the position and orientation control of a dodecarotor that has a unique configuration proposed previously by the authors [20-21]. For this purpose, firstly, a cascaded PID control algorithm was employed to control the vehicle. Afterwards, the gains of the controllers were tuned by using optimization techniques. At the same time, clarify the validity of the proposed method for auto-tuning the rotorcrafts controllers' gains is another impact of the study.

2. MATHEMATICAL MODELLING OF THE DODECAROTOR

2.1. Physical specifications

The UAV has 12 rotors placed in two layers to have a lower horizontal dimension. At the same time, each rotor is placed at a different angle in order to create a lifting force from twelve different notes. Thus, it is aimed to ensure that the UAV behaves more robustly in disruptive weather conditions. The solid model of the dodecarotor is given in Fig. 1.



Figure 1. Solid model of proposed dodecarotor system.

Figure 2 shows the orientation of the body, the rotational directions of the rotors, the angles and lengths of the arms, the 3D view of the vehicle and the direction of motion. Table 1 presents the physical characteristics of the proposed drone shown in Figure 2. Here, l_1 and l_2 are the arm lengths of the rotors in the upper and lower planes, respectively. Likewise, θ_1 and θ_2 are the connection angles of the upper and lower plane arm to the body, and their values are 22.5 and 45 degrees, respectively.

Table 1. Dodecarotor Physical Specifications						
Parameter	Value					
l1 [mm] (min-max)	660-810					
l2 [mm]	450					
Propeller diameter [inch] (min-max)	12-18					
θ_1 [deg]	22.5					
θ_2 [deg]	45					
mass [kg] (min-max)	12-30					
Number of rotors	4-12					



Figure 2. Physical features of proposed dodecarotor system.

2.2. Dynamic model

In order to design a controller for a system, first of all, the equation of motion is needed. The equation of motion describes the system's responses to different inputs. In our case, system inputs are the sum of rotor speeds that cause a force to control height and torques to control orientation, respectively. In order to describe this relationship, the equations of motion representing the 3D motion of the system are derived based on the Euler-Newton formulation.

A linear relationship between the body forces and the vector Ω forming the angular velocities of the motors can be obtained with a constant matrix C as in (1–3). Depending on the configuration of the vehicle, the C matrix can be calculated as in (3). The desired reaction torques and the thrust force of the rotors are represented by the vector $U_d = [T \tau_x \tau_y \tau_z]^T$.

$$\Omega = [\Omega_1^2 \quad \Omega_2^2 \quad \Omega_3^2 \quad \Omega_4^2 \quad \Omega_5^2 \quad \Omega_6^2 \quad \Omega_7^2 \quad \Omega_8^2 \quad \Omega_9^2 \quad \Omega_{10}^2 \quad \Omega_{11}^2 \quad \Omega_{12}^2]^T$$
(1)

$$C = \begin{bmatrix} k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f & k_f \\ \Lambda & -\Lambda & \Lambda & -\Lambda & -\Lambda & -\Lambda & -\Lambda & \Gamma & -\Gamma & \Gamma \\ \Delta & -\Delta & \Lambda & -\Delta & \Delta & -\Lambda & \Lambda & -\Lambda & \Gamma & -\Gamma & \Gamma \\ k_m & k_m & -k_m & -k_m & -k_m & k_m & k_m & -k_m & -k_m & k_m & k_m \end{bmatrix}$$
(2)

$$U_d = C * \Omega \tag{3}$$

In terms of readability of the C matrix, Λ , Δ and Γ are defined as in (4)

$$\Lambda = k_f * l_1 * \sin \theta_1 \quad \Delta = k_f * l_1 * \cos \theta_1 \quad \Gamma = k_f * l_2 * \sin \theta_2 \tag{4}$$

The proposed UAV is driven by a net force consisting of three components: thrust generated by the rotors, gravitational forces and external disturbance forces. The drag force caused by the drone body has not been taken into account since it is very low compared to these forces. The net force acting on the system is given in F_b (5). The translational acceleration caused by F_b is as in (6).

$$F_b = T - ({}^BR_G * mg + F_d) \tag{5}$$

$$\dot{V}_b = \frac{F_b}{m} - (\omega_b \ge V_b) \tag{6}$$

where V_b and $\omega_b = [p q r]^T$ are translational and angular velocity vectors defined in the body frame, respectively. These velocities can be estimated with Inertial Measurement Unit (IMU) feedback.

Different magnitudes of thrust in the rotors cause roll and pitch moments in the system. There are also gyroscopic moments that occur in the direction perpendicular to the rotational motion of each rotor due to the change in the orientation of the rotor's rotation. In (7), the total net moment M_b acting on the system is given. Since the magnitudes of the gyroscopic moments due to the angular acceleration of the rotors is very low compared to body torques, they can be neglected. The angular acceleration caused by M_b is as in (9).

$$M_b = \tau_{gyr} + \tau_{x,y,z} \tag{7}$$

$$M_{b} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_{r}} -(-1)^{i} * (I_{zz} * p * \Omega_{i}) \\ \sum_{i=1}^{n_{r}} (-1)^{i} * (I_{zz} * q * \Omega_{i}) \\ \sum_{i=1}^{n_{r}} -(-1)^{i} * (I_{zz} * \dot{\Omega}_{i}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{x} \\ \tau_{y} \\ \tau_{z} \end{bmatrix}$$
(8)
$$I\dot{\omega}_{b} = (M_{b} - (\omega_{b} \times (I\omega_{b}))$$
(9)

The Euler velocities $\dot{\phi}$ and the angular velocity vector ω_b are correlated by a kinematic connection: $\omega_b = \xi_{\phi} \dot{\phi}$, where ξ_{ϕ} expresses a matrix that is relating the Euler velocities with the body angular rates. Subsequently, first derivative of this equation yields $\dot{\omega}_b = \xi_{\phi} \ddot{\phi} + \dot{\xi}_{\phi} \xi_{\phi}^{-1} \omega_b$. This fact and (9) yields (10).

$$M(\varphi)\ddot{\varphi} = -\mathcal{C}(\varphi,\dot{\varphi})\dot{\varphi} + M_b \tag{10}$$

where $M(\phi)$ and $C(\phi, \dot{\phi})$ denotes the full inertia matrix and the Coriolis matrix, respectively. In theory, due to the fact that the motion of a VTOL vehicle during hover is drastically separated in each axis, the Coriolis matrix becomes very small and therefore negligible. According to the assumptions made, the simplified non-linear equation of motion of the proposed dodecarotor is obtained as follows.

$$m\ddot{x} = -(u + w_x)sin\theta$$

$$m\ddot{y} = (u + w_y)cos\thetasin\phi$$

$$m\ddot{z} = (u + w_z)cos\thetacos\phi - mg$$

$$I_x\ddot{\theta} = \tau_x + w_\theta$$

$$I_y\ddot{\phi} = \tau_y + w_\phi$$

$$I_z\ddot{\psi} = \tau_z + w_\psi$$
(11)

where *x*, *y* and *z* are the positions of the tool in Cartesian coornidates. *u* defines the total thrust. τ_z , τ_y and τ_x are yaw, pitch, roll moments, respectively. Likewise, θ , ϕ and ψ are roll, pitch and yaw angles, respectively. *I_j* and *g* are the inertia matrix and gravitational acceleration, respectively. Finally, *w_k* indicates unknown disturbances on the corresponding axis.

3. PROBLEM FORMULATION

3.1. Controller design

The PID proportional-integral-derivative controller control loop method is a widely used feedback controller method in industrial control systems. A PID controller continuously calculates the error value, which is the difference between the desired system state and the actual system state. Depending on the requirement of the system to be controlled, one, two or three of these three control units (P, I, D) are used. First of all, the mathematical model of the system to be controlled is obtained. A controller structure is constructed for each variable to be controlled.

The simplified form of the VTOL dynamic model obtained in (11) is given in (12).

$$\ddot{\varphi} = u_{\varphi} + w_{\varphi} \tag{12}$$

where ϕ states the second derivative of the Euler angles and *u* defines the control inputs. Here, *w* states external disturbances. The desired controller inputs specified in (13) is sufficient to balance the second order system given in (12), for the most part, if the disturbances are neglected.

$$u_{\varphi} = -k_p e(t) - k_d \frac{de(t)}{dt}$$
(13)

Where, e(t) is the error between desired value and the actual states. Likewise, k_p is the proportional gain and k_d is the derivative gain. In order that the change rate of the error does not trigger the derivative kick phenomenon due to the sudden change in the desired state, the change of the state is used here, not the error.

The angular rates φ are estimating from the IMU feedback, as mentioned before. Following this idea, the control algorithm used in this study can be deduced from (13) as given in (14). Since the stability analysis of the closed-loop system (14) is obvious, a separate analysis was not carried out in this study.

$$u(t) = k_p e(t) - k_d \dot{\varphi} \tag{14}$$

3.2. Optimization problem statement

In (14) the proportional and the derivative gains need to be tuned. In the literature, there exists several methods that use the phase domain and the time domain characteristics to adjust PID gains. In this study, an optimization procedure is adopted to adjust the controller gains in the time domain. For this purpose, an objective function is defined as in (15), which is based on the time domain characteristics.

$$\Phi_{PD} = \min \sum (a_1 (t_s - t_i)^2 + a_2 M_o^2)$$
(15)

Table 2. GWO and PSO Parameters							
Parameter Number of search agents Max. iterations Lower bound Upper bound							
Value	30	100	0	100			

where the constants denoted by a_i define the weight of the relevant parameter. t_s and t_i are the settling time and the desired settling time. M_o is defined as the Maximum Overshoot. By defined objective function in (15), without an overshoot a fast-settling time is aimed.

3.3. Methodology to solve optimization problem

Grey Wolf Optimizer (GWO) that is a new meta-heuristic search algorithm is implemented to solve the optimization problem [18, 22-23] that defined in (15). GWO algorithm mimics the leadership hierarchy and hunting mechanism of grey wolves in nature. The algorithm was first developed by Mirjalili et. al. in 2014 [24]. In addition, Particle Swarm Optimizer, which is the most popular Swarm Intelligence techniques, is also implemented to benchmark the obtained results from GWO. A more detailed description about GWO and PSO can be found in [7, 23-24].

The system and the proposed controller were developed using Matlab and Simulink, which has the powerful tools for simulations. The integrated structure of Matlab and Simulink environments enables online data exchange during the optimization process between phases. To obtain the time domain response characteristics required to evaluate the objective function described in (15), the closed loop system is simulated in the Simulink environment using possible solutions determined by the proposed algorithms running in the Matlab environment. To obtain system response a step reference input is used in the simulation study. Finally, weights a_1 and a_2 in the defined objective function in (15) are set to 10 and 0.5, and the simulation time is limited to 10 s.

The optimized PD controller parameters shown in Table 3 are applied to the system to evaluate the proposed method. These simulations are performed in two cases; first for a ramp input response and then for a predefined trajectory.

In order for the system to be fully simulated in the Simulink environment, the mathematical model of the system must be created correctly. The physical properties of the components of the vehicle, such as the mass of the vehicle and the inertial values, which are the parameters in this model, should be determined close to the truth. The Simulink model of all dodecarotor UAV created according to these determined parameters is given in figure 4.

4. SIMULATION RESULTS AND CASE STUDIES

Optimization process is performed 100 times separately for both algorithms using parameters defined in Table 2. Each optimization process is continued up to 30 iterations or until a solution reaching the $\Phi_{PD} \leq 0.001$ condition. Comparison of the proposed algorithms in terms of converges performances is given in Figure 3. As seen in the figure, GWO offers better convergence performance although both algorithms run with the exact same parameter. The optimized PD controller parameters shown in Table 3 are applied to the system to evaluate the proposed method. These simulations are performed in two cases; first for a ramp input response and then for a predefined trajectory.

Table 3. PD Controller Gains								
State	Re	oll	Pi	tch	Alti	tude		
		k _p	k _d	k _p	k _d	k _p	k _d	
Gains	GWO	16.89	46.04	17.43	24.69	2.04	47.64	
	PSO	5.18	6.90	8.72	22.14	3.38	98.92	



Figure 4. Simulink model of dodecarotor system

4.1. Ramp reference tracking

Ramp reference inputs are applied to the positions of the system at different simulation time. The tracking performance in all axes are given in the Figure 5. As seen in the figure, the aim of the study that is tuning the gains for a fast-settling time without overshoot is satisfied.



Figure 5. Reference tracking performance for all axes (left – X-axis, middle – Y-axis and right– Z-axis.)

By these results, it can be concluded that GWO provides successful and fast results in optimizing the gains of a PD controller that is designed for the Dodecarotor.

4.2. Trajectory tracking

In this section, the output responses of the case studies with pre-defined trajectories to test the Dodecarotor system using optimized PD controllers are presented. The trajectories studied in this section were carefully chosen to reflect the difficulties the control system may encounter in executing the required tracking.

The first performed case is a rectangular trajectory. Figure 6 demonstrates the tracking performance of the Dodecarotor system for the rectangular trajectory. As can be seen in the Figure 6, Dodecarotor followed the trajectory successfully with a tolerable error in the corners. Since the trajectory changes its direction suddenly at certain times in the corners, the errors in the corners can be considered tolerable.



Figure 6. Rectangular trajectory tracking performance of the Dodecarotor system (Black line – Desired path, Red line – Actual path.).

The second performed case is a helical-shaped trajectory. Figure 7 demonstrates the tracking of the Dodecarotor system for the rectangular trajectory. As can be seen in the Figure 7, Dodecarotor followed the trajectory successfully.



Figure 7. Helical trajectory tracking performance of the Dodecarotor system (Black line – Desired path, Red line – Actual path.).

The RMS values of the position errors in the three axes that occur in both rectangular and helical trajectories tracking are given in table 4. The results are shown in the table, taking into account the different mass values of the vehicle in the simulations performed with the controller gains obtained with both optimizers.

Table 4. RMSE values of reference trajectories								
Paran	neters	Rectangular trajectory			Helical trajectory			
Optimizer	Mass [kg]	X	Y	Ζ	Z X Y			
	12	1.4720	1.1910	0.1567	0.9290	0.9970	0.0303	
VO	18	1.4720	1.1910	0.1591	0.9290	0.9970	0.0310	
GV	24	1.4720	1.1910	0.1619	0.9292	0.9970	0.0317	
	30	1.4730	1.1910	0.1651	0.9292	0.9971	0.0325	
	12	1.4740	1.1940	0.2612	0.9311	0.9973	0.0519	
0	18	1.4960	1.1940	0.2705	0.9311	0.9976	0.0544	
PS	24	1.4770	1.1950	0.2813	0.9320	0.9977	0.0574	
	30	1.4775	1.1950	0.2930	0.9325	0.9978	0.0607	

From the results, it can be concluded that the validity of the approach implemented to tune the gains of the PD control that is applied to a Dodecarotor system is valid.

5. CONCLUSION

In this study, a fully mathematical model of a Dodecarotor with a unique configuration is adopted to design and tune a PD controller for stabilization and trajectory tracking for this complex, unstable and highly non-linear system. GWO, which is a widely used optimization algorithm in many systems in recent years, has been applied to adjust the controller gains. Compared to other commonly used optimizer, PSO. Simulations were performed for both optimizers. The simulations were made for two different trajectories and 4 different situations, and the RMS values of the position errors obtained from the simulations were used for this comparison. With the optimized controller parameters, the trajectory tracking performances of the UAV at 12 kg mass (no payload), 18 kg mass, 24 kg mass and 30 kg mass (full payload) in both rectangular and helical trajectory were evaluated. The results of the evaluations are presented both graphically and numerically. The obtained results can be briefly expressed as follows.

- The performance in helical trajectory tracking was better in the test performed with the controller gains obtained with both optimizers.
- The trajectory tracking performance decreased slightly as the vehicle's mass increased in all the controller gain values obtained with both optimizers.
- GWO provides a better convergence performance than PSO in both different mass and trajectory cases.
- When the numerical results given in Table 4 are examined, it is seen that using the parameters obtained with GWO, there is a decrease of 40-46% in axis position errors compared to PSO in UAVs with four different masses.

Finally, with the performed simulation results, the designed and optimized controller has been proven to balance the Dodecarotor system and to perform the required tracking.

Declaration of Ethical Standards

Not applicable.

Credit Authorship Contribution Statement

Şahin Yıldırım: Conceptualization, Resources, Writing - Review & Editing. Nihat Çabuk: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing- Original draft preparation. Veli Bakırcıoğlu: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing- Original draft preparation.

Declaration of Competing Interest

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

Funding / Acknowledgements

This study was supported by Erciyes University Scientific Research Projects Unit within the scope of FBA-2017-7393 project.

Data Availability

The dataset generated during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

REFERENCES

- [1] D. Kotarski, Z. Benic, and M. Krznar, "Control Design for Unmanned Aerial Vehicles with Four Rotors," *Interdiscip. Descr. Complex Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 236–245, 2016.
- [2] N. Hadi and A. Ramz, "Tuning of PID Controllers for Quadcopter System using Hybrid Memory based Gravitational Search Algorithm – Particle Swarm Optimization," Int. J. Comput. Appl., vol. 172, no. 4, pp. 9–18, 2017.
- [3] M. Akhil, M. Krishna Anand, A. Sreekumar, and P. Hithesan, "Simulation of the mathematical model of a quad rotor control system using Matlab Simulink," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 110–116, no. October 2011, pp. 2577–2584, 2012.
- [4] M. Ayyıldız and K. Çetinkaya, "Comparison of four different heuristic optimization algorithms for the inverse kinematics solution of a real 4-DOF serial robot manipulator," *Neural Comput. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 825–836, 2016.
- [5] M. B. Çetinkaya, H. Duran, and T. Hanne, "Performance Comparison of Most Recently Proposed Evolutionary, Swarm Intelligence, and Physics-Based Metaheuristic Algorithms for

Retinal Vessel Segmentation," Math. Probl. Eng., vol. 2022, 2022.

- [6] M. Mahi, O. K. Baykan, and H. Kodaz, "A new approach based on particle swarm optimization algorithm for solving data allocation problem," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 62, pp. 571–578, 2018.
- M. A. Sen and M. Kalyoncu, "Grey wolf optimizer based tuning of a hybrid LQR-PID controller for foot trajectory control of a quadruped robot," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 674–684, 2019.
- [8] M. Moussid, A. Sayouti, and H. Medromi, "Dynamic Modeling and Control of a HexaRotor using Linear and Nonlinear Methods," *Int. J. Appl. Inf. Syst.*, vol. 9, no. 5, pp. 9–17, 2015.
- [9] S. Li, Y. Wang, J. Tan, and Y. Zheng, "Adaptive RBFNNs/integral sliding mode control for a quadrotor aircraft," *Neurocomputing*, vol. 216, pp. 126–134, 2016.
- Y.-R. Tang, X. Xiao, and Y. Li, "Nonlinear dynamic modeling and hybrid control design with dynamic compensator for a small-scale UAV quadrotor," *Measurement*, vol. 109, pp. 51–64, Oct. 2017.
- [11] Ş. Yıldırım, N. Çabuk, and V. Bakırcıoğlu, "Comparison of Flight Performances of Unmanned Air Vehicle with Six Rotors and Eight Rotors Under Different Disturbance Effects," *Konya J. Eng. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 552–562, 2020.
- [12] R. Miranda-Colorado, L. T. Aguilar, and J. E. Herrero-Brito, "Reduction of power consumption on quadrotor vehicles via trajectory design and a controller-gains tuning stage," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 78, pp. 280–296, 2018.
- [13] W. Dong, G. Y. Gu, X. Zhu, and H. Ding, "A high-performance flight control approach for quadrotors using a modified active disturbance rejection technique," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 83, pp. 177–187, 2016.
- [14] R. Miranda-Colorado and L. T. Aguilar, "Robust PID control of quadrotors with power reduction analysis," *ISA Trans.*, vol. 98, no. xxxx, pp. 47–62, 2020.
- [15] H. Yao, R. Qin, and X. Chen, "Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications A review," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 12, pp. 1–22, 2019.
- [16] C. Ben Jabeur and H. Seddik, "Neural networks on-line optimized PID controller with wind gust rejection for a quad-rotor," *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.*, 2021.
- [17] M. Zareb, W. Nouibat, Y. Bestaoui, R. Ayad, and Y. Bouzid, "Evolutionary Autopilot Design Approach for UAV Quadrotor by Using GA," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 347–375, 2020.
- [18] R. K. Dewangan, A. Shukla, and W. W. Godfrey, "Three dimensional path planning using Grey wolf optimizer for UAVs," *Appl. Intell.*, vol. 49, no. 6, pp. 2201–2217, 2019.
- [19] M. N. Shauqee, P. Rajendran, and N. M. Suhadis, "Proportional Double Derivative Linear Quadratic Regulator Controller Using Improvised Grey Wolf Optimization Technique to Control Quadcopter," Appl. Sci., vol. 11, no. 6, p. 2699, Mar. 2021.
- [20] Ş. Yıldırım, N. Çabuk, and V. Bakırcıoğlu, "Design and trajectory control of universal drone system," *Measurement*, vol. 147, p. 106834, Dec. 2019.
- [21] V. Bakırcıoğlu, N. Çabuk, and Ş. Yıldırım, "Experimental comparison of the effect of the number of redundant rotors on the fault tolerance performance for the proposed multilayer UAV," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 149, p. 103977, Mar. 2022.
- [22] M. N. Shauqee, P. Rajendran, and N. M. Suhadis, "An effective proportional-double derivativelinear quadratic regulator controller for quadcopter attitude and altitude control," *Automatika*, vol. 62, no. 3–4, pp. 415–433, 2021.
- [23] M. Karakoyun, A. Ozkis, and H. Kodaz, "A new algorithm based on gray wolf optimizer and shuffled frog leaping algorithm to solve the multi-objective optimization problems," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 96, p. 106560, 2020.
- [24] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014.



PERLİT GENLEŞTİRMEDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN AGREGA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME-YENİ BİR YAKLAŞIM

¹Lütfullah GÜNDÜZ^(D),² Şevket Onur KALKAN^(D)

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE ¹lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ²sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılganlığını ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yaklaşım irdelenmiştir.
- Bu çalışmada, perlit genleştirmede 560 °C ve 830 °C eşik sıcaklık değerleri olarak tanımlanmıştır.
- Maksimum tane iriliği arttıkça, su ile etkileşime girdiğinde çökme (deforme olma) değerlerinin de arttığı görülmüştür.
- Genleşmiş perlit ile üretilen harç örneklerinde, perlit agreganın genleştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmüştür.



PERLİT GENLEŞTİRMEDE SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN AGREGA KARAKTERİSTİĞİNE ETKİLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME-YENİ BİR YAKLAŞIM

¹Lütfullah GÜNDÜZ⁽¹⁾,^{2*}Şevket Onur KALKAN⁽¹⁾

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE ¹lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ² sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.03.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ÖZ: Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi sonrası oluşan genleşmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, genleşmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılganlığını ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yaklaşım irdelenmiştir. Çalışmada, 125-250 μm, 250-500 μm ve 500-750 μm boyut aralıklarındaki ham perlit kullanılmıştır ve genleştirme sıcaklıkları sırasıyla, 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 ve 1040 °C olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, ham perlitin genleştirme sıcaklığı arttıkça, genleşmiş perlitin yığın yoğunluğunun azaldığı ve tane boyutunun arttığı tespit edilmiştir. Maksimum tane iriliği arttıkça, genleşmiş perlit agreganın değişen matris yapısındaki farklılık nedeni ile su ile etkileşime girdiğinde çökme (deforme olma) değerlerinin de arttığı görülmüştür. Çimentolu harçlarda genleşmiş perlit agregasının çökme oranının artması ile harcın basınç dayanımının ve harcın işlenebilirliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Ancak her ne kadar yüksek sıcaklıkta genleştirilen perlit agregası ile üretilen harçların işlenebilirlik ve dayanım değerleri çökmenin de etkisi ile azalsa da bu tip agrega ile üretilen harcın ısıl performans özelliğinin iyileştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Analiz, Genleştirme, Performans, Perlit, Özellik, Harç, Sıcaklık

An Investigation on the Effects of Temperature Change on Aggregate Characteristics in Perlite Expansion - A New Approach

ABSTRACT: In this study, the changes in the expanded aggregate forms formed after the expansion process of raw perlite at different temperature values in an equivalent time were analyzed and the factors affecting the structural characteristics of the expanded perlite were examined. Especially after expansion process, a new approach has been examined to represent strength, fragility, and crumbling phenomenon of the perlite aggregate. In the study, raw perlite in 125-250 μ m, 250-500 μ m and 500-750 μ m size ranges was used and the expansion temperatures were 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 and 1040 °C, respectively. According to the results, it was determined that as expansion temperature of the raw perlite increased, bulk density of the expanded perlite decreased, and grain size increased. It was observed that as the maximum grain size increased, the collapse (deformation) values increased when interacted with water due to the difference in the changing matrix structure of expanded perlite. Compressive strength and workability decreased with increase in the collapse rate of the expanded perlite aggregate in cementitious mortars. Although workability and strength of the mortars produced with perlite aggregate expanded at high temperature decreased with the effect of collapse, it was determined that the thermal performance of the mortar produced with this type of aggregate improved.

Keywords: Analysis, Expansion, Performance, Perlite, Property, Mortar, Temperature

*Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Perlit, nispeten yüksek su içeriğine sahip amorf yapıda volkanik bir camdır. Doğada özellikle volkanik bölgelerde mineral oluşumları görülmektedir. Bünyesinde %2-%6 oranlarında değişen kristal suyu bulunur. Doğal kayaç formu yeterince ısıtıldığında bu su kaybolur, oluşan su buharı basıncıyla çok fazla genişleme özelliğine sahiptir. Genellikle, genişletilmiş perlit, 900 ila 1200 °C sıcaklıklara maruz kaldığında boyutunda genleşme eğiliminde olan silisli bir volkanik malzeme olarak bilinmektedir [1]. Ham perlitin genleştirilmesi ve inşaat endüstrisinde kullanımı üzerine uzun yıllar çoğu araştırmacılar ilgi duymuş ve genleşmiş perlitler farklı tasarımlardaki yapı malzemesi üretimlerinde kullanıla gelmiştir. Yapılan bilimsel araştırmalarda perlitin genleştirilmesi, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişimlerinin incelenmesi ve perlitin refrakter tuğla, yüksek sıcaklık yalıtımı, hafif beton, kriyojenik yalıtım, filtrasyon ve harç katkı maddesi gibi çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda faydalı olduğu rapor edinilmiştir [2-4]. Genleşmiş perlit, inşaat sektöründe yapı malzemelerinin üretilmesinde hafif agrega ve/veya dolgu malzemesi olarak kullanımı yaygın bir malzeme türüdür. Kullanıldığı ürüne gözenekli yapısı ve düşük yoğunluk değeri sebebiyle yalıtım özelliği kazandırmaktadır. Özellikle, küresel ısınmanın birincil nedeni olduğuna inanılan enerji tasarrufu ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için, üstün 151 ve ses yalıtım özellikleri gibi dikkate değer faydaları nedeniyle hafif beton geliştirme alanında genleşmiş perlit kullanımı dikkat çekmektedir [5]. Şengül ve arkadaşları çalışmalarında normal agregaların %80'i genleşmiş perlit ile değiştirildiğinde ısıl iletkenlikte %65'lik bir azalma gözlemlendiğini bildirmiştir [6]. İnşaat sektörü haricinde ziraat sektöründe, topraksız tarım uygulamalarında, çiçekçilikte, seracılık gibi alanlarda kullanımı yanı sıra ilaç ve kimya gibi çok farklı endüstriyel alanlarda da kullanımı görülmektedir [7]. Daha az bilinmesine rağmen, camsı doğası ve kimyasal bileşimi (%70-75 SiO2 ve %12-18 Al2O3) nedeniyle çok ince öğütülmüş perlit malzemeler puzolanik özelliklere sahiptir. Yu ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmalarda perlitin puzolanik aktivitesini incelenmişlerdir [8]. Diğer bir çalışmada, Erdem ve arkadaşları öğütülmüş perlit kullanarak harmanlanmış çimentolar ve harçlar üretmişlerdir [9].

Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan genleşmiş perlitler, çoğunlukla yüksek sıcaklık değerlerinde genleşmiş malzeme karakteristiğini oluşturduğu için kırılgan agrega yapısına sahip olup, ürünlerin elde edilmesi için hazırlanan harç ve/veya hamur karışımlarında diğer karışım bileşenlerinin etkisiyle veya karıştırma şekline bağlı olarak ufalanma özelliği gösterirler. Bu durum, karışıma giren iri boyutlu genleşmiş perlit agreganın ürün matrisinde daha küçük taneli bir agregaya dönüşümünü gündeme getirmektedir. Genleşmiş perlitin tane iriliğinin bu şekilde düşüşü hem malzemenin yoğunluğunu artırmakta hem de elde edilen taze harcın beklenilenden daha küçük hacim oluşturmasına neden olmaktadır. Harçtaki hacim düşüşü yapı malzemesinin üretilmesinde genellikle daha fazla harç malzemesi kullanımı ve sarfiyatın daha da artmasına neden olur. Optimum koşullarda ve hacimde bir harç elde etmek için, karışımda kullanılacak olan genleşmiş perlitin tane iriliği, genleşme sıcaklığı değeri ve agrega yapısı son derece önem kazanmaktadır. Agrega mukavemeti yüksek, karışım sürecinde ufalanmayan ve hacim kaybına neden olmayan genleşmiş perlitler bu bağlamda önemlidir. Panagiotopoulou ve arkadaşları genleşmiş perlit agreganın yığın yoğunluğunun artması ile ezilme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir [10]. Ancak, literatür incelendiğinde, genleşmiş perlitin narin yapısı nedeniyle çimentolu ürünlerin karıştırılması ve yerine yerleştirilmesi sırasında bu agregadan kaynaklı nasıl bir değişim olacağı eksik bir konu olarak görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi sonrası oluşan genleşmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, genleşmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılganlığını ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yöntem öngörülmüştür. Bu yöntemde genleşmiş perlitin agrega hüviyetinde irdelenebilmesine de temsili bir ölçek olabilecek yaklaşımın bulguları tartışılmıştır. Ayrıca, bu yönteme göre belirlenmiş ve farklı karakteristik yapıya sahip genleştirilmiş perlit agregalı çimento esaslı kompozit harç örneklerinin teknik performans değerleri de irdelenmiş olup, konu üzerine yeni araştırma yapacak araştırmacılara bir ışık tutmak amaçlanmıştır.

2. HAM PERLİT VE KARAKTERİSTİĞİ (RAW PERLITE AND ITS CHARACTERISTICS)

Farklı sıcaklık değerlerinde ham perlitin genleştirilmesi ve sonrasında genleştirilmiş perlit agreganın çimento esaslı kompozit bir harç karışımında hafif agrega olarak kullanımında harcın mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı sıcaklık değerlerinde genleşebilme özelliğine sahip bir perlit kayacı üzerinde araştırmanın detaylandırılması önem kazanmaktadır. Bu açıdan güncel olarak ham perlit kayacını birden farklı coğrafik bölgelerden temin edebilmek mümkündür. Ancak, her bir doğal perlit kayacının genleşme karakteristikleri gerek orijini gerek kimyasal içeriği ve gerekse yapısalfiziksel özelliklerine göre farklılıklar görülebilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan ham perlit, İzmir Bergama bölgesinde normal piyasa koşullarından temin edilmiş olup, doğal kayaç formunda laboratuvar ortamına getirilmiştir. Ham perlit, öncelikle primer bir kırıcıda kırılmış (Şekil 1) ve 2 mm'lik bir elek ile ön boyutlandırma yapılmıştır. Daha sonra ön boyutlandırması yapılmış ham perlit, üç ayrı boyut sınıfına elenerek gruplandırılmıştır: 125-250 µm, 250-500 µm ve 500-750 µm. 125 µm altı boyut toz boyut olarak kabul edilmiş olup, çalışmada 125 µm'den daha düşük ince taneli ham perlitler değerlendirmeye alınmamıştır. Bununla birlikte 750 µm boyut üstü ham perlit malzemelerde değerlendirmeye alınmamıştır. Tane boyutu sınıflandırılmış ham perlit malzeme örneklerinin kuru yığın yoğunluk değerleri, 125-250 µm boyut aralığı için ortalama 1140 kg/m³, 250-500 µm boyut aralığı için ortalama 1115 kg/m³ ve 500-750 µm boyut aralığı için ortalama 1090 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ham perlitin kimyasal içerik değerleri de Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ham perlitin primer kırıcı sonrası genel görünümü *Figure 1.* View of raw perlite after primary crusher

Table 1. Chemical composition of the raw perlite									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	MnO	SO ₃	K.K.
%71,60	%13,40	%1,15	%2,24	%4,05	%1,12	%0,08	%0,03	%0,24	%4,11

3. ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDIGS)

3.1. Sıcaklık – Tane Boyutu ve Genleşme Oranı İlişkisi (Temperature - Grain Size and Expansion Rate Relationship)

Ham perlitin genleştirilmesinde başlıca dört temel faktör irdelenmektedir. Bunlardan birincisi, ham perlitin orijini ve yapısal özelliğidir. Bir diğeri, agrega tane boyutudur. Üçüncüsü, genleştirme işlemi için gerekli sıcaklık değeridir. Sonuncusu ise genleştirme işleminde uygulanacak süredir.

Ham perlit oluşumu itibariyle genellikle SiO2'ce zengin asidik karakterdeki bir magmanın yüzeyde ani soğumasıyla katılaşması sürecinde oluşan kütlenin bünyesine su buharı girmesi sonucu oluşan volkanik kökenli bir kayaç yapısına sahiptir. Kimyasal yapının perlit genleşmesine etkisi üzerine farklı araştırmacıların infrared spektrometresinde yaptıkları çalışmalarda, ham perlitteki gevşek bağlı su moleküllerinin hidrojen bağları 3.0 ve 6.1 mikron bantlarında görüldüğünü rapor etmişlerdir [11-12]. Riyolitik camın şebeke yapısındaki sıkı bağlanmış monomerik OH grupları ise, 2.75 p'de tipik absorpsiyon bandı vermediği deklere etmişlerdir. Bu araştırmacıların farklı perlit malzeme örnekleri üzerinde yaptıkları kimyasal analizlerde, riyolit tipindeki esas bileşimin sabit kaldığı ve sadece bağlı su içeriğinin değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bu bağlamda, ham perlitin genleşme kabiliyetinin perlitin kimyasal bileşimi yerine efektif su miktarına göre değiştiğini rapor etmişlerdir [11-12]. Ham perlit malzemeler genellikle %2-%5 aralığında su içermektedir. Perlitteki suyun bir kısmı gevşek bağlanmış su olup, 350°C civarında ısıtıldığında perlitteki suyun %3-%3,5'luk kısmı, bünyeden atılır. Ancak geriye kalan su, sıkı bağlanmış su olarak tanımlanmakta olup, ancak 750-1100°C arasında ısıtıldığında bünyeden atılabilmektedir. Bu sıkı bağlanmış suya genellikle efektif su (aktif su) denilmektedir [11-12]. Kayacın bünyesinde oluşum mekanizmasına göre farklı oranlarda efektif su (aktif su) bulunmakta olup, bu su miktarının perlitin genleşme karakteristiğine etkisi büyüktür. Bu bağlamda, kayacın bünyesindeki efektif suyun (aktif su) miktarına göre ham perlitler genellikle aktif perlit ve pasif perlit olarak tanımlanabilmektedir. Aktif perlitlerin bünyesinde aktif su miktarı yüksek olup, düşük sıcaklık değerlerinde (750-900°C) büyük hacim artışı oluşturarak genleşme karakteristiği gösterebilirler. Pasif perlitler de ise, aktif su miktarı daha düşük düzeyde olup, ancak yüksek sıcaklık değerlerinde (900-1100°C) genlesebilirler [11-12]. Ham perlitlerin yapılan kimyasal analizleri ile kızdırma kaybı değeri, ham perlitlerin yapısal özellikleri hakkında önemli yorumlamaların yapılabilmesine imkân tanımaktadır [11]. Bu çalışma kapsamında kullanılan ham perlit örneklerinin kimyasal analiz sonucunda ham perlitlerin kızdırma kaybı ortalama %4,11 olarak belirlenmiştir. Analiz bulgularına göre geriye kalan yaklaşık %1,98'lik kısmın ise perlit örneklerinde genleştirilmesinde etkili olabilecek efektif su (aktif su) miktarı olduğu değerlendirilmiştir. Benzer yaklaşım, Şapçı N. ve Ceylan H. Nevşehir-Acıgöl perlitlerinin genleştirmesi üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda da uygulanmıştır [13]. Bu değerlendirmeye göre, çalışmada örnek olarak kullanılan ham perlitin aktif su içeriği varlığı sebebiyle genleşme özelliği gösterebileceği öngörülmüş olup, yapılan 780°C'de yapılan ön genleştirme çalışmasında perlitin yüksek hacim artışı oluşturarak genleşme özelliği gösterdiği belirlenmiştir. Bu bağlamda bu perlit örneklerinin aktif perlit hüviyetinde bir perlit karakteristiğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Ham perlitin tane boyutu genleşme oranına etki eden önemli bir fiziksel faktördür. Tane boyutu arttıkça, genleşme sürecinde daha uzun süre sıcaklığa maruz kalmaları gerekmektedir. İri taneli aktif perlitlerde pasiflere oranla daha kısa sürede genleşme olgusu sergileyebilmektedir. Bu çalışmada, ham perlit agrega örneklerinin farklı sıcaklık değerlerinde genleştirilmesi amacıyla 3 ayrı tane boyutunda sınıflandırılmış 125-250 µm, 250-500 µm ve 500-750 µm boyut aralıklarındaki malzemeler kullanılmıştır.

Ham perlitin genleştirme işlevinde öncelikle bünyesinde bulunan gevşek bağlı suyu buharlaştırmak amacıyla suyun buharlaşmasının sağlanabileceği bir sıcaklık değerinde ön ısıtma işlemi uygulanır. Bu süre perlitin tane boyutuna göre farklılık gösterebilir. Çalışma kapsamında her üç tane boyutunda hazırlanmış ham perlitlerin genleştirilmesinde ortalama 180°C'lik bir etüv ortamında tüm ham perlit örnekleri 15 dakika süreyle ön ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. Daha sonra seramik krozeler içerisine konmuş ham perlit örnekleri 16 farklı sıcaklık değerinde laboratuvar boyutlu bir fırın ortamında 5 dakika süreyle sıcaklığa maruz bırakılarak genleşme karakteristikleri analiz edilmiştir. Kroze içerisine yerleştirilen her bir perlit örneğinin farklı yönlerden en az 12 adet çap değerleri 0.01 mm hassasiyetli dijital bir kumpas ile ölçülüp kaydedilerek, genleşme işlemi öncesi bu ölçümlerin ortalaması alınarak test örneğinin başlangıç çap değeri (D₁) olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu test örnekleri belirlenen sıcaklık değerinde 5 dakikalık genleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra fırından çıkartılarak bir desikatör içerinde soğumaya bırakılmış ve ısıl işlem sonrası oluşan yeni çap değeri başlangıçta uygulanan metoda benzer şekilde yeniden belirlenerek, genleşmiş örneğin ortalama çap değeri (D₂) olarak kaydedilmiştir. Her iki başlangıç ve ısıl işlem sonrası çap değer değişimleri arasında oluşan fark değerinden yüzde değeri hesaplanarak test örneğinin genleşme oranı (Δ G) aşağıdaki yaklaşımla belirlenmiştir:

$\Delta G = ((D_2 - D_1)/D_1)*100$

Çalışma kapsamında uygulanan genleştirme sıcaklık değerleri sırasıyla, 200, 360, 410, 480, 530, 560, 590, 610, 640, 660, 690, 730, 760, 830, 900 ve 1040 °C'dir. Bu genleşme-sıcaklık etkileşimi sonrası üç farklı tane boyutundaki her bir ham perlitin genleşme sonrası genleşme oranları % cinsinde belirlenmiş olup, bulgular grafiksel olarak Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Ham perlitin genleşme sonrası sıcaklık – genleşme oranı ilişkisi Figure 2. Expansion temperature – expansion ratio relationship of raw perlite

Ham perlitin 200 °C–410 °C aralığında düşük sıcaklık ortamında genleşme oranlarının %4'ün altında olduğu görülmekle birlikte, 125-250 µm tane boyutunda bu sıcaklık aralığında genleşme oranı 250-500 µm ve 500-750 µm boyutlu perlitlere göre daha düşük seviyelerdedir. Ham perlitin tane boyutu irileştikçe aktif perlit formunda genleşme oranı artmaktadır. Benzer olgu 410 °C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde de görülmüş olup, özellikle >560°C olan sıcaklığa maruz kalmış ham perlitin belirgin bir genleşme oranları her bir boyut aralığı için sırasıyla; 125-250 µm tane boyutlu ham perlit için %0,7 - %202, 250-500 µm tane boyutlu ham perlit için %0,8 - %236 ve 500-750 µm tane boyutlu ham perlit için %0,9 - %247' dir.

Genleşmiş perlitin hafif agrega olarak kullanıldığı harç karışımlarında, yüksek mukavemet arzu edilen sonuçlar için homojen dağılımlı ve düzenli formlu nispeten küçük gözenek boyutlarına sahip perlit agrega kullanımı önem kazanmaktadır. Çalışma kapsamında 530 °C, 660 °C ve 900 °C sıcaklık değerlerinde genleştirilmiş perlit agregaların genleşme sonrası örneklerin sembolik tane görünümleri Şekil 3 – Şekil 5'de verilmiştir. Bu görseller irdelendiğinde görüldüğü üzere, genleşme sıcaklık değeri arttıkça agreganın fiziksel formu ve matris karakteristiği daha gözenekli bir yapı kazanmaktadır. 880 °C'nin üzerinde sıcaklık değerlerinde genleşmiş perlit agrega taneleri arasında kısmen akma yapısına yakınsak form oluşturan tanelerin varlığı da dikkat çekmektedir (Şekil 6).



Şekil 3. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (530 °C)Figure 3. View of expanded perlite aggregate (530 °C)



 Şekil 4. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (660 °C)

 Figure 4. View of expanded perlite aggregate (660 °C)



Şekil 5. Genleşmiş perlit agreganın genel görünümü (900 °C)Figure 5. View of expanded perlite aggregate (900 °C)



Şekil 6. Genleşmiş perlit agrega taneleri arasındaki form farklılığı sembolik görünümü *Figure 6.* The appearance of the difference in form between the expanded perlite aggregate grains

Ham perlitin tane boyutundaki farklılık genleşme sonrası elde edilen genleşmiş perlit agreganın birim hacim kütle değerlerinin de farklılık göstermesine etken bir faktördür. Üç ayrı tane boyut aralığındaki perlit örneklerinin farklı sıcaklık değerlerinde genleştirilmesi sonrası malzemelerin birim hacim kütle değişimleri sırasıyla Şekil 7 – Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 7. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (125-250 μm boyut aralığı) *Figure 7. Temperature – unit weight interaction* (125-250 μm size range)

125μm–250μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi, oluşan yeni matris yapının genel formuna göre değişkenlik göstermektedir. 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1090 kg/m³'ten 738 kg/m³'e %32'lik bir değişimle hafifleyerek azalmıştır. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 2717 kg/m³'ten 275 kg/m³'e %61,6'lık bir değişimle düşmüştür. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta genleştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 218 kg/m³'ten 108 kg/m³'e %50,4'lük bir değişimle gelişmektedir. Perlitin birim hacim kütlesinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluştuğu görülmüştür. Genel bir eğilim olarak sıcaklık arttıkça genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri düşmekte ve daha hafif bir form kazanmaktadır.


Şekil 8. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (250-500 μm boyut aralığı) *Figure 8. Temperature – unit weight interaction* (250-500 μm size range)

250μm–500μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi irdelendiğinde; 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1067 kg/m³'ten 675 kg/m³'e %36,7'lik bir değişimle hafifleyerek azalmaktadır. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 654 kg/m³'ten 196 kg/m³'e %70'lik bir değişimle düşmektedir. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta genleştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 165 kg/m³'ten 74 kg/m³'e %55,2'lik bir değişimle gelişmektedir. 125 μm–250 μm boyut aralığında görüldüğüne benzer şekilde perlitin birim hacim kütle değer aralığında elde edilen sayısal büyüklüklerden görüldüğü gibi ham perlitin tane boyutu artlığında artan genleşme miktarının bir fonksiyonu olarak daha hafif perlit agrega elde edilebilmektedir. Bu yaklaşım, malzemenin artan tane boyutuna bağlı perlitin daha etkin aktifliği ve kristal su miktarının yeterliliği ile doğrudan orantılıdır.



Şekil 9. Sıcaklık – birim hacim kütle etkileşimi (500-750 μm boyut aralığı) *Figure 9. Temperature – unit weight interaction* (500-750 μm size range)

500 μm–750 μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin de genleşme sonrası birim hacim kütle değişimi irdelendiğinde; 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 1029 kg/m³'ten 677 kg/m³'e %34,2'lik bir değişimle hafifleyerek azalmaktadır. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin birim hacim kütle değeri 646 kg/m³'ten 204 kg/m³'e %768,4'lük bir değişimle düşmektedir. 830 °C sıcaklık değeri üzerindeki sıcaklıkta

genleştirilen perlitin birim hacim kütle değeri ise 124 kg/m³'ten 65 kg/m³'e %47,6'lık bir değişimle gelişmektedir. Diğer her iki perlit tane boyutu aralığında görüldüğüne benzer şekilde perlitin birim hacim kütlesinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluşmuştur. Genleştirilmiş perlitin hafif agrega olarak bir harç karışımı bileşeni olarak kullanımı düşünüldüğünde, elde edilecek harç ve/veya ürünün dayanım, durabilite ve suya karşı direnci vb. gibi teknik parametreler dikkate alındığında perlitin birim hacim kütlesinin ne düzeyde olması gerektiği önceden belirlenmesi gerekliliği önem arz eder. Bu bağlamda, yüksek dayanım ve/veya ürün için yürürlükte olan bir standardın öngördüğü basınç dayanım değerinin sağlanabilmesi için genleşmiş perlitin yoğunluğunun da yüksek olması bir gerekliliktir. Örneğin 80 kg/m³ birim hacim kütleli bir perlit agrega ile 250 kg/m³ birim hacim kütleli başka bir perlit agregayla yapılmış sertleşmiş harcın dayanım değerleri eşdeğer değildir. Perlit yoğunluğu arttıkça harç malzeme de dayanım kazanacaktır. Bununla birlikte, laboratuvar çalışmalarından elde edilen bulgularda; genleşmiş perlit yoğunluğu düştükçe perlit malzemenin su ile teması sonrası oluşan karışımın hacminde de önemli miktarda azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu hacim azalması "cökme" ve/veya "oturma" olarak da ifade edilebilecek harcın yoğunluğunu artırıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu bakımdan genleşmiş perlitin uygulamada çökme değerlerini de dikkate alınarak gerekli hesap ve irdelemelerin yapılması kaçınılmaz olmaktadır.

3.2. Genleşmiş Perlit Karakteristiğinin Analizi (Analysis of Expanded Perlite Characteristics)

Her bir genleşmiş perlit tanesi, genleşme işlemindeki sıcaklık, süre ve tane boyutuna bağlı farklı gözeneklilik oranına sahiptir. Yüksek sıcaklık değerlerinde genleşmiş olan bir perlitin matris yapısında oluşan yüksek gözeneklilik sebebiyle su emme kapasitesi de yüksek olmakta, bununla birlikte emilen suyu bünyede tutma süresi de uzamaktadır. Yüksek gözeneklilik oranına ve aynı zamanda düşük birim hacim kütle değerine sahip genleşmiş perlit, herhangi bir harç karışımında hafif agrega olarak kullanıldığında, harcın karma suyu etkisiyle bünyeye hızlı bir şekilde su emilimi gerçekleşmekte, matris yapının karakteristiğine bağlı olmak koşuluyla gözenekler arasındaki matris birimin deforme olabilmesiyle agrega hacminde bir düşüş gerçekleşebilmektedir. Bu durum, genleşmiş perlitin su teması sonrası "çökme değeri" olarak da tanımlanabilmektedir. Çökme değeri ne kadar yüksekse, bu özelliği taşıyan genleşmiş perlitli harçların yaş kıvamında hacim kaybı da daha yüksek olmaktadır. Genleşmiş perlit kullanımındaki bu durum çoğu zaman bir olumsuzluk olarak da nitelendirilebilmektedir. Bu bakımdan, harç karışımları tasarımlandırılırken genleşmiş perlit kullanımından kaynaklı yaş harçtaki hacim düşüşü/kaybı (çökme) önceden irdelenerek, çökme miktarını minimize edecek özellik taşıyan bir genleşmiş perlit malzemesinin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında genleşmiş perlit kullanımı için uygunluk değeri olarak öngörülecek yalın bir yaklaşım tanımlanmış olup, uygulama bulguları detaylı etüt edilmiştir.

Genleşmiş perlitin su teması sonrası oluşan yaş kıvamındaki hacim kaybı/çökme değerini agrega bazında önceden belirlemeye yönelik öngörülen metodolojide öncelikle 200 °C sıcaklık ortamına 5 dakika maruz kalmış perlit agrega örnekleri hazırlanır. Bu perlit agregadan daha sonra 200 ml hacminde bir miktar alınarak Su/Katı=0,75 oranında su ile karıştırılarak taze ve yaş bir perlit agrega karışımı elde edilir. Bu karışım 3 dakika süreyle düşük devirli bir karıştırıcı ile karıştırılır ve en az 250 ml hacimli cam mezür içerisine konularak en az 5 dakika dinlenmeye bırakılır. Bu dinlenme süresi sonrasında yaş perlit agregalı karışımın mezürdeki yükseklik değeri mezür üzerindeki ölçekten okunarak, "referans değer" "Href" olarak kaydedilir. Daha sonra, harç karışımında kullanımı düşünülen bir veya birkaç genleşmiş perlit agregadan 200 ml hacimli örnekler alınarak eşdeğer Su/Katı=0,75 oranında su ile karıştırılarak taze ve yaş genleşmiş perlit agrega karışımları hazırlanır. Bu karışımlar da 3 dakika süreyle düşük devirli bir karıştırıcı ile karıştırılır ve en az 250 ml hacimli cam mezürler içerisine konularak en az 5 dakika dinlenmeye bırakılır. Bu dinlenme süresi sonrasında genleşmiş perlit agregalı yaş karışımın mezürlerdeki yükseklik değerleri mezür üzerindeki ölçekten okunarak, her bir genleşmiş perlit agregası için ayrı ayrı "ölçüm değeri" "Hi" olarak kaydedilir. Genleşmiş perlit matris yapısı, gözeneklilik oranı, tane boyutuna bağlı olarak referans değere kıyasla daha yüksek bir çökme değeri gösterecektir. Bu ölçüm değerlerinde, referans değerin yükseklik bulgusuna göre belirli bir miktar düşüş olduğu gözlenir

(Şekil 10). Daha sonra her bir genleşmiş perlit için Eşitlik 1'de öngörülen yaklaşımla genleşmiş perlit malzemenin agrega formunda çökme değeri (hacim kaybı) " δ_{H} " % biriminde tanımlanır. Bu yaklaşımla elde edilen δ_{H} değerlerinden hangi genleşmiş perlite ait değer diğerinden daha düşük oranda ise (daha az çökme değerine sahipse), tasarlanan harç karışımı için daha ideal bir malzeme seçimi olacağını temsil eder.

$$\delta_{H} = \frac{H_{ref} - H_{i}}{H_{ref}} x 100$$

Burada;

 $\delta_{\rm H}$: Genleşmiş perlit çökme değeri, %

H_{ref} : Referans değer, ml,

Hi :Ölçüm değeri, ml.



Şekil 10. Genleşmiş perlit çökme değeri tayini sembolik gösterimi *Figure 10. Expanded perlite collapse value determination*

Çalışma kapsamında 125-250 μ m, 250-500 μ m ve 500-750 μ m tane boyutlarında üç farklı grupta hazırlanan ham perlitlerin, farklı sıcaklık değerlerinde eşdeğer sürelerle genleştirme işlemi sonrası, yukarıda belirtilen yaklaşımla çökme değerleri analiz edilmiştir. Her bir boyuttaki perlit için elde edilen bulgular grafiksel olarak Şekil 11 – Şekil 13'de verilmiştir.

(1)











Şekil 13. Sıcaklık – çökme oranı ilişkisi (500-750 μm boyut aralığı) *Figure 13. Temperature – collapse rate relationship (500-750 μm size range)*

125 μm–250 μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değer aralığında genleşmesi sonrası agrega malzemenin çökme oranı değerleri %0,77'den %6,15'e yükselmiştir. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin çökme değeri ise %7,69 - %31,54 aralığındadır. 830 °C sıcaklık değeri üzerinde genleştirilen perlitin çökme değeri %38,46'ya kadar artmaktadır. Bu analiz bulgusundan görüleceği üzere, genleştirme sıcaklık değeri arttıkça, genleşen perlit malzemenin matris yapısındaki değişim, gözeneklilikteki artış ve gözenek

boyutlarının değişimi gibi faktörlere bağlı olarak çökme oranı artmaktadır. Bu olgu, sıcaklık artışı ile genleşmiş perlitin agrega olarak mukavemet kaybettiği, yaş harç karışımlarında daha fazla hacim düşüşü oluşturacağı anlamını taşımaktadır. Benzer şekilde, diğer boyutlardan 250 µm–500 µm ve 500 μm–750 μm boyut aralıklarında sınıflanmış ham perlitlerin 200 °C'den 560 °C'lik ilk eşik sıcaklık değer aralığında genleşmesi sonrası agrega malzemenin çökme oranı değerlerindeki değişim sırasıyla %1,54'ten %6,92'e ve %2,31'den %11,54'e yükselmiştir. 560 °C'den 830 °C'lik ikinci eşik sıcaklık değerine kadar genleşmiş perlitin çökme değeri ise 250 μm–500 μm boyut aralığı için %8,46 - %35,38 aralığında, 500 μm-750 μm boyut aralığı için %14,62 - %36,15 aralığında değişmektedir. 830°C sıcaklık değeri üzerinde genleştirilen 250 µm-500 µm boyut aralığındaki perlitin çökme değeri %41,54'e, 500 µm-750 um boyut aralığındaki perlitin çökme değeri ise %45,38'e kadar artmaktadır. Ham perlitin tane boyutu sınıflandırmasının, genleşme sonrası agrega malzemenin çökme değerine doğrudan etkiyen bir faktör olduğu buradan görülmektedir. Tane boyut dağılımındaki maksimum tane iriliği arttıkça, genleşmiş perlit agreganın değişen matris yapısındaki farklılık nedeni ile çökme değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Buna etken bir diğer parametre ise genleşmiş perlitin yığın birim hacim kütle değerinin düşmesinin (agreganın hafiflemesi) de çökme değerine olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu olgu, çalışma kapsamında irdelenen tüm genleşmiş perlit agrega malzemelerin genel bir eğilimi olarak Şekil 14'te analiz edilmiştir.



Figure 14. Bulk density-collapse ratio relationship

Şekil 14 irdelendiğinde görüldüğü üzere genleşmiş perlitin yığın yoğunluğu arttıkça, çökme değeri düşmektedir. Genleşmiş perlit agregalı harç karışımlarında elde edilen taze yaş harcın kıvamı ve uygulamada tüketim miktarının düşük olması, harcın dolayısıyla genleşmiş perlitin çökme oranının düşük olmasına bağlıdır. Bu bağlamda, uygulamada harç için önceden öngörülebilecek bir tüketim miktarının sağlanması amacıyla hangi boyutta ve hangi yoğunlukta genleşmiş perlit agrega kullanımının daha rasyonel olacağı tanımlanmalı ve bu değeri sağlayabilecek agrega malzeme kullanımı son derece önem kazanmaktadır.

3.3. Genleşmiş Perlit Kullanımının Kompozit Harcın Özelliklerine Etkisi (Effect of Expanded Perlite Usage on the Properties of Composite Mortar)

Genleşmiş perlitin çimento esaslı kompozit bir harçta hafif agrega olarak kullanımında, harcın mekanik özelliklerindeki değişim ve sertleşmiş harcın performans değerlerine ne ölçüde etken olduğunu belirlemek üzere bir dizi deneysel inceleme yapılmıştır. Bu analizlerde Çizelge 2'de özellikleri belirtilen 7 farklı sıcaklık değerinde eş sürede (5 dakika) genleştirme işlemi yapılmış perlitler agrega malzeme olarak kullanılmıştır.

Table 2. Properties of the expanded perlite aggregate								
Agrega Kodu	Genleşme Sıcaklığı (°C)	Yığın Birim Hacim Kütle Değeri (kg/m³)	Çökme Değeri (%)					
A1	900	124	40,8					
A2	830	196	35,4					
A3	730	268	31,5					
A 4	760	292	28,5					
A5	730	344	22,3					
A6	530	756	6,2					
A7	410	893	3,9					

Çizelge 2.	Genleşm	iş perlit	agreganın	özellikleri
T 11) D ('	6.11	1 1 1.1	

Farklı sıcaklık değerlerinde genleşmiş ve farklı çökme ve yığın yoğunluk değerlerine sahip bu yedi farklı genleşmiş perlit agregalar, tasarlanan bir kompozit harç karışımında ağırlıkça eşit miktarlarda (ağırlıkça %34,5) kullanılarak kompozit formda harç örnekleri hazırlanmıştır. Harç kombinasyonlarının ağırlıkça karışım oranları ve taze yaş harç formunda bazı teknik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Agrega Kodu	Çimento (%)	Genleşmiş Perlit (%)	Toz Kireç (%)	Kalsit (%)	Vinil asetat- Akrilat esaslı Kıvamlaştırıcı (%)	Su/Katı Oranı	Taze Harç Yoğunluğu (kg/m³)	Yayılma (mm)
A1	33	34,5	7	25	0,5	0,75	637	144
A2	33	34,5	7	25	0,5	0,75	764	155
A3	33	34,5	7	25	0,5	0,75	848	156
A4	33	34,5	7	25	0,5	0,75	862	158
A5	33	34,5	7	25	0,5	0,75	887	160
A6	33	34,5	7	25	0,5	0,75	1055	161
A7	33	34,5	7	25	0,5	0,75	1088	164

Çizelge 3. Genleşmiş perlit agregalı harç karışım kombinasyonları ve yaş harç özellikleri **Table 3.** Mortar mix combinations and fresh mortar properties

Hazırlanan tüm harç karışımlarında ağırlıkça eşit miktarlarda çimento, toz kireç, dolgu materyali ve polimer katkı malzemeleri kullanılmıştır. Dolgu materyali olarak maksimum tane boyutu 500 mikron olan kalsit kullanılmıştır. Harca kıvam vermek ve işlenebilirliğini artırmak amacıyla piyasa koşullarından temin edilen toz formda vinil asetat-akrilat asetat esaslı ve polivinil koruyuculu kıvamlaştırıcı toz katkı kullanılmıştır. Tüm harç karışımlarında su/çimento oranı sabit tutulmuş olup, su/çimento=2,27'dir. Karışım örnekleri PÇ 42,5R çimento ile hazırlanmıştır. Bu karışımlarda hazırlanan tüm harç örnekleri 50x50x50 mm boyutlu kalıplara yerleştirilerek, 24 saat sonrasında kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca bünye nemini kaybetmeyecek bir ortamda TS EN 998-1 [14] standardının öngördüğü prensiplere göre kürleme işlemine tabi tutulmuştur. 28 gün kür sonrasında havalandırmalı bir etüv ortamında değişmek kütle değerine ulaşıncaya kadar 70±10°C'lik bir etüvde kurulmuş ve sonrasında mekanik testleri yapılmıştır. Genleşmiş perlit agregalı kompozit harç örnekleri İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri Laboratuvarında hazırlanarak, TS EN 998-1 standardı ve bu standartta öngörülen diğer TS EN normu standartlarına göre testler yapılmıştır.

Taze harç kıvamı olarak elde edilen yayılma değerleri irdelendiğinde, perlit agreganın genleştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmektedir [15-16]. Ağırlıkça eş değer miktarlarda genleşmiş perlit ve diğer karışım bileşenleri de eşit miktarlarda kullanılmış olmasına rağmen, yayılma değerinde düşmenin oluşması harcın işlenebilirlik değerinin azaldığını temsil etmektedir. Harcın işlenebilirliğini artırmak ve/veya iyileştirmek için perlitin genleştirme sıcaklık değerinin düşük sıcaklık değerlerinde olması daha

arzu edilir bir durumu göstermektedir. Bu olgunun bir diğer göstergesi olarak da benzer eğilimin taze yaş formunun yoğunluğu olarak da incelenebilir. Perlitin genleşme sıcaklığı azaldıkça artan agrega yığın yoğunluğu ve azalan gözeneklilik olgusu sebebiyle yaş harcın yoğunluğu da artmaktadır. Harcın yoğunluğunun artması eşdeğer bir karışım kombinasyonunda harç kıvamını iyileştirme ve daha işlenebilir hale getirmektedir.

Genleşmiş perlit agregalı harç karışımlarının sertleşmiş harç formunda kuru birim hacim kütle değerlerinin analizi, harç karışımında kullanılan perlitin genleştirilme sıcaklık değerine bağlı değişimi grafiksel olarak Şekil 15'de verilmiştir.



Şekil 15. Perlit genleştirme sıcaklığı-birim hacim kütle ilişkisi *Figure 15. Perlite expansion temperature-unit weight relationship*

Ham perlitin genleştirme sıcaklık değeri arttıkça, bu sıcaklık değerinde eşdeğer sürede genleşmiş perlit agregalı sertleşmiş harç örneklerinin kuru birim hacim kütle değerleri azalmaktadır. Diğer bir değişle sertleşmiş harç hafiflemektedir. Buna temel etken sebep, genleşmiş perlitin agrega olarak tane yoğunluğunun düşmesi ve gözeneklilik oranının artmasıdır. Bu analiz bulgusu irdelendiğinde, örneğin 500 kg/m3 yoğunlukta bir sertleşmiş harç elde etmek için bu karışım bileşenleri bağlamında 880 °C sıcaklıkta genleştirilmiş bir perlit malzemenin karışımda agrega olarak kullanılması gerektiği görülmektedir. Benzer şekilde, 650 kg/m³ yoğunlukta daha yüksek bir sertleşmiş harç elde etmek için ise yaklaşık 790 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit malzemenin kullanımının uygun olacağı, 800 kg/m3 yoğunluk için ise yaklaşık 650 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit malzemenin kullanımının daha uygun olacağı görülmektedir. Karışımlarda hedeflenen sertleşmiş harç yoğunluğu için karışımda kullanılacak genleşmiş perlitin agrega olarak genleştirme işlemindeki sıcaklığının önceden belirlenmesi önem kazanmaktadır. Çoğu ArGe çalışmalarında sertleşmiş harcın yoğunluğu, karışımlarda kullanılan genleşmiş perlitin miktarı ile ayarlanması yönünde projelendirildikleri sıklıkla görülmektedir. Bunun yerine perlit agrega miktarının ayarlanmasından ziyade, perlitin genleştirme sıcaklığına dikkat çekilerek yapılacak projelendirmeler daha efektif sonuçlar verecektir. Bununla birlikte, yukarıdaki bölümlerde de değinildiği gibi agrega yığın yoğunluğunda düşme eğilimi genleşmiş perlitlerin çökme oranını artırmakta, ancak taze harcın yoğunluğundaki azalma miktarının yüksek oluşu ve yaş harcın hacim kaybetmesine rağmen daha düşük yoğunluk değerleri elde edilebilmektedir. Bu değişim, aynı zamanda sertleşmiş harcın mukavemet açısından zayıflayacağını da temsil edebilmektedir.

Sertleşmiş harç örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri, genleşmiş perlit agreganın çökme oranının ve birim hacim ağırlık değerinin bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedir. Bu olgu, sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17'de analiz edilmiştir.



Şekil 16. Genleşmiş perlit çökme oranı-basınç dayanımı ilişkisi *Figure 16. Expanded perlite collapse rate-compressive strength relationship*

Genleşmiş perlit agreganın çökme değeri arttıkça, bu perlit karışımlı harcın basınç dayanımı da azalmaktadır. Agreganın çökme oranı yığın yoğunluğunun ve genleştirilme sıcaklığının birer fonksiyonu olarak değişim göstermesi, agregadaki artan gözenekliliğe bağlı harcın basınç dayanımının düsmesine neden olmaktadır. Ancak, sertlesmis harcın kullanım yerine uygunluğu açısından öngörülen basınç dayanımları farklı kategorik değerler ile sınırlandırılabilmektedir. Orneğin, TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harç dayanım basınç değerleri CS I, CS II ve CS III gibi kategorilerde sınıflandırılmıştır [14]. Bu standarda göre CS II dayanım sınıfında yer alacak bir sertleşmiş harcın basınç dayanımı en az 2,5 N/mm² olması öngörülmüştür. Genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında bu dayanım değerini sağlayabilmesi için ortalama %10 çökme oranı değerine sahip bir malzemenin kullanılması gerekliliği açıkça görülmektedir. Bu oran değeri de yaklaşık 570 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit agrega ile sağlanabileceği bu çalışmada gözlenmiştir. Diğer taraftan daha düşük mukavemet değeri sergileyen CS I sınıfı dayanım değerine sahip bir sertleşmiş harcın basınç dayanımı en az 1,5 N/mm² olması öngörülmüştür. Genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında bu dayanım değerini sağlayabilmesi için ortalama %36 çökme oranı değerine sahip bir malzemenin kullanılması gerekliliği ve bu oran değerinin de yaklaşık 760 °C sıcaklıkta genleştirilmiş perlit agrega ile sağlanabileceği belirlenmiştir. Bu analiz bulguları göstermektedir ki, eşdeğer miktarda agrega kullanılmasına rağmen genellikle düşük genleştirme sıcaklık değerlerine sahip perlit agregalı harçlar daha yüksek basınç dayanım değerlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu analiz bölümündeki bulgulara göre, endüstrivel uvgulamalara ışık tutmak acısından CS I dayanım sınıfında bir harç elde etmek için kullanılacak genleşmiş perlitin maksimum çökme oranı yaklaşık %35 ile sınırlandırılabileceği ve CS II dayanım sınıfı için ise maksimum çökme oranı yaklaşık %10 ile sınırlandırılabileceği öngörülebilir.



Şekil 17. Birim hacim ağırlık-basınç dayanımı ilişkisi *Figure 17.* Unit volüme weight-compressive strenght relationship

Genleşmiş perlit agregalı harçların birim hacim ağırlık değerleri arttıkça, harçların basınç dayanım değerleri de artmaktadır. Harcın üretiminde kullanılan perlit agreganın genleştirme sıcaklığına bağlı olarak gözenek oranının artması ile harcın birim hacim ağırlığı düşmekte, bununla paralel olarak harcın basınç dayanımı azalmaktadır. Ancak, TS EN 998-1 standardının öngördüğü CSI ve CSII dayanım sınıflandırmasına uygun harç örneklerinin üretilebileceği Şekil 17'den de tespit edilebilmektedir.

Perlit agreganın artan genleştirme sıcaklığı, genleşmiş agreganın gözenekliliğinin artmasına neden olduğu kadar, bu agregalı karışımlara ait sertleşmiş harcın da görünür gözeneklilik oranının artmasını sağlamaktadır. Bu eğilim grafiksel olarak Şekil 18'de analiz edilmiştir.



Şekil 18. Perlit genleştirme sıcaklığı-görünür gözeneklilik ilişkisi Figure 18. Perlite expansion temperature-apparent porosity relationship

410 °C sıcaklık ile 900 °C sıcaklık aralığında genleştirme işlemi yapılmış perlit agregalı sertleşmiş harçların görünür gözeneklilik oranı %13,4 - %42,4 aralığında değişmektedir. Agrega genleştirme sıcaklığı arttıkça, görünür gözeneklilik de anlamlılık düzeyi yüksek seviyede lineer üstel bir fonksiyon olarak artmaktadır. Bu analiz bulgusu göstermektedir ki; yüksek gözeneklilik arzu edilen harç matrislerinin elde edilmesi için yüksek sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi yapılmış perlit agregalara gereksinim duyulmaktadır. Bu tür matris yapılar binalarda çoğunlukla yalıtıma katkı sağlamak amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedir. Ancak, bu matris yapılara sahip sertleşmiş harçların yukarıda da değinildiği üzere dayanımları düşük olabilmektedir. Diğer taraftan, daha yüksek mukavemet sağlayan harç kombinasyonları için ise düşük sıcaklık değerlerinde genleştirilmiş ve düşük görünür gözeneklilik matrisini sağlayan perlit agregalara gereksinim duyulmaktadır. Sertleşmiş harcın görünür gözeneklilik olgusunun yüksek oluşu, aynı zamanda bu harcın ısıl iletkenlik değerinin de düşük değerlerde olabileceğini temsil edebilmektedir. Çalışma kapsamında bu bağlamda yapılan bir seri irdelemelerde Şekil 19'de grafiksel olarak verilen bulgular elde edilmiştir.

Test örneklerinin ısıl iletkenlik değeri ölçümleri için laboratuvar ölçekli Sıcak Kutu (Hot Box) yöntemi kullanılmıştır. Sıcak Kutu yönteminde test örneği, opsiyonel olarak 0°C ile +55°C arasında değişen sıcaklık ortamları için ısıl iletkenlik ölçümü yapılabilmektedir. Ölçüm sırasında, örneğin her bir yüzeyindeki ısı değeri, yüzeyde bir karelaj oluşturacak şekilde en az 9'ar noktadan ölçülmüştür. Isıl iletkenlik ünitesi, ısı kutusu (sıcak oda) olarak adlandırılan bölümde, bir elektrikli ısıtıcı, numunenin yerleştirildiği bölüm ve soğuk odadan oluşmaktadır. Soğuk ve sıcak odanın her ikisinde de yer alan ısı sensörleri, zarar görmeden örnek yüzeyine tam olarak temas ettirilerek örnek yüzey sıcaklık değerleri 0.1°C hassasiyetle ölçülmüştür. Verilen ısının kontrolü, sürekli değişebilen (20-400 watt) akım ile sağlanabilmekte ve test cihazı, ısı geçişinin üç boyutlu olması nedeniyle, hatalar minimize edilerek tasarımlandırılmıştır. Sıcaklık verilerini kaydetmeden önce, numunenin kararlı duruma gelmesi sağlanmış olup, kararlı duruma ulaştıktan sonra veri kaydına başlanmıştır. Düzenek içine yerleştirilmiş test numunesinin her iki yüzeyinde istenen sıcaklık farkı ısıtıcıya uygulanan elektriksel güç (Q_T, Watt) vasıtayla sağlanmış ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ölçüm değerlerinden ortalama değer olarak (Δ T, °C) belirlenmiştir. Test örneğinin ısıl iletkenlik değeri yalın bir şekilde (λ , W/mK), aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\lambda = \frac{Q_T \times d}{A \times \Delta T}$$

Burada;

 λ = Test örneğinin ısıl iletkenlik değeri, (W/mK),

Q_T = Isıtıcıya uygulanan elektriksel güç, (Watt),

d = Numune kalınlığı, (m),

A = Isıtma bölümünde ısıtılan alan, (m^2) ,

 $\Delta T = Y$ üzeyler arasındaki sıcaklık farkı, (°C),



Şekil 19. Perlit genleştirme sıcaklığı-ısıl iletkenlik değeri ilişkisi *Figure 19.* Perlite expansion temperature-thermal conductivity value relationship

Perlit agreganın genleştirme sıcaklığı arttıkça bu perlit karışımlı harcın ısıl iletkenlik değeri de düşmektedir. Diğer bir değişle temsili olarak daha ısı yalıtımlı bir form kazanmaktadır. TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harçlar, yoğunluk değerlerinim bir fonksiyonu olarak sağladıkları ısıl iletkenlik (λ) değerlerine göre yalıtıma katkı saplamak amaçlı yapı bileşenleri olarak kullanımlarını da gündeme getirmektedir. Bu bağlamda, TS EN 998-1 standardında sertleşmiş harç ısıl iletkenlik değerleri T1 ve T2 olarak iki ayrı grupta sınıflandırılmıştır. T1 sınıfı harçlar için öngörülen ısıl iletkenlik değeri λ <0,20 W/mK koşulunu sağlaması, T2 sınıfı harçlar için ise öngörülen ısıl iletkenlik değeri λ <0,20 W/mK

koşulunu sağlaması gerekmektedir. T1 sınıfında yer alabilecek genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 850 °C'lik sıcaklık değerinde genleştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiğini göstermektedir. Bu aynı zamanda harcın binalarda ısı yalıtımına katkı sağlayabilecek özellik taşıyacağını da vurgulamaktadır. Diğer taraftan T2 sınıfında yer alabilecek genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için ise harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 520 °C'lik sıcaklık değerinde genleştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiğini göstermektedir. Isı yalıtımına katkı sağlamak amaçlı tasarlanan harç karışımlarında yüksek sıcaklıkta genleştirilmiş perlitlerin agrega olarak kullanımının alternatif malzemelere göre daha önem kazandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışma kapsamında, ham perlitin eşdeğer bir sürede farklı sıcaklık değerlerinde genleştirme işlemi sonrası oluşan genleşmiş agrega formlarının değişimi analiz edilmiş olup, genleşmiş perlitin yapısal karakteristiğine etkiyen faktörler incelenmiştir. Özellikle genleştirme işlemi sonrası perlit agreganın mukavemetini, kırılganlığını ve ufalanma olgusunu temsili olarak tanımlayabilmek amacıyla yeni bir yöntem öngörülmüştür. Ayrıca, bu yönteme göre belirlenmiş ve farklı karakteristik yapıya sahip genleştirilmiş perlit agregalı çimento esaslı kompozit harç örneklerinin teknik performans değerleri de irdelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre:

- 1. Bu çalışmada 560 °C ve 830 °C eşik sıcaklık değerleri olarak tanımlanmıştır.
- 200 °C–1040 °C sıcaklık aralığında ham perlit örnekleri için elde edilen genleşme oranları her bir boyut aralığı için sırasıyla; 125-250 μm tane boyutlu ham perlit için %0,7 - %202, 250-500 μm tane boyutlu ham perlit için %0,8 - %236 ve 500-750 μm tane boyutlu ham perlit için %0,9 -%247'dir.
- 830 °C'nin üzerinde genleşmiş perlitin daha kırılgan, kolay ufalanabilen bir özellik kazandığı görülmüştür. Perlitin birim hacim kütlesinde en fazla değişimin ikinci eşik sıcaklık değerinde oluştuğu görülmüştür.
- 4. Ham perlitin tane boyutu arttığında artan genleşme miktarının bir fonksiyonu olarak daha hafif perlit agrega elde edilebilmektedir.
- 5. 125 μm–250 μm boyut aralığında sınıflanmış ham perlitin genleştirilmesi sonucu elde edilen genleşmiş perlit agreganın çökme değeri %38,46'ya kadar, 250 μm–500 μm ve 500 μm–750 μm boyut aralıklarında ise bu değer %41,54 ve %45,38'e kadar artmaktadır. Genleşmiş perlitin yığın yoğunluğu arttıkça, çökme değeri düşmektedir.
- 6. Genleşmiş perlit agrega ile üretilen harç örneklerinde, perlit agreganın genleştirme sıcaklık değeri arttıkça agreganın artan çökme değeri ve azalan yığın yoğunluğu sebebiyle yayılma değerlerinin azaldığı görülmektedir.
- 7. Ham perlitin genleştirme sıcaklık değeri arttıkça sertleşmiş harç hafiflemektedir.
- 8. Çökme oranındaki artışın basınç dayanımını azaltan bir faktör olduğu tespit edilmiştir. TS EN 998-1'e göre CS I dayanım sınıfında bir harç elde etmek için kullanılacak genleşmiş perlitin maksimum çökme oranı yaklaşık %35 ile sınırlandırılabileceği ve CS II dayanım sınıfı için ise maksimum çökme oranı yaklaşık %10 ile sınırlandırılabileceği öngörülebilir.
- 9. Agrega genleştirme sıcaklığı arttıkça, harcın görünür gözeneklilik seviyesi de artmaktadır.
- 10. Perlit agreganın genleştirme sıcaklığı arttıkça, bu perlit karışımlı harçların ısıl iletkenlik değerleri azalmaktadır. TS EN 998-1'e göre T1 sınıfında yer alabilecek genleştirilmiş perlit agregalı bir kompozit harcın bu çalışmada uygulanan karışım bileşenleri bağlamında öngörülen λ değerini sağlayabilmesi için harçta kullanılacak perlit agreganın minimum 850 °C'lik sıcaklık değerinde genleştirme işlemine tabi tutulmuş olması gerektiği tespit edilmiştir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Makale etik kurallara uygundur.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Lütfullah GÜNDÜZ: Özgün Taslak Hazırlama, Gözden Geçirme ve Düzenleme, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Doğrulama, İnceleme, Kaynaklar.

Şevket Onur KALKAN: Gözden Geçirme ve Düzenleme, Kavramsallaştırma, Görselleştirme, İnceleme, Deneysel Çalışma.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar, bu makalede bildirilen çalışmayı etkiliyor gibi görünebilecek bilinen hiçbir finansal çıkarları veya kişisel ilişkileri olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] O. Gencel, O. Y. Bayraktar, G. Kaplan, O. Arslan, M. Nodehi, A. Benli, A. Gholampour, and T. Ozbakkaloglu, "Lightweight foam concrete containing expanded perlite and glass sand: Physico-mechanical, durability, and insulation properties," *Construction and Building Materials*, vol. 320, 126187, 2022.
- [2] M. Samar, S. Saxena, 2016, "Study of chemical and physical properties of perlite and its application in India," *International Journal of Science Technology and Management*, vol. 5, no. 04, pp. 70-80, 2016
- [3] United States Geological Survey, "USGS Mineral Commodity Summaries, Perlite," *United States Geological Survey*, 2023. [Online]. Available: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-perlite.pdf. [Accessed: Feb. 17, 2023].
- [4] L. D. Maxim, R. Niebo, and E. E. McConnell, "Perlite toxicology and epidemiology—A review," *Inhalation Toxicology*, vol. 26, no. 5, pp. 259-270, 2014.
- [5] M. Ibrahim, A. Ahmad, M. S. Barry, L. M. Alhems, and A. C. Mohamed Suhoothi, "Durability of structural lightweight concrete containing expanded perlite aggregate," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 1-15, 2020.
- [6] O. Şengül, S. Azizi, F. Karaosmanoglu, and M. A. Tasdemir, "Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 671-676, 2011.
- [7] Perlite Institute, 2022. [Online]. Available: https://www.perlite.org/perlite-online/. [Accessed: Feb. 17, 2023].
- [8] L. H. Yu, L. Ou, and L. L. Lee, "Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 1 pp. 73-76, 2003.
- [9] T. K. Erdem, Ç. Meral, M. Tokyay, and T. Y. Erdoğan, "Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 1, pp. 13-21, 2007.
- [10] C. Panagiotopoulou, P. M. Angelopoulos, D. Kosmidi, I. Angelou, L. Sakellariou, and M. Taxiarchou, "Study of the influence of the addition of closed-structure expanded perlite microspheres on the density and compressive strength of cement pastes," *Materials Today: Proceedings*, vol. 54, no. 1, pp. 118-124, 2022.
- [11] O. Orhun, "Perlit," *Bilimsel Madencilik Dergisi*, Cilt 8, Sayı 4, s213-222, 1969.
- [12] İ. Özgenç, "Perlitler içindeki suyun kimyasal yapısı ve bu yapının genleşme özelliğine etkisi," *Jeoloji Mühendisliği*, s.42, 60-63, 1993.
- [13] N. Şapçı, and H. Ceylan, "Perlit Agregalarının Farklı Sıcaklıklarda Genleştirilmesi Üzerine Teknik Bir Analiz," *Teknik Bilimleri Dergisi*, Cilt 11, Sayı 2, 32-40, 2021.

- [14] TS EN 998-1, Kâgir harcı Özellikler Bölüm 1: Kaba ve ince sıva harcı Ankara, TSE, 2006.
- [15] ASTM C230/C230M-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, USA, 2014.
- [16] TS EN 1015-3, Kagir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle) Ankara, TSE, 2000.



KÖPRÜ AYAK TİPİ VE VEREVLİĞİNİN SU YÜZÜ PROFİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

¹Kutsi Savaş ERDURAN^(D),²'Uğur ÜNAL^(D),³Ahmet Şakir DOKUZ^(D),⁴Mustafa Çağrı NAS^(D)

^{1,2}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE ³Niğde Ömer Halidemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE ⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, TÜRKİYE ¹kserduran@ohu.edu.tr, ²ugurunal@ohu.edu.tr, ³adokuz@ohu.edu.tr, ⁴mcgr072@gmail.com

Önemli Katkılar (Highlights)

- Farklı enkesitlerdeki köprü ayağı tipleri ve verevlik açıları için deneysel ölçümler ve sayısal modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar uyumludur.
- Köprü ayaklarından dolayı köprü membaında oluşan kabarma miktarları genel olarak verevlik açısının artışı ile artmıştır.
- Görüntü işleme tekniği gerek köprü membaında tedrici değişken akım bölgesinde ve gerekse mansapta oluşan ani değişken akım bölgesinde ölçüm sonuçlarına uyumlu ve yakın değerler vermiştir.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)





KÖPRÜ AYAK TİPİ VE VEREVLİĞİNİN SU YÜZÜ PROFİLLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

¹Kutsi Savaş ERDURAN^(D),²^{*}Uğur ÜNAL^(D),³Ahmet Şakir DOKUZ^(D),⁴Mustafa Çağrı NAS^(D)

^{1,2}Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE ³Niğde Ömer Halidemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE ⁴Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, TÜRKİYE ¹kserduran@ohu.edu.tr, ²*ugurunal@ohu.edu.tr, ³adokuz@ohu.edu.tr, 4mcgr072@gmail.com

(Geliş/Received: 05.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ÖZ: Köprülerin yapısal güvenliği açısından oldukça önemli olan köprü ayaklarının tasarımının, hidrolik açıdan da analizi gerekmektedir. Köprü ayakları, akım alanını daraltarak köprü membaında kabarmalara ve beraberinde taşkınlara neden olabilmektedir. Dolayısıyla farklı akım koşullarında köprü ayaklarının etkisi altında oluşan su yüzü profillerinin ve kabarma miktarlarının deneysel ve sayısal çalışmalar ışığı altında en doğru şekilde belirlenmesi köprü hidrolik tasarımının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu çalışmada, farklı enkesitlerdeki köprü ayaklarının ve verevlik açısının köprü etrafında oluşan su yüzü profili ve köprü membaındaki kabarma miktarı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan ve boyutları 10x0.309x0.45 m olan deneysel kanal üzerinde yürütülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda 4 farklı köprü ayağı tipi (kare, dairesel, kenarları yuvarlatılmış ve memba yüzü keskin kenarlı) ve 4 farklı verevlik açısı (0º, 15º, 30º ve 45º) kullanılarak kanalda akım ölçümleri yapılmış ve ayrıca her bir deneye ait video kayıtları alınarak elde edilen görüntüler görüntü işleme tekniği yardımıyla sayısal verilere dönüştürülmüştür. Deneysel çalışmaların yanı sıra HEC-RAS yazılımı ve direk adım metodu kullanılarak sayısal modelleme çalışmaları da yapılmış, su yüzü profilleri ve kabarma miktarları karşılaştırma amaçlı elde edilmiştir. Elde olunan sayısal sonuçlar karşılaştırılmış, benzer problemlerde HEC-RAS yazılımın kullanılabilirliği ile görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliği ile ilgili çıkarımlara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kabarma, Köprü Ayağı Tipi, Verevlik Açısı, Görüntü İşleme Tekniği, Su Yüzü Profilleri

Experimental and Numerical Investigation of the Effect on the Water Surface Profiles of Bridge Pier Type and Skew Angle

ABSTRACT: Design of bridge piers is so much important for the structural safety of bridges, however, at least at the same extent, hydraulic analysis of bridge piers is also required. Bridge piers are structures that obstruct the flow by narrowing the flow area and can cause flooding in the bridge upstream. Therefore, with the light of numerical and experimental studies, accurate estimations of the occurrence of water surface profiles and affluxes resulted from the construction of bridge piers under different flow conditions are the major part of bridge hydraulics. In this study, the effects of bridge piers with four different cross-sections and four different skew angles on the water surface profiles and the affluxes were experimentally and numerically investigated. The experimental study has been conducted in a flume with dimensions of 10x0.309x0.45m in Department of Civil Engineering Hydraulics Laboratory at Niğde Ömer Halisdemir University. The experimental measurements were taken using 4 different shapes of bridge piers (square, circular, oblong and ogival upstream face) and 4 different skew angles (0⁰, 15⁰, 30⁰ and 45⁰), and the images obtained from video recordings of each experiment were converted into numerical values using an image processing technique. In addition, commercial package program HEC-RAS software and a direct step

method were also used for the numerical modelling and the numerical water surface profiles and affluxes were also obtained for the purpose of comparisons. In the conclusion part, the comments on the applicability of HEC-RAS software and the suitability of the image processing technique were given for the similar problems.

Keywords: Afflux, Bridge Pier Type, Bridge Position Angle, Image Processing Technique, Water Surface Profiles

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Köprüler; nehir veya vadi gibi yeryüzünün iki yakasını birbirinden ayıran engellerin kolaylıkla geçilmesini sağlayan ve genellikle akarsular, denizler veya karayolları üzerine inşa edilen önemli sanat yapılarıdır. Bu yapılar inşa edilirken hidrolik ve yapısal etkilerin bir bütün olarak değerlendirilmesi ve buna uygun olarak gerekli tasarımın yapılması gerekmektedir [1]. Oysaki geçmişten günümüze kadar hasar gören veya yıkılan köprüler incelendiğinde yapısal endişeler düşünülerek hidrolik açıdan analizler ikinci plana atılmış ve bunun sonucunda köprü yıkılmaları veya ciddi hasarlar meydana gelmiştir [2]. Yıkılmanın nedenleri araştırıldığında çoğunlukla, köprü ayak kesitlerinin gereğinden fazla büyük tasarlanması sonucu köprü ayakları arasındaki açıklığın azalması ve buna bağlı olarak oluşan kabarmalar ve oyulmalar gibi hidrolik etkiler ilk sırada gelmektedir [3-4]. Diğer yıkılma nedenleri incelendiğinde ise köprü ayağına olan çarpmalar, aşırı yükleme ve yangın kaynaklı olduğu görülmektedir [3, 5-6].

Akarsu üzerine inşa edilen köprülerin yapısal tasarımlarında yaygın olarak köprü açıklığı boyunca ayaklar kullanılmaktadır. Akım alanının bir kısmını kapatan köprü ayakları etrafındaki akımın incelenmesi bir hayli karmaşık bir olaydır [7]. Ayakların akım alanını daraltması sonucu ayaklar arasındaki açıklıkta ani değişen akım koşulları oluşmakta ve köprü membaında açıklığın azalmasından dolayı su yüzünde kabarmalar meydana gelmektedir [8]. Bu kabarmaların en iyi şekilde tayin edilmesi köprü membaında bulunan tarım arazilerinin, meskun yerlerin ve diğer değerli ve stratejik öneme sahip alanların korunmasını sağlayacaktır. Bunun için su yüzü profillerinin doğru şekilde tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Çünkü bu profiller hidrolik yapıların planlanması, tasarımı ve yönetiminde gerekli olan verilerin sağlanması hususunda bizlere yardımcı olmaktadır [9].

Günümüzde su yüzü profillerinin hesaplanmasında çeşitli deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları kullanılmaktadır [10-11]. Bu çalışmalarda çoğunlukla köprü inşaat aşamasından önce, köprüler etrafında oluşması muhtemel akım karakteristiklerini gösterir farklı senaryolar üretilir. Bu şekilde elde edilen ön bilgiler yardımıyla köprü yıkılmaları veya hasarlarının önüne geçilmesi veya en azından olumsuz etkilerinin minimuma indirgenmesi amaçlanır.

Bu çalışmada kare, dairesel, kenarları yuvarlatılmış ve memba yüzü keskin kenarlı olmak üzere dört farklı köprü ayağı tipi ve 0[°], 15[°], 30[°] ve 45[°] 'lik dört farklı verevlik açısının köprü etrafında oluşan su yüzü profili ve köprü membaındaki kabarma miktarı üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan deneysel kanal kullanılmıştır. Sayısal modelleme çalışmaları Hdrological Engineering Centers - River Analysis System (HEC-RAS) programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fiziksel deneylerde kullanılan aletsel akım ölçümlerine alternatif olarak, akıma müdahale etmeden akıma ait sayısal bilgilerinin elde edilmesini sağlayan görüntü işleme tekniği kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, çalışmada kullanılan deneysel kanal, köprü ayak tipleri, limnimetre ölçüm aleti ve görüntü işleme tekniği ile sayısal modelleme çalışmaları anlatılmıştır.

2.1. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Köprü ayak tiplerinin su yüzü profilleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında bulunan deneysel kanal kullanılmıştır. Bu kanal 10 m uzunluğunda, 0,309 m genişliğinde ve 0,45 m derinliğinde olup dikdörtgen en kesitlidir (Şekil 1). Kanal, kontrol panosundan ayarlanabilen farklı eğimlerde (-%0,5 ile %2,5 aralığında değişen eğimler) ve debilerde (0 m³/sa ile 100 m³/sa aralığında) çalışabilmektedir. Bunun yanı sıra derinlik, hız ve basınç ölçümleri için limnimetre, hız ölçer ve basınç ölçüm sensörleri bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Deneysel kanal *Figure 1. Experimental flume*



Şekil 2. Kullanılan akım ölçüm aletleri a) hız ölçer b) limnimetre c) basınç ölçüm sensörü *Figure 2.* Used measuring instruments a) velocimetry b) limnimeter c) pressure measurement sensor

Deneysel çalışmalarda nehir rejimi oluşturacak şekilde kanal taban eğimi %0,2 ve akım debisi 50 m³/sa olarak sabit tutulmuştur. Kullanılan köprü ayak tipleri Şekil 3'te gösterilmiş, boyutları ise Çizelge 1'de verilmiştir. Akım derinlikleri, köprü ayağı yakınlarında 5 cm aralıklarla, köprüden uzakta ise 10 cm aralıklarla limnimetre yardımıyla ölçülmüştür. Köprü ayakları kanal membaından itibaren 5,65 m uzağa yerleştirilmiş ve ayaklara dört farklı verevlik açısı verilmiştir (Şekil 4). Her farklı durum için deneyler üçer defa tekrarlanmıştır. Limnimetre ölçümlerinin yanı sıra görüntü işleme tekniği kullanılarak da akım derinlikleri elde edilmiştir. Bunun için saniyede 30 çerçeve (30 fps) yakalama özelliğine sahip 1280x720p çözünürlüklü iki adet telefon kamerası ile deneysel çalışmalar kayıt altına alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda görüntü işleme tekniğinin uygulanabilirliğini kolaylaştırmak için suya kırmızı renkli gıda boyası eklenerek renklendirilmiş ve kanalın arka duvarı beyaz renkli kağıtlar ile kapatılmıştır (Şekil 4). Bu şekilde su-hava ara kesiti belirginleştirilmiş ve kırmızı renkli suyun takibi görüntü işleme tekniği ile daha kolay bir şekilde yapılabilmiştir.



Şekil 3. Köprü ayak tipleri *Figure 3. Types of bridge piers*



Şekil 4. Görüntü işleme tekniğine uygun koşullar ve farklı verevlik açılarında yerleştirilmiş örnek bir köprü ayağı a) 0° b) 15° c) 30° d) 45°

Figure 4. Provided suitable conditions for the application of the image processing technique and an example of a bridge pier with four different skew angels a) 0° b) 15° c) 30° d) 45°

Table 1. Bridge pier types and dimensions							
Köprü Ayağı Tipi	Genişlik (cm)	Uzunluk (cm)	Çap (cm)				
Kare	4	4	-				
Dairesel	-	-	4				
Kenarları Yuvarlatılmış	4	8	-				
Memba Yüzü Keskin Kenarlı	4	8	-				

Çizelge 1. Köprü ayak tipleri ve boyutları

2.2. Limnimetre ile Ölçüm (Measurement for Limnimeter)

Akım derinlikleri ilk olarak deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan limnimetre ile ölçülmüştür (Şekil 5). Bu cihaz kanal boyunca hareket ettirilebilmekte ve istenilen noktadan ölçüm alınmasını sağlamaktadır. İstenilen noktadaki akım derinliği, limnimetrenin ucunda bulunan iğnenin su yüzeyine temasının sağlandığı anda limnimetre üzerinde bulunan metre üzerinden okuma yapılmasıyla ölçülmektedir.



Şekil 5. Limnimetre Figure 5. Limnimeter

2.3. Görüntü İşleme Tekniği (Image Processing Technique)

Laboratuvar ortamında akım özellikleri belirlenirken akıma müdahale eden veya etmeyen olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Akıma müdahale eden yöntemler akım alanının içine batırılan ve genellikle elektrik iletkenliğine dayalı olarak ölçüm yapan metal çubuklar (dalga probları gibi) veya ölçüm sensörlerinden oluşmaktadır. Akıma müdahale etmeyen yöntemler ise ultrasonik sensörler, akım alanını lazerlerle tarama, parçacık izleme ve görüntü işleme tekniklerini kapsamaktadır. Bu sensör ve teknikler akım alanına hiçbir şekilde müdahale etmediğinden ölçüm sonuçları daha güvenilir olmaktadır. Çalışmada, limnimetre kullanımının yanı sıra su derinlikleri akıma müdahale etmeksizin görüntü işleme tekniği yardımıyla da belirlenmiştir.

Kanal boyunca tek boyutlu akım durumu göz önüne alınarak uygulanan görüntü işleme tekniği algoritması şu şekilde çalışmaktadır. Öncelikle kanalın yan duvarları üzerinde 0. ve 42. santimetrelere yeşil şeritli işaretleyiciler yapıştırılmıştır (Şekil 6). Bu şeritler, renk filtresi kullanarak kanal boyunca su yüzü profilini oluşturan su derinliklerinin sayısal değerlerini daha doğru bir şekilde elde etmek amacıyla yerleştirilmiştir (Şekil 7). Benzer şekilde kanal boyunca su yüzünün daha net bir şekilde tanımlanabilmesi için su kırmızı renkte gıda boyası ile renklendirilmiş ve kırmızı renk filtresi kullanılarak su yüzü ayrıklaştırılmıştır. Şekil 8'de verilen görsel deney kanalınınım sağ ve sol tarafına yerleştirilen kameralardan elde olunan görüntülerin birleştirilmesi ve kırmızı renk filtresi ile filtrelenmesi sonucu elde olunmuştur. Şekil 8'de kanal boyunca kanaldaki suyu gösterir kırmızı renkli görüntülerdeki kesiklikler kanalın yan duvarlarını destekleyen dikmelerden dolayı oluşmuştur.

Bu çalışmada 1 boyutlu akım analizlerinde kullanılan görüntü işleme tekniğinin algoritması kısaca aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır.

Adım 1: Köprü ayağı tipi ve verev açısına ait deneyin video görüntüsü çerçevelere ayrılarak her bir çerçeve için Adım 2-Adım 5 işletilir.

Adım 2: Kanal içerisinde 0. ve 42. cm yüksekliklere yerleştirilen yeşil şeritler yeşil renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve her sütun için bir pikselin cm türünden karşılığı hesaplanır.

Adım 3: Kırmızı gıda boyasıyla renklendirilmiş olan su kırmızı renk filtresi aracılığıyla tespit edilir ve ilgili çerçevede suyun bulunduğu tüm sütunlardaki en yüksek değerleri belirlenir.

Adım 4: Belirlenen su yüksekliğinin cm türünden karşılığı hesaplanır.

Adım 5: İlgili çerçeveye ait sonuçlar bir metin dosyasına kaydedilir.



Şekil 6. Yeşil şerit uygulaması *Figure 6. Application of green tapes*



Şekil 7. Yeşil şeritli işaretleyicilerin yeşil renk filtresi ile tespit edilmesi *Figure 7. Detection of green tapes using a green filter*



Figure 8. Detection of the water surface profile using a red filter

2.4. Sayısal Modelleme (Numeric Modelling)

Günümüzde teknolojiye olan erişimin artması ve teknolojinin hızla gelişimi sayesinde hidrolik mühendisliğindeki pek çok karmaşık akım problemi hızlı ve kolay bir şekilde sayısal modeller ile çözülebilmektedir. Bu sayısal modeller, problemleri pek çok farklı açıdan inceleme ve problemlere ait detaylı bilgi elde etme imkânı da sağlamaktadırlar. Ancak sayısal model çıktılarının güvenilirliğinin deneysel çalışmalar ile desteklenmesi gerekir.

Bu çalışmada köprü ayak tiplerinin akım üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çıktılar, laboratuvar ortamına benzer koşulların oluşturulduğu hesap alanının ticari bir paket program olan HEC-RAS yazılımı ile modellenmesi ile elde olunan çıktılar ile karşılaştırılmıştır. HEC-RAS programı, çeşitli hidrolik yapıları da içeren kararlı ve kararsız akım problemlerinin çözümünde ve sediment ve su kalitesi analizlerinde kullanılmaktadır [12]. Program köprü yapılarının hidrolik açıdan analizinde enerji denklemi (standart adım), momentum prensibi, Yarnell metodu, Water Surface PROfile (WSPRO) ve USBPR gibi yöntemleri kullanımaktadır [13-14]. Bu çalışmada köprü ayaklarının analizinde enerji (Denklem 1), momentum (Denklem 2-4) ve Yarnell (Denklem 5) yöntemlerinden yararlanılmıştır.

$$WS_{u} + \alpha_{u} \frac{V_{u}^{2}}{2g} = WS_{d} + \alpha_{d} \frac{V_{d}^{2}}{2g} + L\overline{S}_{f} + C \left| \alpha_{u} \frac{V_{u}^{2}}{2g} - \alpha_{d} \frac{V_{d}^{2}}{2g} \right|$$
(1)

Burada; *u* memba, *d* mansap kesitlerini, *WS* kıyas düzleminden itibaren su yüzü kotuna kadar olan düşey mesafeyi, α kinetik enerji düzeltme katsayısını, *V* ortalama hızı, *g* yerçekimi ivmesini, *L* memba ve mansap kesitleri arasındaki uzaklığı, $\overline{S_f}$ ortalama enerji çizgisi eğimini ve *C* daralma veya genişleme katsayısını ifade etmektedir.



Şekil 9. Köprü ayağı etrafındaki su yüzü profilleri (Seçkin ve Atabay, 2005) Figure 8. Water surface profiles around the bridge piers

Momentum yöntemi üç adımda gerçekleşmektedir [15]. İlk adımda 2. kesit (Şekil 9) ile köprü mansabı arasında Denklem 2, ikinci adımda köprü mansabı ile köprü membaı arasında Denklem 3 ve 3. adım ise köprü membaı ile 3. kesit (Şekil 9) arasında Denklem 4 ile verilen momentum denklemleri uygulanmaktadır.

$$A_{BD} * \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} * Q_{BD}^2}{g * A_{BD}} = A_2 * \bar{Y}_2 - A_{P2} * \bar{Y}_{P2} + \frac{\beta_2 * Q_2^2}{g * A_2} + F_f - W_x$$
(2)

$$A_{BU} * \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} * Q_{BU}^2}{g * A_{BU}} = A_{BD} * \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} * Q_{BD}^2}{g * A_{BD}} + F_f - W_x$$
(3)

$$A_3 * \bar{Y}_3 + \frac{\beta_3 * Q_3^2}{g * A_3} = A_{BU} * \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} * Q_{BU}^2}{g * A_{BU}} + A_{P3} * \bar{Y}_{P3} + \frac{1}{2} * C_d * \frac{A_{P3} * Q_3^2}{g * A_3^2} + F_f - W_\chi$$
(4)

Burada; A_{BD} köprü mansabındaki ve A_2 2. kesitteki akıma ait aktif alanı, A_{P2} köprü ayağının mansap tarafında suyu engellediği alanı, \overline{Y}_2 ve \overline{Y}_{BD} su yüzünden A_2 ve A_{BD} alanlarının ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, \overline{Y}_{P2} mansap tarafındaki su yüzünden köprü ayağının suyla temas ettiği alanın ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, β_2 ve β_{BD} momentum için hız düzeltme katsayılarını, Q_2 ve Q_{BD} 2. kesitteki ve köprü mansabındaki debileri, g yerçekimi ivmesini, F_f sürtünme katsayısını ve W_x akım yönündeki su ağırlığının oluşturduğu kuvveti, A_{Bu} köprü membaını, A_3 3. kesitteki akıma ait aktif alanı, A_{P3} köprü ayağının memba tarafında suyu engellediği alanı, \overline{Y}_3 ve \overline{Y}_{Bu} su yüzünden A_3 ve A_{Bu} alanlarının ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, \overline{Y}_{P3} memba tarafındaki su yüzünden köprü ayağının suyla temas ettiği alanın ağırlık merkezine olan düşey mesafeyi, β_3 ve β_{BU} momentum için hız düzeltme katsayılarını, Q_3 ve Q_{BU} 3. kesitteki ve köprü membaındaki debileri ve C_d köprü ayakları için direnç katsayısını ifade etmektedir.

$$H_{3-2} = 2 * K * (K + 10 * w - 0.6)(\alpha + 15 * \alpha^4) * (V_2^2/2 * g)$$
(5)

Burada; H_{3-2} Şekil 9'a göre 3 numaralı kesitten 2 numaralı kesite olan su seviyesindeki azalmayı, *K* Yarnell köprü ayak şekil katsayısını, *w* 2 numaralı kesitteki hız yükünün derinliğe oranını, α köprü ayaklarının suyla temas ettiği kesit alanının toplam engellenmemiş su kesit alanına oranını, V_2 kesit 2'deki hızı, *g* yer çekimi ivmesini ifade etmektedir.

2.5. Direk Adım Metodu (Direct Step Method)

Direk adım metodu prizmatik enkesitli kanallarda oluşan su yüzü profillerinin hidrolik hesabında kullanılan bir yöntemdir [16]. Yöntem, kolay ve kullanışlı olması nedeniyle pek çok araştırmacı tarafından tedrici olarak değişen su yüzü profillerinin hesabında tercih edilmektedir. Yöntemde belirlenen iki ardışık kesitteki su derinliklerinin arasındaki mesafe Denklem 6'da verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta x = \frac{\Delta E}{S_0 - \bar{S}_f} \tag{6}$$

Burada; S_0 taban eğimini, $\overline{S_f}$ iki ardışık kesit arasındaki ortalama enerji çizgisi eğimini, ΔE iki ardışık kesit arasındaki enerji seviyesi farkını ve Δx iki ardışık kesit arasındaki mesafeyi göstermektedir. $\overline{S_f}$ ve E Denklem 7 ve Denklem 8 ile hesaplanmaktadır.

$$S_{f} = \frac{Q^{2}n^{2}}{A^{2}R^{4/3}}$$

$$E = y + \frac{Q^{2}}{2gA^{2}}$$
(7)
(8)

Burada; Q kesitten geçen debiyi, n yüzeyin Manning katsayısını, A kesit alanını, R (A/P) hidrolik yarıçapı, y su derinliğini ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Ayak Tipi ve Verevlik Açısının Su Yüzü Profil Üzerindeki Etkisi (Effect of Pier Type and Skew Angle on the Water Surface Profile)

Şekil 10 – Şekil 22'de ayak tipi ve verevlik açısı değiştirilerek elde edilmiş su yüzü profillerini verilmiştir. Ayrıca, her bir şekilde 4 farklı yöntemle elde edilmiş su yüzü profilleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekillerde verilen 4 yöntem sırasıyla HEC-RAS, deneysel ölçüm, direk adım metodu ve görüntü işleme tekniği olarak adlandırılmıştır. Deneysel ölçüm sonuçları her bir deneyin üçer kez tekrar edilmesinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalamasıdır.

Şekil 10 – Şekil 22 ve Çizelge 2'den HEC-RAS sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu, köprü memba bölgesi için deneysel sonuçlar baz alınarak hesaplanan maksimum bağıl hatanın %10, 81 ile kare ayak ve verevlik açısının 45° olduğu durumda meydana geldiği görülmüştür. Diğer ayak tipleri ve verevlik açılarında oluşan farkların bu değerin altında olduğu tespit olunmuştur. Mansap bölgesi için ise

HEC-RAS'ın ortalama değerler alarak hesap yapması ve su yüzeyinde oluşan dalgalanmaları hesaplamaması nedeniyle bu tür bir karşılaştırma yapılamamıştır.

Köprü memba bölgesinde, görüntü işleme tekniği ile deneysel ölçüm sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve hesaplanan maksimum bağıl hatanın %4.37 ile kare ayak tipi ve verevlik açısının 15^o olduğu durumda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Diğer durumlar için görüntü işleme tekniği sonuçlarına dayalı hesaplanan bağıl hatalar %5'in altında kalmıştır. Mansap bölgesinde su yüzündeki ani değişimlerin görüntü işleme tekniği yardımıyla elde edilmesinde birtakım zorluklar (akımda sıçramalar ve oluşan süreksizlikler gibi) yaşansa da belirli oranda deneysel ölçümlerle uyumlu olduğu söylenebilir. Noktasal olarak hesaplanan bağıl hataların bahsedilen zorluklardan ötürü mansap bölgesinde yüksek çıkacağı da açıktır. Ancak su yüzündeki dalgalanmaların ortalaması baz alındığında görüntü işleme tekniğinden elde olunan sonuçların deneysel sonuçlara HEC-RAS sonuçlarından daha yakın olacağı da görülmektedir.

Köprü memba bölgesinde direk adım metodu sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları arasında %3,83'lük bir maksimum bağıl hata hesaplanmıştır. Bu fark memba yüzü keskin kenarlı ayak tipi ve verevlik açısının 0⁰ olduğu durumda meydana gelmiştir. Diğer tüm ayak tipleri ve açı durumlarında maksimum farkın bu değerin altında olduğu tespit edilmiştir. Direk adım metodu tedrici değişken akım özelliği taşıyan bölgelere uygulanırken profillerin kontrol noktalarındaki bilinen su derinlikleri (hesap başlangıcındaki su derinlikleri) olarak deneyler sırasında o noktalarda ölçülen su derinlikleri alındığından direk adım metodu sonuçları diğer yöntemlere göre deneysel sonuçlara daha yakın çıkmıştır. Direk adım metodu ani değişen akımların görüldüğü mansap bölgesine uygulanamayacağından karşılaştırma yapılamamıştır.











Şekil 20. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 15^o Figure 20. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 15^o



Şekil 22. Su yüzü profili; memba yüzü keskin kenarlı ayak ve verevlik açısı = 45^o Figure 22. Water surface profile; ogival upstream face pier and skew angle = 45^o

Çizelge 2. Hesaplanan maksimum bağıl hatala	ar
Table 2. Computed maksimum relative errors	

HEC-RAS					Görüntü İşleme Tekniği				Direk Adım Metodu			
Açı	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı	Kare	Dairesel	Kenarları Yuvarlatılmış	Memba Yüzü Keskin Kenarlı
0°	2,25	7,81	1,31	3,75	2,40	4,33	2,80	3,48	1,96	0,70	2,12	3,83
15°	5,91	-	6,68	10,06	4,37	-	2,26	3,21	1,76	-	1,71	3,40
30°	8,16	-	9,18	8,92	2,99	-	1,72	4,13	2,09	-	2,27	1,83
45°	10,81	-	8,01	2,47	1,47	-	2,24	2,27	3,19	-	3,64	3,13

3.2. Ayak Tipi ve Verevlik Açısının Kabarma Miktarı Üzerindeki Etkisi (Effect of Pier Type and Skew Angle on the Afflux)

Köprü yerleştirildikten sonra köprü membaındaki su derinliği ile köprü öncesi kanaldaki normal derinlik arasındaki fark olan kabarma miktarı her bir durum için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kanalda oluşan normal derinlik 6,60 m olarak ölçülmüştür. Her bir ayak tipi ve verevlik açısı için hesaplanan kabarma miktarları Cizelge 3 - Cizelge 6'da verilmiştir. Beklenilen sekilde dairesel enkesitli ayak tipi haric verevlik açısı arttıkça akıma direnç gösteren yüzey alanı artmakta ve beraberinde kabarma miktarları da artmaktadır (Şekil 23-25). Kabarma miktarının en fazla olduğu köprü ayak tipi kare enkesitli ayak ve en düşük olduğu ise dairesel enkesitli ayak tipidir. Kare enkesitli ayak ve memba yüzü keskin kenarlı ayak tipinde verevlik açısının 15º 'den 30º'ye çıktığı durumda kabarma miktarlarında HEC-RAS model sonuçları hariç daha büyük bir artış gözlenirken, kenarları yuvarlatılmış ayak tipinde 30° den sonra etkili bir artış oluşmuştur (Şekil 23-25). HEC-RAS model sonuçları 30º'den sonra kabarma miktarlarında azalan bir oranda artış göstermiştir. Kare enkesitli ayak da 30º/den sonra HEC-RAS sonuçları hariç diğer yöntemlerden elde edilen kabarma miktarlarında azalış gözlenmiştir. Normal derinlik baz alınarak hesaplanan ve Çizelge 3-6'da yüzdelik olarak verilen kabarma miktarlarına göre en düşük %38 ve en vüksek %67'lik bir artış görülmüştür. Direk adım metodu ve deneysel ölçüme dayalı kabarma miktarlarının çakışmasının nedeni; bulgular bölümünde belirtildiği üzere, direk adımda su yüzü hesap başlangıcında kullanılan deneysel ölçüm değerinin aynı zamanda kabarma miktarının hesabında kullanılmasıdır.

Çizelge 3. Dört değişik yöntemle elde edilmiş kare köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

	Kare								
– Ölcüm Vöntemi	0°		1	15°		30°		45°	
3	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	
Deneysel Ölçümler	3,40	51,52	3,53	53,48	3,79	57,42	3,74	56,67	
HEC-RAS	3,36	50,91	3,91	59,24	4,34	65,76	4,44	67,27	
Görüntü İşleme Tekniği	3,60	54,55	3,60	54,55	3,94	59,70	3,68	55,76	
Direk Adım Metodu	3,40	51,52	3,53	53,48	3,79	57,42	3,74	56,67	

Table 3. Afflux and % afflux for square bridge pier obtained from four different methods

Çizelge 4. Dört değişik yöntemle elde edilmiş dairesel köprü ayağı için kabarma miktarla	rı (cm) ve
yüzdelik değerleri (%)	

_	Dairesel				
Ölçüm Yöntemi	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı			
Deneysel Ölçümler	2,56	38,79			
HEC-RAS	3,01	45,61			
Görüntü İşleme Tekniği	2,52	38,18			
Direk Adım Metodu	2,56	38,79			

	Table	5. Afflux and %	6 afflux for ob	long bridge pier o	btained from fo	ur different metho	ods				
		Kenarları Yuvarlatılmış									
Ölcüm Yöntemi	0°		15°		30°		45°				
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı			
Deneysel Ölçümler	3,04	46,06	3,00	45,45	3,18	48,18	3,58	54,24			
HEC-RAS	2,83	42,88	3,40	51,52	3,82	57,88	3,92	59,39			
Görüntü İşleme Tekniği	2,86	44,85	3,10	46,97	3,09	46,82	3,53	53,48			
Direk Adım Metodu	3,04	46,06	3,00	45,45	3,18	48,18	3,58	54,24			

Çizelge 5. Dört değişik yöntemle elde edilmiş kenarları yuvarlatılmış köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%)

Çizelge 6. Dört değişik yöntemle elde edilmiş memba yüzü keskin kenarlı köprü ayağı için kabarma miktarları (cm) ve yüzdelik değerleri (%) *Table 6. Afflux and % afflux for ogival upstream face bridge pier obtained from four different methods*

_	Memba Yüzü Keskin Kenarlı									
Ölçüm Yöntemi	0°		15°		30°		45°			
	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı	Kabarma Miktarı	% Kabarma Miktarı		
Deneysel Ölçümler	3,04	46,06	3,10	46,97	3,50	53,03	4,38	66,36		
HEC-RAS	3,11	47,12	3,70	56,06	4,12	62,42	4,22	63,94		
Görüntü İşleme Tekniği	3,06	46,36	2,96	44,85	3,42	51,82	4,26	64,55		
Direk Adım Metodu	3,04	46,06	3,10	46,97	3,50	53,03	4,38	66,36		



Şekil 23. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; kare enkesitli ayak *Figure 23. Afflux versus skew angle for square bridge pier*



Şekil 24. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; kenarları yuvarlatılmış ayak *Figure 24. Afflux versus skew angle for oblong bridge pier*



Şekil 25. Kabarma miktarı ve verevlik açısı ilişkisi; memba yüzü keskin kenarlı ayak *Figure 25. Afflux versus skew angle for ogival upstream face bridge pier*

4. SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Dört farklı köprü ayak tipi ve dört farklı verevlik açısı uygulanarak dört farklı yöntemle köprü ayaklarının akım üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmadan elde olunan sonuçlar şunlardır;

- Deneysel ölçümlerden elde olunan su yüzü profilleri ile diğer yöntemlerden elde olunan su yüzü profillerinin görsel olarak oldukça uyumlu ve sayısal değerlerinin de oldukça yakın olduğu görülmüştür. Hesaplanan maksimum bağıl hata %10,81 ile HEC-RAS sonuçlarına dayalı elde olunan su yüzü profillerinde görülmüştür.
- HEC-RAS'dan elde olunan kabarma miktarları ile verevlik açısı ilişkisi iç bükey bir eğri çizerek açının artmasıyla birlikte kabarma miktarlarının artış oranında azalma göstermiştir. Diğer yöntemlerde ise dış bükey şeklinde bir eğri ve kabarma miktarlarında artan oranlar görülmüştür. Ayrıca, diğer

yöntemlerle karşılaştırıldığında, HEC-RAS modelinin genel olarak daha yüksek değerler ürettiği de görülmüştür. Ancak, bu farklılıkların, HEC-RAS yazılımının benzer problemler için memba bölgesinde su yüzü profillerinin ve kabarma miktarlarının belirlenmesinde kullanımını engelleyecek boyutta olmadığı düşünülmektedir. HEC-RAS mansap bölgesinde ölçülen değerlerden farklı sonuçlar vermiştir. Bu bölgede çok daha iyi bir performans beklenmemiştir. Köprü ayaklarının etrafında ve mansap bölgesinde oluşan vorteks ve türbülans akımlarının detaylı çalışmaları için bir boyutlu modellerin uygun olmadığı bilinmektedir.

- Köprü ayaklarından dolayı köprü membaında oluşan kabarma miktarları genel olarak verevlik açısının artışı ile artmıştır. Kabarma miktarlarının verevlik açısı ile artış oranı özellikle 30°/den sonra daha fazla olmuştur. Kare enkesitli ayak tipinde ise 30°/den sonra bir düşüş görülmüştür.
- Görüntü işleme tekniği gerek köprü membaında tedrici değişken akım bölgesinde ve gerekse mansapta oluşan ani değişken akım bölgesinde ölçüm sonuçlarına uyumlu ve yakın değerler vermiştir. Görüntü kalitesinin iyileştirilmesi ve filtreleme algoritmaların geliştirilmesi ile birlikte çok daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarının yürütülmesinde, ilgili literatürün taranmasında ve verilerin toplanmasında etik ilkelere ve standartlara bağlı kalındığını ve makalenin özgün olduğunu beyan eder.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Bu çalışma; Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran, Arş. Gör. Uğur Ünal ve Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz tarafından yazılmış ve Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran tarafından eleştirel olarak incelenerek gerekli düzenlemeler/düzeltmeler yapılmıştır. Çalışmanın görüntü işleme tekniği ile ilgili kısımları Doç. Dr. Ahmet Şakir Dokuz tarafından gerçekleştirilmiş ve Arş. Gör. Uğur Ünal ile Mustafa Çağrı Nas tarafından deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışma, Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa Çağrı Nas'ın Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran danışmanlığında yürütülen yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışmanın yürütülmesi esnasında herhangi bir kurum veya kuruluştan maddi bir destek alınmamıştır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Yazarlar bu çalışmadan elde edilen verilerin diğer araştırmacılar tarafından kullanılabileceğini ifade etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- M. D'Angelo, A. Menghini, P. Borlenghi, L. Bernardini, L. Benedetti, F. Ballio, M. Belloli, and C. Gentile, "Hydraulic safety evaluation and dynamic investigations of baghetto bridge in Italy," *Infrastructures*, vol. 7, no. 53, pp. 2-19, 2022.
- [2] H. Akay, ve M. Baduna Koçyiğit, "Akarsu köprülerinde gözle muayene ve güvenlik değerlendirme çalışmaları," 4. Su Yapıları Sempozyumu, 2015, pp. 205-214.

- I. E. Harik, A. M. Shaaban, H. Gesund, G. Y. S. Valli, and S. T. Wang, "United States bridge failures, 1951–1988", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 4, no. 4, pp. 272–277, 1990.
- [4] N. Yılmaz, ve H. Bozkurt, Y. Bayazıt, "Akarsu köprülerinin HEC-RAS programı ile hidrolik analizi: Fidanlık köprüsü örneği," *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 896-910, 2020.
- [5] B. Melville and S. E. Coleman, *Bridge Scour*. Colorado: Water Resources Publications, 1-2, 2000.
- [6] M. M. Flint, O. Fringer, S. L. Billington, D. Freyberg, and N. S. Diffenbaugh, "Historical analysis of hydraulic bridge collapses in the continental United States," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1-16, 2017.
- [7] U.C. Kothyari, and K.G. Ranga Raju, "Scour arround spurdikes and bridge abutments," *Journal of Hydraulic Research.*, vo. 39, no. 4, pp. 367-374, 2001.
- [8] A. H. Mahmoud, and A. M. Mobasher, "Assessment of high-velocity free surface flow interaction with a bridge pier in a curved channel," *Journal of Applied Sciences Research*, vol. 15, no. 1, pp. 1-11, 2019.
- [9] K. S. Erduran, G. Seçkin, S. Kocaman, and S. Atabay, "3D numerical modelling of flow around skewed bridge crossing," *Engineering Aplication of Computational Fluid Mechanics*, vol. 6, no. 3, pp. 475-489, 2012.
- [10] A.M.A. Shaymaa, A.T.A. Sanaa, and M. Saad, "Water surface profile and flow pattern simulation over bridge deck slab," *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 291-304, 2020.
- [11] Y. W. Jeong, and W. Jeong, "Experimental and numerical investigation of water-surface characteristics at crossing connected non-orthogonally to four flat channels," *Journal Hydrology and Hydromechanic*, vol. 69, no. 2, pp. 232-242, 2021.
- [12] G. W. Brunner, *River analysis system user's manual, Version 4.1.* US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2010.
- [13] G. W. Brunner, and J. H. Hunt, A comparison of the one-dimensional bridge hydraulic routines from HEC-RAS, HEC-2 and WSPRO. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 1995.
- [14] G. Seçkin, and S. Atabay, "Experimental backwater analysis around bridge waterways," Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 32, no. 6, pp. 1015-1029, 2005.
- [15] A. S. Subedi, S. Sharma, A. Islam, and N. Lamichhane, "Quantification of the effect of bridge pier encasement on headwater elevation using HEC-RAS," *Hydrology*, vol. 6, no. 1, pp. 1-18, 2019.
- [16] A. R. Vatankhah, "Direct integration of gradually varied flow equation in parabolic channels," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 22, no. 3, pp. 235-241, 2011.



INVESTIGATING THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE COLD FORGING OF 27MNB4 STEEL VIA CALPHAD METHODOLOGY AND FEM

1*Yağız AKYILDIZ[®], ²Ümit KUTSAL[®], ³Yağız ARSLAN[®], ⁴Adnan AKMAN[®], ⁵Atıf KARKINLI[®], °Mert SAĞLAM[®], 7Rıdvan YAMANOĞLU[®]

^{1,3} Onatus Vision Technologies, Kocaeli, TÜRKİYE

²Izmir Kâtip Celebi University, Material Science and Engineering, Izmir, TÜRKİYE
 ⁴Delft University of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Delft, NETHERLANDS
 ⁵Istanbul Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, İstanbul, TÜRKİYE
 ^{6,7}Kocaeli University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, Kocaeli, TÜRKİYE

¹yagizakyildiz@onatus.com, ²umitkutsal987@gmail.com, ³yagizarslan@onatus.com, ⁴adnanakmann@gmail.com, ⁵karkinli18@itu.edu.tr, ⁶mert.saglm@outlook.com, ⁷ryamanoglu@kocaeli.edu.tr

Highlights

- It is observed that microstructural differences affect the cold formability and stress distribution of 27MnB4 steel. Furthermore, creating small and round cementite particles in the ferritic matrix by the annealing treatment enhances the formability.
- It is possible to simulate the annealing treatment and the effect of annealing treatment on the cold forming of 27MnB4 steel with CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) and FEM-based (Finite Element Method) softwares.



INVESTIGATING THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE COLD FORGING OF 27MnB4 STEEL VIA CALPHAD METHODOLOGY AND FEM

¹*Yağız AKYILDIZ[®], ²Ümit KUTSAL[®], ³Yağız ARSLAN[®],⁴Adnan AKMAN[®],⁵Atıf KARKINLI[®], ⁰Mert SAĞLAM[®],7Rıdvan YAMANOĞLU[®]

^{1,3} Onatus Vision Technologies, Kocaeli, TÜRKİYE
 ²Izmir Katip Celebi University, Materials Science and Engineering, Izmir, TÜRKİYE
 ⁴Delft University of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Delft, NETHERLANDS
 ⁵Istanbul Technical University, Metallurgical and Materials Engineering, İstanbul, TÜRKİYE
 ^{6,7}Kocaeli University, Engineering Faculty, Metallurgical and Materials Engineering Department, Kocaeli, TÜRKİYE

¹yagizakyildiz@onatus.com, ²umitkutsal987@gmail.com, ³yagizarslan@onatus.com, ⁴adnanakmann@gmail.com, ⁵karkinli18@itu.edu.tr, ⁶mert.saglm@outlook.com, ⁷ryamanoglu@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 14.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2022)

ABSTRACT: As a material forming method, cold forging is preferred due to the reasons like absence of a heating step and high surface quality. Recently, the finite element method (FEM) has received growing attention for controlling and predicting final material properties for cold forging applications. FEM combines microstructure evolution models with failure criteria, thus providing solutions to complicated problems in the modern cold forging industry. The fastener industry extensively utilizes cold forging, in which manganese and boron-containing steels like 27MnB4 can be formed to obtain high mechanical properties. The current study investigates the effect of two different heat treatments, namely softening and spheroidizing annealing, on the formability of 27MnB4 bolts. Softwares such as Thermo-Calc 2022a and Forge NxT 3.2 were used to predict the microstructure of the wire rod and evaluate the cold forming process of the same rod under two different heat treatment conditions. Therefore, the current study also provides a relationship between microstructural features and the cold formability of 27MnB4 steel. The microstructure of 27MnB4 is predicted by CCT diagrams. The predicted microstructure corresponds to the microstructure of 27MnB4 samples taken from the production line. In addition, temperature, von Mises stress, and equivalent strain distributions for 27MnB4 steel in the hot rolled state were calculated higher than in annealed states due to the differences in the microstructure. These results demonstrate that computational material engineering methods and simulation techniques could be practical tools for cold forming processes.

Keywords: 27MnB4, Cold Forming, Finite Element Method, Forging Simulation, Computational Materials Engineering

1. INTRODUCTION

Bolts are representative fasteners broadly used in assembling parts and complex structures. Developing high-strength and eco-friendly bolts is crucial to saving energy and addressing environmental concerns [1]. Steel wire rods are often preferred as starting materials for manufacturing bolts. After the hot rolling of wires, they are laid onto a cooling conveyor that provides controlled cooling by airflow. In the final stage, they are formed into coils and supplied to manufactures [2].

Critical transformation temperatures (CTT) and cooling rates significantly influence the microstructure and the properties of the final product in many processes, including wire rod production.

*Corresponding Author: Yağız AKYILDIZ, yagizakyildiz@onatus.com

Therefore, such parameters help to design the optimum processing conditions for manufacturing steels with superior properties. For instance, CTT gives insights into processing temperatures, and they are practical tools for determining the desired cooling requirements [3]. Although computational methods can determine some parameters, data obtained by such practices must be reliable to get a positive outcome. On the other hand, acquiring this data via experimental testing can be costly and time-consuming. To this end, CALPHAD-based computational tools such as Thermo-Calc software aid the process design stage by performing thermodynamic and thermokinetic calculations that generate reliable materials data. In addition, such tools reduce the number of experiments and tests, resulting in a more economical and practical process [4, 5, 6].

Wire rods are deformed by forging to obtain bolts. Forging is a process that changes the shape of metal via pressure to get desired mechanical properties, shapes, and sizes. Especially with the improvements in forging technology, complex parts like bolts and nuts can be formed with better mechanical properties and accurate dimensions [7]. For the bolt industry, cold forging is a favourable method since heating is unnecessary, surface precision is optimum, and the service life of the expensive dies can be preserved via cold forging [8]. However, the formation of cracks during the cold forging of complex geometries can create deleterious problems and undetected defects on cold forged fasteners may cause serious problems. Therefore, it is essential to understand the crack evolution of cold forged fasteners for an efficient forming operation [9]. Additional annealing heat treatment steps may be needed to avoid crack evolution during cold forming operations. In addition, annealing treatment can be applied to fasteners for improved deformability. Spheroidization annealing (650-700°C) is one of the most common treatments for fastener manufacturing, in which lamellar cementite in pearlite structure transforms into granular carbides. As the degree of spheroidization increases, the ductility and deformability of the material also increase. In addition to spheroidization annealing, the soft annealing process can be applied to make the steel soft enough for cold forming. During soft annealing treatment (700-900°C), the cementite lamellae in pearlite will spheroidize, creating small and round cementite particles in the ferritic matrix [10].

In recent years, the Finite-Element Method (FEM) has become a powerful tool to analyse metal deformation and predict numerous failures during forming processes [11]. Software that uses FEM is combined with models of microstructure evolution, tool wear and fracture criteria. As a result, solutions to complicated problems in forging technology became possible. In the literature, the cold forming of different types of steels [11, 12, 13] was studied by using such software. For instance, Orhan and his colleagues used FEM to produce digital twins of the plastic deformation process. They successfully observed the effect of process parameters on the mechanical properties of AISI 1010 steel [14]. In another study, a different FE simulation software is used to observe residual stress after repair welding in SUS 304 [15]. Li and his colleagues studied the thermomechanical processing of cold forging steel using the CCT diagram with computational materials engineering [16]. In the end, a multiphase microstructure (polygonal ferrite, dispersed pearlite, granular bainite and retained austenite) was obtained. In addition to these studies, commercial FEM software Forge® NxT 3.2, developed by TRANSVALOR S.A, was used to model various cold forming operations [17, 18, 19]. However, little effort has been paid to analysing 27MnB4 steel with computational methods. Thus, there is a need in the literature for a detailed investigation of the cold forging of 27MnB4 steel utilizing simulation software since it has a wide application area in the fastener industry.

The current study focuses on examining the effect of two different annealing types (soft annealing and spheroidization) on the cold forging of 27MnB4 via Thermo-Calc and FEM analysis by comparing with a hot rolled specimen with no additional processing. This work aims to create a correlation between cold forging of 27MnB4 in two different heat treatment conditions and resulting properties such as temperature, stress and strain distribution.

2. MATERIAL AND METHOD

The material used in the present study was 27MnB4 steel, and its chemical composition is given in Table 1. To predict the resulting phases and microstructure after the cooling regime after the hot rolling

on the conveyor belt, Critical Transformation Temperatures (CTT) and Continuous Cooling Transformation (CCT) diagrams were calculated according to the given chemical composition by using Thermo-Calc software 2022a TCFE12 (thermodynamic) and MOBFE6 (thermokinetic) database.

Table 1. Chemical composition of the 27MnB4 steel (wt.%).									
С	Si	Mn	Р	S	Cr	Al	В	Sn	Fe
0.28	0.10	1.00	0.007	0.003	0.26	0.035	0.004	0.006	Balance

Nine wire rod specimens with three different processing conditions (hot rolled, soft-annealed, and spheroidized) were taken from the production line at Kroman Steel Industry. Every specimen was subjected to approximately 300 seconds of controlled cooling on the conveyor belt. Hot rolled samples were prepared for the optical microscopy examinations by grinding with sanding paper 320 to 4000 grit and polishing with a diamond suspension with 3 and 1 µm particle sizes. Samples were etched for 5 to 10 seconds with Nital's reagent to reveal microstructural characteristics. Tensile tests of the specimens under three different conditions were performed according to EN ISO 6892-1 standard. The testing speed for all the specimens was 200 mm/min. Three wire rod specimens of 14 mm diameter were taken directly from the production line. The other six specimens having the same diameter underwent softening and spheroidization annealing heat treatments. The mean value of 3 specimens for each condition was accepted as the yield strength. Yield strength values of hot rolled, soft-annealed, and spheroidized samples were 437, 302 and 255 MPa, respectively.

In this work, as seen in Figure 1, FEM analysis of the cold forming simulation of the bolts contains three stages and the stages represent the upsetting (1st station), head forming (2nd station) and final forming (3rd station), respectively. Every single stage has different upper and lower moulds for cold forging. The billet used in the 1st station is transferred directly to the 2nd station. In the cold forging simulation process, a mechanical press was used with a speed of 60 rpm. Material cards defined in the software were generated by entering experimentally obtained yield strength values for the wire rod specimens in three different conditions.



Figure 1. Cold forging of the bolt at three different stations.
3. RESULTS AND DISCUSSION

In the first stage of the current study, functional diagrams that help design the process were presented and interpreted. Phase fractions as a function of temperature were calculated for 27MnB4 steel, as shown in Figure 2. 27MnB4 steel begins to solidify at 1506°C, and the first solidified phase is delta ferrite. At 1489°C, the delta ferrite (BCC) and liquid phase transform into austenite via peritectic reaction. Mn and S elements in steel form MnS intermetallic at 1477°C. Solidification is fully completed at 1441°C. In hypo-eutectoid steels, initially, the pro-eutectoid ferrite (BCC) phase is formed from the austenite (FCC) phase. The point at which pro-eutectoid ferrite begins to form defines the A3 temperature. A3 temperature was calculated as 795°C for the 27MnB4 steel. The eutectoid reaction point at 723°C for the pure Fe-M₃C system transforms into a eutectoid reaction area in multiphase systems. And in that regard, A1e and A1b temperatures were calculated as 732 and 705°C, respectively.

CCT (Continuous Cooling Transformation) diagram was calculated for 27MnB4 steel as shown in Figure 3 by entering grain size as ASTM 8 (25 μ m). The hot rolled wire rod temperature was assumed as the austenitization temperature while constructing the CCT diagram, which was selected as 890°C. A1 and A3 temperatures were calculated as 717 and 795°C for 27MnB4 steel, respectively. In addition, Bs (bainite start), M_s (martensite start), M50 (%50 martensite), and M_f (martensite finish) temperatures were calculated as 603, 376, 342, 263°C, respectively.



Figure 2. Phase fractions of 27MnB4 steel as a function of temperature.

As mentioned earlier, the calculated CCT diagram was used to predict the microstructure of the cooled specimens for approximately 300 seconds after the hot rolling station. According to the CCT diagram, the resulting microstructure after the controlled cooling consists of ferrite and pearlite/bainite (a mixture of ferrite and carbon-rich cementite). As seen from the optical microscopy image in Figure 4, the evolved microstructure is mainly a mixture of ferrite and pearlite/bainite. Lighter areas are defined as pro-eutectoid ferrite, the first phase to form from austenite solid solution upon cooling. Darker areas are pearlite/bainite mixture that can be both lamellar and acicular depending on the different cooling rates. In low/medium carbon steels containing manganese, it is hard to distinguish ferrite/carbide aggregates precisely using optical microscope techniques since the morphology of these aggregates (lamellar or lath

structure) can't be determined. Hybrid microstructures with ferrite, pearlite, and bainite can be formed due to controlled cooling [20, 21]. Therefore, it can be stated that the calculated CCT diagram provided an accurate estimation of the final microstructure for hot rolled specimens.







Figure 4. Microstructure images of hot rolled 27MnB4 wire rod at different magnifications a) 50X and b) 125X.

The second stage of the current study aims to examine the effect of microstructure (spheroidized/soft annealed) on the cold formability of 27MnB4 steel and compare it with the hot rolled sample. Simulations of bolt forming for the 27MnB4 steel were performed, and temperature, von Mises stress, and equivalent strain distribution were investigated. Regarding the temperature distribution of the 27MnB4 alloy through simulation, it was observed that the hot rolled condition exhibited a higher temperature evolution for all the stations than the soft annealed and spheroidized conditions. In the last station of the 27MnB4 fastener forging, the maximum temperature obtained for the hot rolled condition was 372°C, for the soft annealed condition 339°C, and for the spheroidized condition was 329°C. The main reason for the temperature difference as shown in Figure 5 is the need for higher energy to deform materials with higher yield stress due to resistance to yielding. Figure 6 and 7 represents the distribution of von Mises stresses for different stations with two different views. Since the bolt geometries do not differ for the three conditions, stress-concentrated areas were identical. The overall distribution of von Mises stresses for hot rolled 27MnB4

steel is higher than the annealed (spheroidized/soft) samples. This issue can be explained by the microstructural differences induced by the heat treatment process. Applied sub-critical heat treatment transforms the lamellar cementite into spheroidal form and the final microstructure has a lower yield point which facilities the cold forming process [22, 23]. As a result, stress evolution during the forming process decreases and failures such as splits can be avoided [18]. In addition, the stress distribution also represents the residual stresses after manufacturing. For the spheroidized condition, residual stresses at the highly deformed parts are lower than in soft annealed and hot rolled states. In addition to von Mises distribution, the distribution of equivalent strains was investigated. Figure 8 represents the distribution of equivalent strain for the final station. The mean value of equivalent strains for hot rolled 27MnB4 steel is slightly higher than annealed steel for the final station. This strain distribution. The presence of spheroidal cementite lamellae in pearlite for annealed samples enhances the formability compared to the hot rolled sample. Thus, it is possible to observe slight differences in the equivalent strain distribution between two different microstructures. In addition, as the fastener undergoes plastic deformation, strain hardening occurs. As shown in Figure 8, high-strain regions exhibit higher stresses due to the strain-hardening effect.



Figure 5. Temperature distribution of 27MnB4 steel for a) spheroidization, b) softening annealing, and c) hot rolled condition.



von Mises Equivalent Stress (MPa)



Figure 6. Von Mises stress distribution of 27MnB4 steel a) spheroidization b) softening annealing c) hot rolled condition (side view).



von Mises Equivalent Stress (MPa)



Figure 7. Von Mises stress distribution of 27MnB4 steel a) spheroidization b) softening annealing c) hot rolled condition (top view).



Figure 8. Equivalent strain distribution of 27MnB4 steel for a) spheroidization, b) softening annealing, and c) hot rolled condition.

In the literature, there are not many studies available about bolts or fasteners produced with 27MnB4 steel. In bolt production, the change of any process parameter in the forging step or the change of the chemical composition in the production material can directly affect the outcome. For this reason, the same material and the same production conditions should be used for comparison. In this work, similar studies from the literature were examined. Also, different production conditions and different material conditions were taken into consideration.

The cold forging process of 51B40 steel was modelled with Forge NxT software [17]. According to this study, the equivalent strain value was found to be a maximum of 3.76 in the region where the yield strength is exceeded. When compared with this study, it is similar to the value obtained as a result of the upsetting process obtained in 2nd station.

The fastener cold forging process was modelled for automotive batteries with Deform 3D software [24]. The process is designed as five stages. In the 5th stage of the process, the effective stress distribution was quite homogeneous. However, it can be said that the stress differences exhibit similar behaviour with this work, and it also increases proportionally with temperature.

In another work, forging simulation was modelled with Autodesk Inventor CAD software [25]. There were three forging stages similar to our study. In 2nd stage, the maximum effective stress of 758 MPa was observed when the upsetting process was completed. In addition, this effective stress was formed from the lower part of the upsetting process. When compared with our study, the homogeneity of the effective stress distribution with the von Mises stress distribution is similar. In addition, as seen in Figure 6, our von Mises distributions are such that they are maximum below the upsetting part.

From an originality view, this is a novel study due to the material, simulation selection and outcomes. Combining computational materials engineering with FEM is essential and needed for fastener fabrication. Especially in recent years, less energy consumption, and the use of more sustainable materials within the scope of environmentalism and sustainability become more and more essential for a better future. In this context, computational materials engineering and FEM will provide energy, economy and labour savings while performing R&D studies and serial production verifications for fastener production.

4. CONCLUSIONS

In this work, the effect of annealing treatment on the cold forging process of 27MnB4 bolts via FEM analysis was investigated. Results from the present study can be summarized as follows:

• CCT and CTT diagrams were used extensively in this study. CCTs and CTT diagrams significantly influence the final product microstructure development and resulting properties. Critical parameters such as rolling temperature and cooling regimes can be determined via CCTs and CTT diagrams, leading to optimum processing conditions and manufacturing of steel bolts with the desired properties.

• The differences in the microstructure affect the cold forging capability of the 27MnB4 steel. In the annealing treatment, the cementite lamellae in pearlite/bainite will spheroidize, creating small and round cementite particles in the ferritic matrix to improve formability. Thus, the microstructural difference affects the distribution of stresses and strains of 27MnB4 steel.

• The distribution of temperature, von Mises stress, and equivalent strain for 27MnB4 steel in the hot rolled state was higher than in annealed states due to the differences in the microstructure.

• The focus of the current study was to examine the effect of two different annealing treatments on the cold forging process of 27MnB4 bolts via two commercial CALPHAD and FEM-based software: Thermo-Calc and Forge® NxT. This study aims to fill the gap in the literature by creating a correlation between the cold formability of 27MnB4 and resulting properties such as temperature, stress, and strain distribution.

Declaration of Ethical Standards

All authors in the study followed all ethical guidelines, including authorship, citation, data reporting, and original research publication. The authors contributed equally to the article.

Credit Authorship Contribution Statement

Yagiz Akyildiz: Conceptualization, Writing – original draft – review & editing, Software, Investigation, Supervision. Umit Kutsal: Writing – original draft – review & editing, Visualization, Software, Investigation. Yagiz Arslan: Writing – original draft – review & editing, Visualization, Software, Investigation. Adnan Akman: Writing – original draft – review & editing, Visualization, Software, Investigation. Atif Karkinli: Writing – original draft – review & editing, Visualization, Software, Investigation. Mert Saglam: Writing – original draft – review & editing, Visualization, Software, Investigation. Ridvan Yamanoglu: Supervision, Writing – review & editing, Conceptualization, Investigation.

Declaration of Competing Interest

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

Funding / Acknowledgements

We would like to thank Mr. Murat Erdal, Metallurgical and Materials Engineer, for his support in the study of the article.

Data Availability

The data that has been used is confidential.

REFERENCES

- H. C. Lee, Y. G. Jin, Y. H. Lee, I. H. Son, D. L. Lee, Y. T. Im, "Process design of high-strength bolt of fully pearlitic high-carbon steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 14, pp. 1870-1875, 2010.
- [2] A. Lindemann and J. Schmidt, "ACMOD-2D—a heat transfer model for the simulation of the cooling of Wire Rod," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, no. 3, pp. 466–475, 2005.
- [3] D. Y. Wu, F. R. Xiao, B. Wang, J. L. Liu, "Investigation on grain refinement and precipitation strengthening applied in high speed wire rod containing vanadium," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 592, pp. 102-110, 2014.
- [4] V. Javaheri, T. Nyyssönen, B. Grande, D. Porter, "Computational design of a novel mediumcarbon, low-alloy steel microalloyed with niobium," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 27, no. 6, pp. 2978–2992, 2018.
- [5] R. Jha and G. S. Dulikravich, "Solidification and heat treatment simulation for aluminum alloys with scandium addition through CALPHAD approach," *Computational Materials Science*, vol. 182, no. 109749, 2020.
- [6] Y. Akyıldız, O. Öztürk and B. Simsar, "Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu," Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 25, no. 3, pp. 699-704, 2021.
- [7] S. Y. Hsia, and Y. T. Chou, "Fabrication improvement of cold forging hexagonal nuts by computational analysis and experiment verification," *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.
- [8] R. Rajiev, P. Sadagopan, R. S. Prakash, "Study on investigation of hot forging die wear analysis-An industrial case study," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 2752-2757, 2020.
- [9] Z. Li, D. Wu, W. Lv, "Study on the crack forming during cold forging process of ML25Mn steel, "Applied Mechanics and Materials, vol. 184, pp. 1255-1258, 2012.
- [10] H. Bhadeshia, H and R. Honeycombe, *Steels: Microstructure and Properties*, ch. 6. Elsevier, 4nd ed., Kidlington, UK, Elsevier, 2017. [E-book] Available: Safari e-book.
- [11] H. C. Lee, M. A. Saroosh, Y. T. Im, H. S. Kim, I. H. Son, D. L. Lee, "Two-dimensional finite element approximation of the hexagonal bolt forming process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, pp. 19-24, 2008.
- [12] S. Chen, Y. Qin, C. M. Choy, J. G. Chen, "Testing an injection forging process for the production of automotive fasteners," *Procedia engineering*, vol. 207, pp. 508-513, 2017.
- [13] S. Narita, K. Hayakawa, T. Uemori, Y. Kubota, "Evaluation of strength of stainless steel bolt without heat treatment considering Bauschinger effect during manufacturing process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 278, 2020.
- S. Orhan, F. Öztürk, J. Gattmah, "Effects of the semi die/plug angles on cold tube drawing with a fixed plug by FEM for AISI 1010 steel tube," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21 no. 5, pp. 886-892, 2017.
- [15] P. Dai, Y. Wang, S. Li, S. Lu, G. Feng, D. Deng, "FEM analysis of residual stress induced by repair welding in SUS304 stainless steel pipe butt-welded joint," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 975-983, 2020.
- [16] Z. Li and D. Wu, "Study of the high strength and low yield ratio cold forging steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 452, pp. 142-148, 2007.
- [17] D. Petrescu, S. C. Savage, P. D. Hodgson, "Simulation of the fastener manufacturing process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125-126, pp. 361–368, 2002.
- [18] N. Y. Ben, Q. Zhang, D. W. Zhang, "Improvement of axial forging process for spline shaft by die design," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, pp. 2727-2741, 2018
- [19] C. Kiener, M. Merklein, "Research of adapted tool Design in Cold Forging of gears," *International Journal of Material Forming*, vol. 13 no. 6, pp. 873-883, 2020.
- [20] S. F. Di Martino and G. Thewlis, "Transformation characteristics of ferrite/carbide aggregate in continuously cooled, low carbon-manganese steels," *Metallurgical and Materials Transactions A*,

vol. 45, no. 2, 579–594, 2013.

- [21] B. T. Tang, Q. L. Wang, S. Bruschi, A. Ghiotti, P. F. Bariani, "Influence of temperature and deformation on phase transformation and Vickers hardness in tailored tempering process: Numerical and experimental verifications," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol 136, no. 5, 2014.
- [22] C. C. Yang and C. L. Liu, "Optimization of Spheroidized Process Parameters for Two AISI 1022 Steel Wires Using Taguchi Approach," *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics (IJMEM)*, vol. 4 no. 1, pp. 1-11, 2017.
- [23] J. I. Cheng, W. A. N. G. Lei, M. Y. Zhu, "Effect of subcritical annealing temperature on microstructure and mechanical properties of SCM435 steel," *Journal of Iron and Steel Research*, *International*, vol. 22 no. 11, pp. 1031-1036, 2015.
- [24] M. C. Sun, G. Y. Tzou, L. A. Zheng, "Study on multi-stage cold forging of stainless automotive battery fastener," *Applied Mechanics and Materials* vol. 284, pp. 211-215, 2013.
- [25] U. C. Chai, G. Y. Tzou, C. M. Hsu, S. P. Wei, "FEM simulation of multi-stage forging for dray fasteners," *Key Engineering Materials* vol. 830, pp. 1-8, 2020.



COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF A FEED-FORWARD NEURAL NETWORK-BASED MPPT FOR RAPIDLY CHANGING CLIMATIC CONDITIONS

*Fuad ALHAJ OMAR

Zonguldak Bülent Ecevit University, Electric and Energy Department, Zonguldak, TÜRKİYE fuad.a@beun.edu.tr

Highlights

- Introducing a Maximum Power Point Tracking (MPPT) system based on a feed-forward artificial neural network.
- Presenting MPPT technique to work under rapid and abrupt changes in climatic conditions.
- Validation of the proposed MPPT system performance by comparison against the incremental conductance (IC) and fuzzy logic (FL) methodologies.

Graphical Abstract



Flowchart of the proposed procedure



COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF A FEED-FORWARD NEURAL NETWORK-BASED MPPT FOR RAPIDLY CHANGING CLIMATIC CONDITIONS

*Fuad ALHAJ OMAR

Zonguldak Bülent Ecevit University, Electric and Energy Department, Zonguldak, TÜRKİYE fuad.a@beun.edu.tr

(Geliş/Received: 22.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.11.2022)

ABSTRACT: Rapid and abrupt changes in climatic conditions present a challenge to classical MPPT techniques as they drift from the MPP, resulting in loss of power. This paper presents a new MPPT technique based on a feed-forward artificial neural network (FFANN) and a direct control technique. In the proposed approach, FFAAN estimates the optimum value of the PV output voltage V_{MPP} , while the direct control technique achieves an optimal adjustment of the duty cycle making the operating point at MPP. To evaluate the performance of the proposed technique, the accurate electrical model of the system parts was built and simulated in MATLAB/Simulink environment. The simulation results are collected under rapidly changing climatic conditions. Simulation results show that the proposed MPPT technique achieves higher performance in terms of tracking efficiency and convergence speed compared to both the IC-based MPPT and FL-based MPPT systems. The results show that the proposed technique accurately estimates V_{MPP} , achieving a tracking efficiency of 99.9%, while the tracking efficiency is 94% when using FL-based MPPT and 91.5% when using IC-based MPPT. This demonstrates that the proposed technique exhibits superior performance under rapidly changing climatic conditions and increases energy production efficiency compared to classical techniques.

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Artificial Neural Network, Fuzzy Logic, Incremental Conductance

1. INTRODUCTION

The electricity demand is increasing dramatically since it has become an essential factor for social welfare and economic development [1]. To meet this need, most traditional energy sources, such as fossil fuels, have been exhausted. Unfortunately, excessive use of fossil fuels has caused air pollution and global warming due to carbon dioxide emissions. For these reasons, most countries seek to switch to new forms of energy called "renewable energies", which are relatively efficient even though they are expensive. Since renewable energies come from natural resources such as sunlight, wind, geothermal heat, tides, etc., they can be regenerated naturally. Many remote and rural areas around the world use renewable energy sources to generate electricity. They use photovoltaic panels, wind turbines, geothermal energy, biomass, and others [2, 3]. The electricity generated from renewable energy systems is intermittent because it depends on climatic conditions and geographical location, so they are usually combined with a storage system to ensure the continuous availability of electricity [4, 5]. Among the renewable energy sources, solar energy has proven its efficiency because it is abundant, free and environment friendly. Therefore, solar PV systems have become an essential component and integral part of renewable energy networks [6-8].

In recent years, solar PV energy systems have experienced rapid growth and remarkable development. They are used in many applications such as rural water supply, light sources, traffic systems, water pumping, battery charging, meteorological systems, and satellite power systems [9, 10]. Although the widespread use of solar PV systems, they still face efficiency limitations. Many factors directly affect the performance of solar PV systems, such as nonlinear characteristics, irradiance, temperature, weather conditions, and properties of the solar cell material [11, 12]. Thus, to improve the PV systems' efficiency, control techniques called the

maximum power point tracking (MPPT) systems have been proposed. They are designed to extract the maximum available power from the PV panel under various atmospheric conditions [13, 14]. The basic working principle of the MPPT is that it generates an appropriate duty cycle to switch the DC-DC converter, which in turn matches the resistance of the solar panels with the resistance of the load, thus achieving maximum energy transfer from input to output [15, 16]. In recent years, many MPPT techniques have been proposed. The proposed MPPT techniques differ in many aspects such as working principle, efficiency, convergence speed, sensors requirements and implementation complexity [17, 18]. The MPPT techniques are divided into two main types [19, 20]: classic techniques, such as Hill Climbing (HC) [21], Perturbation and Observation (P&O) [22], Incremental Conductance (IC) [23], Fractional open-circuit voltage [24], and Fractional short-circuit current [25]; and artificial intelligence-based techniques, such as Fuzzy Logic Controller (FLC) and Artificial Neural Network (ANN) [26]. Classical techniques are widely used since they are simple, easy to implement, and cost-effective. However, their efficiency and convergence speed are low, and they suffer from oscillation around the MPP. Therefore, artificial intelligence-based techniques have been used to address these problems [27, 28]. The FL technique is attractive in PV systems because it does not require complex mathematics, its efficiency and convergence speed are higher than the classic techniques, and less oscillation around the MPP [29, 30]. However, this technique still suffers from the problem of drifting from the MPP under sudden changes in climatic conditions. This is due to the need for good knowledge of the solar systems in order to accurately determine the relationship function of the model [1].

Recently there has been a great interest in using ANN in PV systems, as many ANN-based MPPT controllers have been developed [2, 31]. The main advantages of ANN are that good knowledge of photovoltaic system parameters is not required for MPPT design, and it can handle complex nonlinear relationships without the need for an accurate mathematical model. However, the critical weak point of this technique in its training strategy when used as a prediction model [1].

The current study presents a new MPPT system based on the feed-forward artificial neural networks (FFANN) and a direct control method. The proposed technique improves the efficiency of solar PV systems under rapid climate changes. In this context, FFANN trained by a back-propagation algorithm was employed to estimate the optimum value of the PV output voltage VMPP. The irradiance and temperature are used as input variables for the proposed FFANN model, whilst the estimated voltage V_{MPP} is the output. The direct control method was used to achieve the optimum adjustment of the duty cycle after comparing the estimated voltage value (V_{MPP}) with the theoretical voltage value (V_{MPP}). The duty cycle is converted into a signal to switch the DC-DC converter using a pulse-width modulation generator (PMW). The system model was built in the MATLAB/Simulink environment, where simulations were performed, and results were collected. The results showed that the proposed method has good dynamic performance, high convergence speed, and high accuracy in tracking the MPP under rapid climatic changes. For validation of the results, a comparison between the proposed MPPT system, fuzzy logic (FL)-based MPPT system, and the incremental conductance (IC)-based MPPT system, was performed in terms of the tracking efficiency, convergence speed, and performance. The results prove that the proposed technique performs better than the other techniques. Hence, the proposed FFANN-MPPT technique achieves the highest efficiency under rapid climatic changes.

The rest of this article is organized as follows: sections 2 and 3 present the structure and model of the proposed FFANN technique. Sections 4, 5 and 6 cover the principles of the direct control technique, fuzzy logic-based MPPT technique, and incremental conductance (IC)-based MPPT technique. Section 7 introduces the modelling of the system. In Section 8, the simulation results are provided and discussed. The last section contains the conclusion.

2. STRUCTURE OF THE PROPOSED FFANN

An artificial neural network (ANN) is a data processing system that simulates and resembles the neural networks in humans. An artificial neural network is similar to the human brain in that it acquires knowledge by training and retains it using neurons' connecting forces called synaptic weights. The weights link the neurons in each layer with all the neurons in the next layer. The network is trained to perform certain functions by adjusting the values of the synaptic weights.

The proposed FFANN architecture consists of three layers: an input layer, a hidden layer and an output layer, as shown in Figure 1. The input layer contains two input variables. The first variable is the solar irradiance G [W/m²], while the second variable is the temperature of the solar cell T [$^{\circ}$ C]. Whereas the output layer contains a single neuron representing the optimal PV output voltage (VMPP). The number of neurons in the hidden layer is determined during the training process.

To evaluate the accuracy of the proposed neural network in estimating the VMPP, we will rely on the performance index representing the mean squared error (MSE) and the correlation coefficient (R), which are given as follows:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^{N} (\tilde{V}_{MPP} - V_{MPP})^{2}$$
(1)
$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{K=1}^{N} (V_{MPP} - \tilde{V}_{MPP})^{2}}{\sum_{K=1}^{N} (V_{MPP} - \bar{V}_{MPP})^{2}}$$
(2)

 V_{MPP} : represents the real values.

 \tilde{V}_{MPP} : represents the estimated values generated from the neural model.

The ideal performance of a trained neural network corresponds to a minimum MSE value and an R-value close to 1.



Figure 1. The general structure of the ANN

3. MODELLING THE PROPOSED FFANN

To model the proposed network in MATLAB, the following procedures were implemented:

- 1. The "newff" function was adopted for the proposed network modelling as it is used to model the FFANN networks.
- 2. Entering the input data representing different values of solar cell temperature ranging [0-60 °C] and solar irradiance ranging [300- 1000 W/m²]. The input data size was 400 samples arranged in a matrix.

In addition, network output data representing VMPP has been extracted. Where the values of VMPP were obtained since they are considered solutions to the following equation:

At MPP:
$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$$
 (3)

- 3. The entered data were randomly divided into three groups: the training set, the validation set and the testing set, with 70% for the training set and 15% for each of the validation and testing sets.
- 4. The training function "trainlm" representing the "Marquardt Levenberg" algorithm was chosen. This algorithm is widely used in training the FFANN because it has a high speed to reach the optimal solution. The "tansig" activation function in the hidden layer and the "purelin" linear activation function in the output layer are also adopted.
- 5. Determining the number of neurons in the hidden layer experimentally by changing the number of these neurons and training the network until the optimal performance index is obtained.

Three scenarios are adopted to build FFANN, all of which contain an input layer with two neurons and an output layer with one neuron, while the number of neurons in the hidden layer varies from two to three to four, as shown in Table 1. The values of MSE and R were also relied upon in the training, validation and testing phase to approve the final network architecture.

		P1	abco.			
Network architecture	Train	ning phase	Validation phase		Testing phase	
(# of neurons in layers)	R	MSE	R	MSE	R	MSE
2-2-1	0,99993	7,6812 ×10-4	0,99996	3,5487 ×10-4	0,99994	6,2407 ×10 ⁻⁴
2-3-1	0,99997	1,2547 ×10-5	0,99998	1,5025 ×10-5	0,99997	1,3964 ×10-5
2-4-1	1,000	1,9736 ×10-6	1,000	2,8671 ×10-6	1,000	3,0572 ×10-6

 Table (1): the network training scenarios with MES and R values in the training, validation, and testing phases

From Table 1, it is clear that increasing the number of hidden layer neurons minimizes the value of MSE but increases the size and complexity of the network, so the last scenario (4 neurons in the hidden layer) is adopted since it gives the optimal performance index. The figure 2 shows FFANN architecture used in the study.



Figure 2. The proposed FFANN technique structure

Figure 3 shows the performance curve of the FFANN model corresponding to the approved training scenario. It includes the training process curve, validation process curve, testing process curve, and the best values curve. It is clear from Figure 3 that all the curves converged to the MSE value equal to (MSE=1.896×10⁻⁵) under 1000 epochs.



Figure 3. The neural network performance curve for the three groups (training-validation-testing).

Figure 4 shows the value of the correlation coefficients for the three groups (training-validation-testing) equal to one, which proves the accuracy of the proposed FFANN model.

After the training process and obtaining the optimal FFANN model, the weights and offsets obtained in training stage were adopted and used in the model simulation in the MATLAB/ Simulink environment. The final approved FFANN model is shown in Figure 5.



Figure 4. Correlation coefficients for the three groups (training-validation-testing).



Figure 5. The FFANN model adopted in MATLAB

4. DIRECT CONTROL TECHNIQUE

To achieve the MPP under rapid climate changes, the duty cycle used to control the DC-DC converter must be precisely determined. For this purpose, the direct control technique is used to determine the optimal value of the duty cycle based on comparing the output voltage of the PV system (V_{PV}) with the optimum voltage produced by the FFANN model (V_{MPP}). Based on the difference between the two values, the duty cycle is changed, increasing or decreasing by a fixed step. Figure 6 shows the flowchart of this technique and its work principle.



Figure 6. The flowchart of the direct control technique.

5. FUZZY LOGIC-BASED MPPT TECHNIQUE

This controller operates in three phases: fuzzification, rule base table lookup, and defuzzification [32-33]. In the fuzzification phase the numerical input variables are converted into linguistic variables based on a membership function, as shown in Figure 7. In this study, five fuzzy levels are used: PS (Positive Small), NS

(Negative Small), PB (Positive Big), NB (Negative Big), and ZE (Zero). To increase the accuracy, more fuzzy levels can be used, but this will increase the processing time.



Figure 7. The Membership function for inputs and output of the fuzzy logic algorithm.

The a & b in Figure 7 represent the range of the numeric variables. The inputs of the fuzzy logic-based MPPT controller are error (E) and change in error (Δ E). Where E and Δ E are calculated based on expert experience.

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)}$$

And

$$\Delta E = E(n) - E(n-1)$$

After calculating E and Δ E they will be converted into language variables. The changes in duty cycle Δ D which represent the output of the fuzzy controller can be obtained from the rule base shown in Table 2.

According to the knowledge of the user and converter used, the change in duty cycle ΔD is determined for the different combinations of E and E. Depending on the proposed membership function shown in Figure 7, the linguistic variables are converted into numerical variables during the defuzzification phase. The generated PWM signal will control the power converter to achieve the MPP.

Table (2): The fuzzy logic algorithm rule base.					
ΔE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

6. INCREMENTAL CONDUCTANCE (IC)-BASED MPPT TECHNIQUE

The basic principle of this technique is based on the fact that the differential of the P_{PV} with respect to V_{PV} is zero at the MPP, negative on the right of the MPP, and positive on the left of the MPP, as follows: [34]

$$rac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0, \qquad at \; MPP. \ rac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0, \qquad left \; of \; MPP.$$

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0, \qquad right of MPP.$$

By calculating the differential at different instants, the MPP can be achieved as shown in Figure 8.



Figure 8. The work principle of IC algorithm

7. MODEL OF THE SYSTEM

The schematic diagram of the system to be modelled in the MATLAB environment is shown in Figure 9. The DC/DC boost converter is inserted between the PV modules and the load to perform an adaptation between them. By controlling the duty cycle of the switching elements, the operating point of the system can be kept at the MPP. The input-output equation of the DC-DC boost converter is:

$$V_{PV} = (1 - D) \times V_0$$

Here, V_{PV} is the PV panel output voltage, V_0 is the DC-DC boost converter output voltage, and D is the duty cycle.



Figure 9. Schematic diagram of the MPPT system

Using the general mathematical equation for the photovoltaic cell, the photovoltaic panel was modelled in MATLAB/Simulink. The studied PV system consists of 74 solar cells connected in series. The maximum power generated by the PV system under standard climatic conditions (irradiance= 1000W/m² and Temperature = 25°C) was 150 W. To test the proposed system under rapidly changing climatic conditions and compare it with IC-based MPPT and FL-based MPPT systems, the characteristics of the PV panel are drawn out in two cases. The first case is under constant temperature (25°C) and variable irradiance levels (400, 600, 700, 800, 900, and 1000W/m²), while the second case is under constant irradiance (850 W/m²) and variable temperature levels (25, 35, 45, and 55°C) as shown in Figures 10 and 11 respectively. The different levels of temperature and solar radiation were applied for 12 secs., as shown in Figures 12 and 13, respectively.



Figure 10. The P-V characteristics of the modelled PV panel under variable irradiance levels



Figure 11. The P-V characteristics of the modelled PV panel under variable temperature levels



Figure 12. The applied different levels of solar irradiance.



The whole system was modelled and simulated using MATLAB/Simulink. In the simulation phase, the three MPPT techniques were tested and evaluated under the two cases mentioned.

8. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

Before presenting the simulation results of the three controllers, the ability of the FFANN model to estimate the VMPP under rapidly changing climatic conditions will be introduced. The estimated voltage $(\overline{V_{MPP}})$ was measured by the FFANN model and compared with the theoretical value (V_{MPP}) , and then the MSE was calculated. Table 3 shows a comparison between the $\overline{V_{MPP}}$ and the V_{MPP} under variable irradiance levels and constant temperature T= 25°C. While Table 4 shows the comparison under variable temperature and constant irradiance (850 W/m²). The results showed that the MSE values are close to zero, which means that the $\overline{V_{MPP}}$ values measured by the FFANN model are almost identical to the theoretical values, which reflects the high accuracy of the FFAAN model in estimating the VMMP under rapid climate changes.

Irradiance (W/m ²)	Theoretical values (V_{MPP})	Estimated values $\widehat{V_{MPP}}$	$(\widehat{V_{MPP}} - V_{MPP})^2$	
400	37.4051	37.3984	0.04489×10-3	
600	37.3948	37.4014	0.04356×10-3	
700	37.3929	37.3989	0.036×10-3	
800	37.4102	37.4093	0.00081×10-3	
900	37.3986	37.4016	0.009×10-3	
1000	37.4026	37.3976	0.025×10-3	
$MSE = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (\widehat{V_{MPP}} - V_{MPP})^2 = 0.02654 \times 10^{-3}$				

Table 3: Values of the V_{MPP} and the V_{MPP} under variable irradiance levels and constant temperature (T= 25°C)

		1	
Temperature (°C)	Theoretical values (V_{MPP})	Estimated values $\widehat{V_{MPP}}$	$(\widehat{V_{MPP}} - V_{MPP})^2$
25	37.4161	37.4019	0.20164×10 ⁻³
35	36.3894	36.3906	0.00144×10 ⁻³
45	35.2709	35.2651	0.03364×10 ⁻³
55	34.1069	34.0948	0.14641×10 ⁻³
	$MSE = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (\widehat{V_{MPP}} -$	$V_{MPP})^2 = 0.09578 \times 10^{-3}$	

Table 4: Values of the V_{MPP} and the V_{MPP} under variable temperature and constant irradiance (850 W/m²)

The significant aim of this study is to investigate an efficient and high-performance MPPT system under rapid climate change to optimize the use of the solar energy system. To evaluate and analyze the proposed FFANN technique and compare it with IC-based MPPT and FL-based MPPT, an offline simulation was performed in MATLAB/Simulink for each technique.

Figure 14 shows the simulation results for the three systems under constant temperature (T = 25 °C) and different irradiance changes according to the following values (400, 600, 700, 800, 900, 1000 W/m²) for 12 seconds. It can be seen that the FFANN technique was able to detect and track MPP despite the instantaneous change in irradiance. In addition, the energy extracted from solar panels is greater when using FFANN than with other techniques. The simulation results indicate that the steady-state oscillation at the MPP was less when using the FFANN technique, resulting in lower energy loss and increased system efficiency. Furthermore, the proposed FFANN technique achieves better transient state behavior for the PV system, as its convergence speed to the MPP was higher compared to the IC-based MPPT and FL-based MPPT techniques. This is due to the accuracy and speed of the FFANN technique in determining an appropriate duty cycle as shown in Figure 15. This in turn leads to effective control of the DC-DC converter and making the operating point precisely at MPP regardless of rapid changes in irradiance.



Figure 14. The produced power under variable irradiance levels and constant temperature (T = 25 °C).



Figure 15. Changing the duty cycle under variable irradiance and constant temperature.

In other atmospheric conditions corresponding to the temperature changes of the solar cell according to the values (25, 35, 45, 55 °C) with constant irradiance (850 W/m²), as shown in Figure 16, the proposed FFAAN technique achieves better dynamic performance, as the working point converges to the MPP in less time compared to the IC-based MPPT and FL-based MPPT. Moreover, the proposed technique showed a better response speed to sudden changes in temperature and its ability to quickly achieve the optimum duty cycle, as shown in Figure 17.



Figure 16. The produced power under variable temperature and constant irradiance (850 W/m²).



Figure 17. Changing the duty cycle under variable temperature and constant irradiance.

A comparison between the three techniques in terms of tracking efficiency and convergence speed is presented in Table 5. Where the proposed technique shows better results in terms of tracking efficiency and convergence speed.

Technique	Tracking efficiency	Convergence speed
FFANN	99.9 %	0.15 sec
Fuzzy logic	94 %	0.45 sec
Incremental conductance	91.5 %	1 sec

Table 5: Comparison of the three techniques in terms of tracking efficiency and convergence speed.

Finally, although the IC-based MPPT and FL-based MPPT techniques were somewhat capable of capturing and tracking MPP under variable atmospheric conditions, the results showed that the proposed FFANN technique has better performance in terms of tracking efficiency and convergence speed. In this regard, the oscillations present in the FFANN were also less than in the other techniques. Moreover, the response to the rapid changes in climatic conditions was better.

9. CONCLUSION

In this research work, a new MPPT technique based on a feed-forward artificial neural network (FFANN) and a direct control technique is proposed to predict and track the maximum power point of the PV panel under rapidly changing climatic conditions. Using the accurate element models, the system was simulated in MATLAB/Simulink environment and the results were collected. The FFANN model is trained to estimate the optimum value of the PV output voltage (V_{MPP}). Through the training, the FFANN model exhibited a high accuracy in predicting the V_{MPP} . Using The direct control technique, the optimal adjustment of the duty cycle was achieved, therefore, the dynamic performance of the MPPT system improved. The outcome indicates that the proposed method exhibited superiority in extracting the maximum available power from the PV panel. A comparison is made between the proposed method and the FL-based MPPT and IC-based MPPT methods. According to the obtained simulation results, the tracking accuracy of the FFANN technique was robust under different atmospheric conditions compared to conventional FL and IC methods. As a result, the tracking

efficiency of the new method is 99.9%, while it is 94% and 91.5% for FL and IC methods, respectively. In addition, the converging speed of the proposed method has been enhanced compared to FL and IC methods. Finally, optimizations are proven to be easy to design. Future efforts will be directed towards experimental implementing of the proposed method. Experimental results will be obtained to demonstrate the accuracy and effectiveness of the new method to increase the efficiency and yield of the solar generation system.

Declaration of Ethical Standards

The author declares that the study complies with all applicable laws and regulations and meets ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

The author contributed to the design and modelling of the system, the analysis of the results and the writing of the manuscript.

Declaration of Competing Interest

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.

Funding / Acknowledgements

The author declares that he has no financial support.

Data Availability

Data will be made available on request.

REFERENCES

- [1] S. D. Al-Majidi, M. F. Abbod, and H. S. Al-Raweshidy, "A particle swarm optimisation-trained feedforward neural network for predicting the maximum power point of a photovoltaic array," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 92, p. 103688, 2020.
- S. Messalti, A. Harrag, and A. Loukriz, "A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 221-233, 2017.
- [3] M. H. Zafar *et al.*, "A novel meta-heuristic optimization algorithm based MPPT control technique for PV systems under complex partial shading condition," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101367, 2021.
- [4] P. Bahrani and N. Jain, "Performance analysis of P&O and FLC method of MPPT for PV module based on five-parameter model," in *Proceedings of international conference on computational intelligence and emerging power system*, 2022, pp. 357-369: Springer.
- [5] A. Kulaksız, G. Gökkuş, and F. Alhajomar, "Rapid control prototyping based on 32-Bit ARM Cortex-M3 microcontroller for photovoltaic MPPT algorithms," 2019.
- [6] R.-M. Chao, S.-H. Ko, H.-K. Lin, and I.-K. Wang, "Evaluation of a distributed photovoltaic system in grid-connected and standalone applications by different MPPT algorithms," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1484, 2018.

- [7] M. B. Hayat, D. Ali, K. C. Monyake, L. Alagha, and N. Ahmed, "Solar energy A look into power generation, challenges, and a solar-powered future," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 3, pp. 1049-1067, 2019.
- [8] F. Alhaj Omar and A. A. Kulaksiz, "Experimental evaluation of a hybrid global maximum power tracking algorithm based on modified firefly and perturbation and observation algorithms," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, no. 24, pp. 17185-17208, 2021.
- [9] A. M. O. Anwer, F. A. Omar, and A. A. Kulaksiz, "Design of a fuzzy logic-based MPPT controller for a PV system employing sensorless control of MRAS-based PMSM," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 18, no. 11, pp. 2788-2797, 2020.
- [10] M. H. Alsharif, K. Yahya, and Z. W. Geem, "Strategic market growth and policy recommendations for sustainable solar energy deployment in South Korea," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 803-815, 2020.
- [11] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. D. Babu, "Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques," *Solar Energy*, vol. 191, pp. 596-622, 2019.
- [12] M. A. Basit, S. Dilshad, R. Badar, and S. M. Sami ur Rehman, "Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 6, pp. 4132-4162, 2020.
- [13] Y. Wan, M. Mao, L. Zhou, Q. Zhang, X. Xi, and C. Zheng, "A novel nature-inspired maximum power point tracking (MPPT) controller based on SSA-GWO algorithm for partially shaded photovoltaic systems," *Electronics*, vol. 8, no. 6, p. 680, 2019.
- [14] H. H. Ammar, A. T. Azar, R. Shalaby, and M. I. Mahmoud, "Metaheuristic optimization of fractional order incremental conductance (FO-INC) maximum power point tracking (MPPT)," *Complexity*, vol. 2019, 2019.
- [15] F. AlhajOmar, G. Gökkuş, and A. Kulaksız, "Performance Evaluation of P&O, IC and FL Algorithms used in Maximum Power Point Tracking Systems," in *International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18), Konya, TÜRKİYE,* 2018, pp. 286-289.
- [16] S. Motahhir, A. El Hammoumi, and A. El Ghzizal, "The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm," *Journal of cleaner production*, vol. 246, p. 118983, 2020.
- [17] A. Harrag and S. Messalti, "Variable step size modified P&O MPPT algorithm using GA-based hybrid offline/online PID controller," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1247-1260, 2015.
- [18] I. Houssamo, F. Locment, and M. Sechilariu, "Experimental analysis of impact of MPPT methods on energy efficiency for photovoltaic power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, pp. 98-107, 2013.
- [19] A. Mellit and S. A. Kalogirou, "MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: Review of current status and future perspectives," *Energy*, vol. 70, pp. 1-21, 2014.
- [20] F. A. Omar, N. Pamuk, and A. A. KULAKSIZ, "A critical evaluation of maximum power point tracking techniques for PV systems working under partial shading conditions," *Turkish Journal of Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 73-81, 2023.
- [21] V. Jately, B. Azzopardi, J. Joshi, A. Sharma, and S. Arora, "Experimental analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111467, 2021.
- [22] M. Abdel-Salam, M.-T. El-Mohandes, and M. Goda, "An improved perturb-and-observe based MPPT method for PV systems under varying irradiation levels," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 547-561, 2018.

- M. A. Bakar Siddique, A. Asad, R. M. Asif, A. U. Rehman, M. T. Sadiq, and I. Ullah,
 "Implementation of incremental conductance MPPT algorithm with integral regulator by using boost converter in grid-connected PV array," *IETE Journal of Research*, pp. 1-14, 2021.
- [24] D. Baimel, S. Tapuchi, Y. Levron, and J. Belikov, "Improved fractional open circuit voltage MPPT methods for PV systems," *Electronics*, vol. 8, no. 3, p. 321, 2019.
- [25] M. M. Shebani, T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, "Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems," in 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2016, pp. 1-5: IEEE.
- [26] A. Gupta, P. Kumar, R. K. Pachauri, and Y. K. Chauhan, "Performance analysis of neural network and fuzzy logic based MPPT techniques for solar PV systems," in 2014 6th IEEE power India international conference (PIICON), 2014, pp. 1-6: IEEE.
- [27] T. T. Yetayew, T. Jyothsna, and G. Kusuma, "Evaluation of Incremental conductance and Firefly algorithm for PV MPPT application under partial shade condition," in 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), 2016, pp. 1-6: IEEE.
- [28] M. Mokhlis, M. Ferfra, H. A. Vall, C. C. Ahmed, and A. Taouni, "Comparative study between the different MPPT techniques," in 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), 2020, pp. 1-6: IEEE.
- [29] C. B. Prasad, S. K. Sonam, B. R. G. Reddy, and P. Harika, "A fuzzy logic based MPPT method for solar power generation," in 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2017, pp. 1182-1186: IEEE.
- [30] S. Ozdemir, N. Altin, and I. Sefa, "Fuzzy logic based MPPT controller for high conversion ratio quadratic boost converter," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17748-17759, 2017.
- [31] S. A. Rizzo and G. Scelba, "ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 124-132, 2015.
- [32] M. Kumar, S. Kapoor, R. Nagar, A. J. I. J. o. A. R. i. E. Verma, Electronics, and I. Engineering, "Comparison between IC and fuzzy logic MPPT algorithm based solar PV system using boost converter," vol. 4, no. 6, pp. 4927-4939, 2015.
- [33] M. K. Al-Nussairi, R. Bayindir, and E. Hossain, "Fuzzy logic controller for Dc-Dc buck converter with constant power load," in 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017, pp. 1175-1179: IEEE.
- [34] A. Safari and S. J. I. t. o. i. e. Mekhilef, "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter," vol. 58, no. 4, pp. 1154-1161, 2010.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ABSORPTION AND THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF NANOPARTICLES WITH MOTOR OIL BASED NANOFLUIDS

^{1*}Jasim Mohammad Abid ALENEZY^(D), ²Rafet YAPICI^(D), ³Amar Hasan HAMEED^(D)

Konya Teknik University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department, Konya, TÜRKİYE ¹jas99649468500moh@gmail.com, ²ryapici@ktun.edu.tr, ³dr.eng.amar@gmail.com

Highlights

- This study investigated the physical properties of two types of engine oil nanofluids.
- Different types of theoretical models were utilized and compared with the experimental results.
- This study focuses on finding the absorbance, specific heat capacity, thermal conductivity and viscosity experimentally.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ABSORPTION AND THERMAL ANALYSIS OF DIFFERENT TYPES OF NANOPARTICLES WITH MOTOR OIL BASED NANOFLUIDS

^{1*}Jasim Mohammad Abid ALENEZY^(D), ²Rafet YAPICI^(D), ³Amar Hasan HAMEED^(D)

¹ Konya Teknik University, Engineering and Natural Sciences Faculty, Mechanical Engineering Department, Konya, TÜRKİYE ¹jas99649468500moh@gmail.com, ²ryapici@ktun.edu.tr, ³dr.eng.amar@gmail.com

(Geliş/Received: 19.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.11.2022)

ABSTRACT: Nanofluids are fluid suspensions of nanoparticles that exhibit notable properties enhancement even at low nanoparticle concentrations. This work compares the measured and calculated thermophysical parameters of nanofluidic motor oil. Thermophysical parameters of motor oils include thermal conductivity, viscosity, and Absorbance. The nanofluidic engine oil was prepared by dispersing multi-walled carbon nanotube (MWCNTs) and copper oxide (CuO) at different particle concentrations (0.03-0.12) %. The oil characteristics were measured at wide range of temperature. The viscosity data were found to be comparable to the numbers reported in literature. We found that the thermal conductivity increased up to five times with minor variance in some cases. The variation in thermal conductivity can be related to several reasons such as oil specifications and nanofluid preparation conditions. The measured Absorbance of the nanofluid is comparable to literature and has direct proportion relation with the volume fraction of nanoparticles.

Keywords: Absorption, Nanofluid, Thermal Conductivity, Viscosity

1. INTRODUCTION

In 1995, Choi introduced the concept of nanofluid [1], which is created by adding a certain amount of nanoparticles to the conventional working fluids such as, ethylene glycol, water, oils (like transformer oil, engine oil, paraffin oil and SAE oil) etc. The unique thermophysical properties of nanofluids and prospective applications related to heat transfer and mass transfer have increasingly attracted researchers in the past decade. Therefore, many researchers focused on investigation of thermophysical properties of nanofluid, like viscosity, absorption, thermal conductivity, etc. Engine oils are employed in more fields because of they function well in high-temperature environments and can be integrated into heat transfer systems at lowpressure. Also, when these oils mixing with nanoparticles, the specific heat capacity of this fluids decreases while the thermal conductive, density and viscosity are increases. In previous studies, many researchers have focused on dynamic viscosity and thermal conductivity. There are some literatures searched about absorption of nanofluids too. An abundance of studies and investigations have been conducted about using the nanofluid in more application as shown as in this works. Hemmat is investigated the thermal properties of MWCNT/SiO₂-oil nanofluid [2]. The samples demonstrated non-Newtonian behaviour at volume fraction above 1%, while at lower concentrations (1%), the examined nanofluid behaved like a Newtonian fluid. The use of MWCNT-ZnO/oil as a nanofluid was studied by [3]. This investigation determined that the nanofluid behaves like a Newtonian fluid via a wide temperature and concentration ranges. [4] investigated the dynamic viscosity of oil with MWCNT/SiO2. They performed tests at varying temperatures and in varying concentrations. In addition, they put up a novel relation for estimating the dynamic viscosity of nanofluid at temperatures between (25 - 60) °C and volume fraction range (0-1) %. [5] conducted experimental research into the thermal characteristics of MWCNT between (40 - 100) °C by used motor oil with MWCNT as a

nanofluid and varying volume fractions (0.1, 0.2, and 0.4%). [6] studied on the thermal performance of nanofluid ZnO with engine oil (10W40). The range of experimental conditions included volume fraction range (0.25-2) % and temperature range (5-55) °C. [7] studied on the thermal characteristics of hybrid nanoparticles MWCNT-SiO₂ with engine oil (20W50) at temperatures range (40 - 100) °C and different volume fractions from (0.05-1) % MWCNT-SiO₂. As a rule, absorbance of nanofluid enhancement with volume fraction of nanoparticles increase; however, this relationship is not linear. Added for that, increasing in the absorbance of nanofluid does not always coincide with the number of nanoparticles added. Nanofluid absorption coefficients made from composite nanoparticles (TiO₂, TiO₂/Ag, and Ag) were compared with [8]. They found that the TiO₂/Ag nanoparticle composite has exceptional optical characteristics, and they studied how changing the nanofluid volume percentage affected light absorption. An increase in volume fraction was shown to be related with an incremental improvement absorption of nanofluid. [9] studied the physical characteristics for CNT with water as a nanofluid at different volume fraction ratios. It was found that absorption is linear proportional to the nanoparticle volume fraction. The optical characteristics of MWCNTs were studied by [10], but they utilized a different base fluid. The base fluid comprised EG, water, therminol-VP-1, and propylene glycol. They mentioned that MWCNT-containing nanofluids are the most comprehensive absorbers of solar radiation across the spectrum. Small particle size and low concentrations did not prevent these nanofluids from absorbing nearly one hundred percent of the solar spectrum's energy. The optical characteristics of SWCNHs nanoparticle into water and glycol are studied by [11]. This research establishes the linear relationship between volume fraction or CNT particle size and light absorption. Researchers looked at how the size of SWCNHs [12] suspended in water affected their ability to soak up the light. In this research, it has been shown that the absorption coefficient is directly related with sizing of the nanoparticles; however, due to the enormous amount of scattering experienced by such massive particles, this relationship does not hold. The optical characteristics of the single-walled carbon nanotube (SWCNT) were examined by [13] using CuS as a base nanofluid. absorption was shown to be boosted for CuS nanofluids. Compared to Cu and SWCNT, SWCNT-CuS nanofluids performed better and absorbed more sunlight. Distilled water was employed as the nanofluid in an experiment by [14] to study carbon black's optical and photo-thermal characteristics. Carbon and water-based nanofluids exhibited a high absorption range and low transmission of solar radiation. [15] investigated on the physical characteristics of nanofluid at lower and higher temperature range. Light absorption was dramatically enhanced by including SWCNT. Karami used CuO with H2O-EG as a nanofluid at 0.01 vol.% improved the absorbed energy for nanofluid to 13.7% [16]. This study deals with two types of nanofluids, each having a specific ratio of volume fraction of nanoparticles, were used to test the effects of nanoparticles on thermal conductivity, viscosity, and Absorbance. This data was also compared to earlier findings and discussed. The aim of this study to clarify of the enhancement of Absorbance and thermal properties of nanofluids by added two types of nanoparticles separately to the engine oil (5W30).

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Material

Several distinct nanoparticle kinds were mixed with engine oil (5W30) at varying volume fractions (0.03, 0.06,0.09, and 0.12) to test the thermal and optical properties of nanofluids. CuO is used as a metallic nanoparticle and MWCNT as a non-metallic nanoparticle. Table 1 explains the physical specificities of nanofluid contains (nanoparticles and base fluid).

Table 1.	Physical spec	cificities of base flu	id and nanoparticles.		
	Nanoparticle types			Base fluid	
Compounds	Compounds		MWCNT	5W30	
		Main properties			
Manufacturing Company		Nanografi nanot	technology company	Motul	
Purity		99.995%	>99%	100% Synthetic	
Morphology		Spherical	Cylindrical	Liquid	
Particle Size (OD)	nm	15-45	18-28		
(ID)	nm		5-10		
Length	μm		15-35		
	Ther	mophysical prope	rties		
Density	g/cm ³	6.5	2.2	0.851	
Specific heat	J/Kg. kº	531	711	1946.97	
Thermal conductivity	W/m. Kº	33	3000		
Viscosity at 40°C	mm²/s	0	0	70.1	
Viscosity at 100°C	mm²/s	0	0	12.1	
Viscosity HTHS at 150°C	mPa.s	0	0	3.5	
Refractive Index (n)		2.6	2.5	1.47	
Color		Dark brown	Black	Dark yellow	

2.2. Preparation and specifics of studied nanofluids

The preparation of samples conducted by used of the physical dispersion method through the ultrasonic solicitation. The preparation of nanofluid happened in the advanced technology research and application centre at Selcuk University. In this work used the measuring device is accuracy is up to 0.0001 and the model of ultrasonic device is a WUC-D10H Ultrasonic Cleaner. The operating condition of the ultrasonic frequency is a 60% from design power. The mixture time is two hours and temperature range of preparation process at (24-40) ° C.

2.3. Measurements of thermophysical properties

In this study, focusing on three properties thermal conductivity, viscosity, and absorption.

2.3.1. Thermal conductivity

Nanofluid thermal conductivity was measured by using a Hot Disk TPS 500 model. These tests were carried out in the laboratories of the College of Science at the University of Anbar. The Hot Disk Thermal Constants Analyzer is the transient plane source (TPS) thermal characterization technique. The Hot Disk sensor factionalized as a heat source and as a dynamic temperature sensor. The measurement happened by running an electrical current lead to increase the temperature sensor up to several degrees and recording the increasing of resistance (temperature)with time. That represents a temperature function with time. During measurements processes used TPS sensor, was 5501 (radius 6.4 mm). The tests were performed at a room temperature of 21 °C.

2.3.2. Viscosity

The viscosity of these types of nanofluids is measured by using a Rotational Viscometer NDJ-4. It is a device used to find the dynamic viscosity of fluid at different temperature ranges also, for fluids whose viscosity value does not vary according to different flow conditions. These tests were carried out in the thermodynamics laboratory at Konya Technical University. This device is used to find the dynamic viscosity in many applications such as painting, engine oil, plastic grease..., etc. The tests calculate dynamic viscosity of the nanofluid in the temperature range (9 - 80) °C and the volume fraction range (0.03-0.12) %.

2.3.3. Absorption of nanofluids

To study nanofluid absorption, researchers varied path depth, base fluid types, and volume fraction. Researchers have found that higher metal oxide particle concentrations result in more excellent nanofluid absorption. All absorption experiments were performed in the SPL laboratory in the advanced technology research and application center at Selcuk University by used Biochrom Libra S22 Visible Spectrophotometer and these tests happened at room temperature approximately 22 °C.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Thermal conductivity

The transient hotwire approach represents the most popular method for measuring thermal conductivity [17] as it characterized by fast calculation and high precision in repetitive observations. Nanoparticle material, size, shape, and volume fraction ratio has significant effect on thermal conductivity. Past research has developed many models that allow the thermal conductivity values to be computed for various concentrations and environmental circumstances. Many scholars, however, have doubts about these numbers' accuracy [19-20]. Measurements of conductivity for engine oils have been reported in the literature, showing maximum values between 0.12 and 0.16 (W/ m.°k) that shift with temperature. The values obtained from experiments are 0.141 (W/ m.°k) and 0.142 (W/ m.°k), respectively. So, the value found in experiments is reasonable for this oil. The figure below compares the results of various tests performed on thermal conductivity.

As mentioned earlier, there are a lot of previous studies in verifying thermal conductivity, but most studies show that there are still contradictions, so the systematic experimental study of thermophysical properties of nanofluids is required to develop previous models and find other parameters to improve the thermal properties of industrial oils. Below are some of basic models used to estimate the thermal conductivity, which can be compared with our experimental results.



Figure 1. Comparison of the test results of previous studies on thermal conductivity

For the calculation of thermal conductivity there are two methods, the first method used a static model, which assume a stationary of nanoparticles in the base fluid such as Maxwell, Hamilton Crosser, and other researchers such as Jang and Prasher models [21], depend on random motion of the nanoparticles in fluid (Brownian motion) by using dynamic models. The maxwell model [20] was considered for the suspension, with low concentration of solid spherical particles homogeneously dispersed with no interaction between particles. The following equation gives Maxwell model:

Where K_{nf} , K_{bf} and K_{np} are the thermal conductivity of nanofluid, base fluid and nanoparticle respectively. Also, φ represent the volume fraction of mixture.

Hamilton and Crosser [20] suggested a similar thermal conductivity model for liquids with a little higher concentration by Wasp [19]. The model gives the same result as the Maxwell and Hamilton and Crosser models under spherical particles, with $\psi = 1$

$$K_{nf} = K_{bf} \left(\frac{K_{np} + 2K_{nf} + 2\varphi(K_{np} - K_{nf})}{K_{np} + 2K_{nf} - \varphi(K_{np} - K_{nf})} \right) \dots (2)$$

Hamilton–Crosser proposed a model for a nanofluid mixture of spherical and non-spherical particles by considering particle shape in calculation procedures. The empirical shape factor (n) can vary from 0.5 to 6.0, as shown in nanoparticle shape.

Where K_{nf} , K_{bf} and K_{np} are the thermal conductivity of nanofluid, base fluid and nanoparticle respectively. Also, φ represent the volume fraction of mixture and ψ represents sphericity which is the ratio of the surface area of a sphere to the volume of a sphere. If the nanoparticle is spherical, the empirical shape factor (ψ) = one and equals 0.6, where the nanoparticle shape is the rod. The Hamilton–Crosser (H-C) model is given by:

$$K_{nf} = K_{bf} \left(\frac{K_{np} + (n-1)K_{bf} - (n-1)\varphi(K_{bf} - K_{np})}{K_{np} + (n-1)K_{bf} + \varphi(K_{bf} - K_{np})} \right) \dots (4)$$

[22] recommended a different model for the thermal conductivity of nanofluid with homogeneous spherical particles as following:

$$\varphi(\frac{K_{np}-K_{nf}}{K_{np}+2K_{nf}}) + (1-\varphi) \left(\frac{K_{bf}-K_{nf}}{K_{bf}+2K_{nf}}\right) = 0 \dots (5)$$

But Murshed and researchers offered a simple solution for Bruggeman model as:
$$\operatorname{Knf} = \frac{1}{4} \left[(3\varphi - 1) * \operatorname{Knp} + (2-3\varphi) \operatorname{Kbf} \right] + K_{bf} \frac{\sqrt{\Delta}}{4} \dots (6)$$
$$\Delta = (3\varphi - 1)^2 \left(\frac{K_{np}}{K_{bf}}\right)^2 + (2 - 3\varphi)^2 + 2 + 9\varphi + 9\varphi^2 \right) \left(\frac{K_{np}}{K_{bf}}\right) \dots (7)$$

[23] recommended a model for the thermal conductivity of nanofluids by using CNT as a nanoparticle as; $1-\varphi+2\varphi \frac{K_{np}}{(K_{np}-K_{1})} \ln \frac{(K_{np}+K_{bf})}{2K_{1}}$

K nf = Kbf
$$\left(\frac{1-\varphi+2\varphi(K_{np}-K_{bf})^{1m}-2K_{bf}}{1-\varphi+2\varphi(K_{np}-K_{bf})}\ln(K_{np}+K_{bf})}\right)$$
(8)

Although various models have been tried to predict the experimental results, a general method has not been established to calculate the thermal conductivity of fluids containing a different type of nanoparticle [24], or to predict the influence of the increase of nanoparticle volume fraction. Generally, nanoparticles are used to enhancement of thermal conductivity of fluids by adding them to base fluids. In this study we used enhancement of thermal conductivity ratio (ER) to clarification of effect of adding the nanoparticle. This ratio can be calculated by the following equation:

 $ER \% = (K_{np} - K_{bf})/K_{bf}$ (9)

Figures 2 and 3 showed the experimental results compared with some theoretical models of thermal conductivity for both nanoparticle types (MWCNT and CuO) with engine oil (5W30).



Figure 2. Comparison between MWCNT with 5W30 as a nanofluid and theoretical models of thermal conductivity.



Figure 3. Comparison between CuO with 5W30 as a nanofluid and theoretical models of thermal conductivity.

Figures 2 and 3 showed the enhancement of thermal conductivity when added both nanoparticle types with 5W30. The enhancement rate increased with volume fraction increase. And the enhancement of thermal conductivity for experimental results higher than theoretical models. In previous works, Moghaddam used MWCNT-CuO/Oil (SAE40) as a nanofluid at a temperature limit (25–50) °C for a volume fraction between 0.0625-1%. The enhancement ratio rises to 29.53% [25]. Karami used CuO with H2O-EG as a nanofluid at 0.01 vol.% improved to 4 times [16]. And it was observed that thermal conductivity was enhanced by 44 % at only 0.052 % volume concentration of copper nanoparticles in oil [26]. Zhang dispersed 1 % of multi-walled carbon nanotubes into the oil. The enhancement in thermal conductivity reached to 160 %. In another study reported an enhancement exceeding 250% at 1.0 vol% of MWNTs in oil nanofluid [27]. The measurement of thermal conductivity of MWCNT with 5W30 as a nanofluid indicates some variation in the results between the theoretical models and the experimental results as shown as in figure 2. A similar trend with less deviation between theoretical models and experimental results was observed in CuO nanofluidic oil as shown in figure 3. As we mentioned earlier there are many studies that confirmed the inaccuracy of the conventional equations in calculation of thermal conductivity of nanofluids [18-19]. Munish confirmed that this is due to many reasons that must be studied carefully (effect of nanoparticle size, effect of nanoparticle shape and effect of nanoparticle type). The Xue model of thermal conductivity values are very close to the measured values for these nanofluids. Figure 4 showed the enhancement ratio of thermal conductivity for nanofluids types MWCNT and CuO with 5W30 respectively.



Figure 4. Comparison of experimental results between MWCNT and CuO with 5W30

Figure 4 included the improvement of thermal conductivity by using two types of MWCNT and CuO with type of engine oil (5W30) at different volume fractions. From the figure above, the enhancement of thermal conductivity is affected by increased concentration of nanofluids. And the thermal conductivity values for MWCNT-based nanofluids display a higher value than CuO. Therefore, MWCNT become attractive to many researchers in recent years due to its excellent thermal conductivity.

3.1. Viscosity

As mentioned earlier we used the Rotational Viscometer NDJ-4 to find the viscosity values of fluids. Experiments were conducted with used a temperature sensor had a control precision of 0.1 °C (-80 - +80) °C. In the experimental work the viscosity of fluids measured in the temperature range (10.2-74.5) °C. At first, we measured the viscosity value of base fluid (5W30) and compared with manufacturing values of MOTUL company to confirm assure the viscosity within the recommended range. The difference between experimental results and theoretical models values had been investigated by a deviation analysis using Eq. (6) [28].

 $\mathsf{DEV} = \frac{\mu_{exp} - \mu_{thero}}{\mu_{exp}} * 100\% \dots \dots \dots (10)$

The figure 5 showed the deviation ratio of measured viscosity at temperature range between (0-100) °C. This ratio must be less than 4% [28].



Figure 5. Deviation ratio of measured viscosity from the oil datasheet.

In the figure above, the viscosity values between (80-85) °C can be considered acceptable, but beyond 85°C are not acceptable because the deviation ratio is very high.



Figure 6. The dynamic viscosity as function of temperature and MWCT concentration for 5W30 oil.



Figure 7. The viscosity as function of temperature and CuO particles concentration.
Figures 6 and 7 showed the relation between viscosity measured with temperature at different volume fraction. Both types of nanofluids have a convergent Newtonian behaviour and non-linear relation between dynamic viscosity with temperature which is consistent with all previous studies.

For example, non-linear decrease of the viscosity of nanofluid (MWCNT with engine oil) by increasing the temperature has been reported. This test happened by using a volume fraction ratio of 0 to 1 wt. % in the temperature limit of 25 to 90 °C [29]. Some previous studies neglected a few effects on the nanofluid viscosity (particle weight, size, temperature, particle shape and effect of nanoparticle types [30]. This work discussed the effect of nanoparticle type, and it was found that there is a slight difference between the use of both types as shown as in figure 8. This figure showed the relationship between the difference between the viscosity values of two types of nanoparticles with different of volume fraction.



Figure 8. Measured viscosity at different volume fraction and temperature

To further investigate in the viscosity of nanofluid, a comparison was made between the experimental results and theoretical models. In this study, these theoretical equations have been used.

• Einstein model μ nf = $(1 + 2.5\varphi) \mu$ bf

Where μ_{nf} , μ_{bf} and ϕ represent the dynamic viscosity of nanofluid, dynamic viscosity of base fluid and volume fraction of nanoparticle respectively. This function was appropriate at lower particle volume fraction $\phi < 2\%$ [18].

• Brinkman model
$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(\frac{1}{(1-\varphi)^{2.5}}\right)$$

Extended Einstein equation for average particle volume fraction and μ_{nf} , μ_{bf} and ϕ represent the dynamic viscosity of nanofluid, dynamic viscosity of base fluid and volume fraction of nanoparticle respectively [18].

• Batchelor model
$$\mu_{nf}$$
, = $\mu_{bf} (1 + 2.5 \varphi + 6.5 \varphi^2)$

Considered the effect of Brownian motion of particles for suspension of rigid and spherical particles and μ_{nf} , μ_{bf} and ϕ represent the dynamic viscosity of nanofluid, dynamic viscosity of base fluid and volume fraction of nanoparticle respectively [18].

- Sunder 1 $\mu_{nf} = \mu_{bf} (1+\phi)^{0.68}$
- Sunder 2 $\mu_{nf} = \mu_{bf} (1+\phi)^{1.205}$

Sunder models used Fe3O4 with EG/water at different volume fraction (0-1) % [30].

The figure 9 include the comparison between experimental result and theoretical results for MWCNT with engine oil.



Figure 9 Viscosity results compared with other thermo-optical models for MWCNT nanofluid oil.

From the figures above, we notice that the difference between the experimental results and the results of theoretical models is little, and it is increase with volume fraction increase.

3.2. Absorbance

The intensity of absorption in nanofluids is affected by some factors, type of nanoparticle, size of the nanoparticle, volume fraction, type of base fluid and thickness of nanofluid. In this study focusing on the effect of nanoparticle type, nanoparticle sizing and volume fraction by used the MWCNT and CuO with engine oil. The figures 11 and 12 showed the intensity of absorption for nanofluid types at different volume fraction.



Figure 10. The absorption values for CuO with 5W30 as a nanofluid at different volume fraction ratio and wavelength.



Figure 11. The absorption values for MWCNT with 5W30 as a nanofluid at different volume fraction ratio and wavelength.

From figures above, the effect of nanoparticle types seems obvious, as the absorption intensity of MWCNT particles are better than CuO particles and absorption intensity for both types of nanofluid affected by volume fraction of nanoparticle. The volume fraction of nanoparticle has a positive effect on the absorptivity, and we noted a little change in the wavelength at maximum intensity. The range of this change for MWCNT is (260-400) and for CuO is (260-330) nm. The reason for this change is due to the effect of nanoparticle size and volume fraction ratio, both of which have a direct effect on the wavelength and absorbance. The absorption coefficient can be calculated using equation (11).

Where the L represents the path length through the sample, L is 10 mm for the quartz cuvette used in

Biochrom Libra S22 Visible Spectrophotometer and A _{abs} represent the intensity of absorption. Table 2 explains the absorption coefficient (m⁻¹) values for experimental tests and previous studies for the same nanofluid contents.

Table 2. The absorption coefficient (m ⁻¹) for experimental values and previous studies										
Nanofluid contents		φ%	0.025	0.05	0.055	0.06	0.075	0.09	0.1	0.12
Resulting test	Base fluid 5W30 (motul)	nanoparticle MWCNT	45.81			802		958.7		1077.6
	5W30 (motul)	CuO (15-45) nm	53.2			373		443		668.6
Chen, 2016	WD 350	CuO		75.94		150	214.3 8		345.49	
Xu, 2015	synthetic oil.	CuO (200nm)			103					

As mentioned earlier, there are many factors that affect absorbance values so, there is no way to validity of experimental results except by re-examination. However, some previous studies show some absorbance results. Therefore, if these results are compared with similar nanofluids in previous studies, they can be considered acceptable.

4. CONCLUSION

In conclusion, this study investigated the physical properties of two types of engine oil nanofluids. Different types of theoretical models were utilized and compared with the experimental results. A sweep for particle volume fraction was investigated. The main findings of this work are summarized in the following list.

1. MWCNT and CuO with 5W30 as nanofluids enhances the absorption and thermal properties of the 5W30 oil. The thermal properties of the nanofluid for MWCNT with 5W30 have the same trend as CuO fluid but with a higher magnitude of all measured properties.

2. The theoretical models for thermal conductivity showed inconsistent results between all the utilized models. However, the viscosity models proved to have a great agreement with the experimental results and predicted the viscosity more accurately in the range between $(0-80) \circ C$.

3. The MWCNTs nanofluids has thermal conductivity and absorbance of 2-folds of that for the nanofluid CuO oil.

4. The measured absorption of the nanofluid is affected by different factors such as nanoparticle type, base fluid type, and the volume fraction of nanoparticle. However, our results are still comparable to the reported number in literature.

Nomenclature

φ	Volume fraction.
Ψ	Sphericity
ΔT	Difference of temperature.
СиО	Copper oxide.
MWCNTs	Multi-walled carbon nanotube.
k	Thermal conductivity.
μ	Dynamic viscosity of nanofluid.

Ka	Absorption coefficient.
DEV	Deviation analysis values
EG	Ethylene glycol
ER	Enhancement ratio.
ID	Inlet diameter
OD	Outlet diameter

Declaration of Ethical Standards

The authors paid attention to the ethical rules while writing the manuscript and the authors have full consent to the publication of the manuscript.

Credit Authorship Contribution Statement

All authors worked on this article. For example, Jasim Mohammad Abid ALENEZY and Dr, Amar Hasan HAMEED worked on thermal conductivity. Also, Jasim Mohammad Abid ALENEZY and Prof, Rafet YAPICI worked on other properties.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships.

Funding / Acknowledgements

This article is an original work and all results have not published previously. Also, this study did not receive any funding grants from anyone (whether in the commercial or non-profit sector).

Data Availability

There is no available data.

REFERENCES

- [1] S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Developments and applications of non-Newtonian flows", Conference: Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, 1995, pp. 99- 105.
- [2] M. Hemmat Esfe, M. Afrand, W.-M. Yan, H. Yarmand, D. Toghraie and M. Dahari, "Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO2 (20–80)-SAE40 hybrid nano-lubricant", International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 76, Pages 133-138, August 2016.
- [3] Asadi, "A guideline towards easing the decision-making process in selecting an effective nanofluid as a heat transfer fluid", Energy Conversion and Management, Volume 175, Pages 1-101, November 2018.
- [4] M Afrand, K Nazari Najafabadi and M Akbari," Effects of temperature and solid volume fraction on viscosity of SiO2-MWCNTs/SAE40 hybrid nanofluid as a coolant and lubricant in heat engines, Applied Thermal Engineering, Volume 102, Pages 45-54, 5 June 2016.
- [5] M. Fakoor, Pakdaman, M.A. Akhavan-Behabadi, P. Razi, "An experimental investigation on thermophysical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside

vertical helically coiled tubes", Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 40, Pages 103-111, July 2012.

- [6] M. H Esfe, S. Saedodin, M. Rejvani, J. Shahram, "Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of ZnO/10W40 nano-lubricants for automotive applications", Physical E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Volume 90, Pages 194-203, June 2017.
- [7] K Motahari, M A Moghaddam and M Moradian, "Experimental investigation and development of new correlation for influences of temperature and concentration on dynamic viscosity of MWCNT-SiO2 (20-80)/20W50 hybrid nano-lubricant ",Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume 26, Issue 1,Pages 152-158, January 2018.
- [8] Y Xuan, H Duanb and Q Lib," Enhancement of solar energy absorption using a plasmonic nanofluid based on TiO2/Ag composite nanoparticles", RSC Advances, Issue 31, 2014.
- [9] M. Karami, M.A. Akhavan Bahabadi, S. Delfani and A. Ghozatloo," A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 121, Pages 114-118, February 2014.
- [10] N Hordy, D Rabilloud, J Meunier and S Coulombe, "High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors", Solar Energy, Volume 105 , Pages 82-90 July 2014.
- [11] L Mercatelli, E Sani, G Zaccanti , F Martelli , P Di Ninni , S Barison , C Pagura , F Agresti and D Jafrancesco , "Absorption and scattering properties of carbon nanohorn-based nanofluids for direct sunlight absorbers", Nanoscale Research Letters 2011, 6:282, http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/282.
- [12] E. Sani, S. Barison, C. Pagura, L. Mercatelli, P. Sansoni, D. Fontani, D. Jafrancesco, and F. Francini, "Carbon nanohorns-based nanofluids as direct sunlight absorbers", Optics Express, Vol. 18, Issue 5, pp. 5179-5187, 2010, https://doi.org/10.1364/OE.18.005179.
- [13] Y He, S Vasirajua and L Que, "Hybrid nanomaterial-based nanofluids for micropower generation" ,RSC Advances, Issue 5,Page 2103 to 2576, 2014.
- [14] D Han, Z Meng, D Wu, C Zhang and H Zhu, "Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption", Nanoscale Research Letters 2011, 6:457 http://www.nanoscalereslett.com/content/6/1/457.
- [15] D Wen, G Lin, S Vafaei and K Zhang, "Review of nanofluids for heat transfer applications", Particuology, Volume 7, Issue 2, Pages 141-150, April 2009.
- [16] M. Karami, M.A. Akhavan-Behabadi , M. Raisee Dehkordi , S. Delfani ,"Thermo-optical properties of copper oxide nanofluids for direct absorption of solar radiation", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 144, Pages 136-142, January 2016.
- [17] R.M. Sarviya and V Fuskele, "Review on Thermal Conductivity of Nanofluids", Materialstody proceeding, Volume 4, Issue 2, Pages 4022-4031, part A,2017, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.304.
- [18] M Y Nawaf, "Numerical and experimental analysis of direct absorption concentrated solar collector using nano-fluid", Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [19] M Gupta, V Singh, R Kumar and Z. Said, "A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, Pages 638-670 July 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073.
- [20] S.M.S. Murshed, K.C. Leong and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO2—water based nanofluids", International Journal of Thermal Sciences, Volume 44, Issue 4, Pages 367-373 April 2005, https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005.
- [21] A K Singh, "Thermal Conductivity of Nanofluids", Defence Science Journal, Vol. 58, No. 5, 2008.

- [22] D. Bruggeman, "Dielectric constant and conductivity of mixtures of isotropic materials", Annals of Physics 416 636-791, 1935
- [23] Q Z Xue, "Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites", Physical B: Condensed Matter, Volume 368, Issues 1–4, Pages 302-307, November 2005, https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.07.024.
- [24] I V Belova and G E Murch," Monte Carlo simulation of the effective thermal conductivity in twophase material", Journal of Materials Processing Technology ,Volumes 153–154, Pages 741-745, 10 November 2004, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.191.
- [25] M A Moghaddam and K Motahari, "Experimental investigation, sensitivity analysis and modeling of rheological behavior of MWCNT-CuO (30-70)/SAE40 hybrid nano-lubricant", Applied Thermal Engineering, 2017, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.200.
- [26] J. A. Eastman, SUS Choi, S. Li, W. Yu and L. J. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", Appl. Phys. Lett. 78, 718, 2001, https://doi.org/10.1063/1.1341218.
- [27] F E Lockwood, Z G Zhang, S U Cho, and J C Wang, "Thermal characteristics of new and used diesel engine oils", *Red*, *8*, 10-0,2001.
- [28] I M. Alarifi, A B Alkouh, V Ali, H M Nguyen and A Asadi, "On the rheological properties of MWCNT-TiO2/oil hybrid nanofluid: An experimental investigation on the effects of shear rate, temperature, and solid concentration of nanoparticles", Powder Technology, Volume 355, Pages 157-162, October 2019, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.039.
- [29] S U Ilyas, R Pendyala and M Narahari, "Stability and thermal analysis of MWCNT thermal oil-based nanofluids", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Volume 527, Pages 11-2220, August 2017, https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.004.
- [30] L Yang, J Xu, K Du, X Zhang, "Review Recent developments on viscosity and thermal conductivity of nanofluids", Powder Technology, Volume 317, Pages 348-369, 15 July 2017, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.061.



MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLI VE MİKRO OYUKLU ISI ALICIDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

^{1*}Burak MARKAL^(D), ²Beyzanur KUL^(D)

 ¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE
 ² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE
 ¹burak.markal@erdogan.edu.tr, ²beyzanur_kul19@erdogan.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Konvansiyonel ısı alıcıya (KIA) kıyasla, modifiye edilmiş ısı alıcı (MIA) iki faz ısı transfer katsayısını
 %827.2'ye kadar artırmıştır.
- MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır.
- MIA kabarcık tıkanma problemini ortadan kaldırmıştır ve giriş sıcaklığı ve basıncı için çok düşük standart sapma değerleri sunmuştur.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



Not: Bütün ölçümler mm cinsinden verilmiştir.

MIA; mikro kanatçık ve oyuklar (MIA; micro fin and cavities)



MİKRO PİM TİPİ KANATÇIKLI VE MİKRO OYUKLU ISI ALICIDA DOYMUŞ KAYNAMALI AKIŞIN DENEYSEL İNCELENMESİ

^{1*}Burak MARKAL^(D), ²Beyzanur KUL^(D)

 ¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE
 ² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Rize, TÜRKİYE
 ¹burak.markal@erdogan.edu.tr, ²beyzanur_kul19@erdogan.edu.tr

(Geliş/Received: 26.06.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.11.2022)

ÖZ: Mikrokanallarda kaynamalı akış, hava araçlarındaki yüksek kapasiteli elektronik sistemler, bilgisayar işlemcileri ve elektrikli araç bataryaları gibi yüksek yoğunluklu atık ısının açığa çıktığı sistemlerde, sürdürülebilirlik ve güvenli çalışma koşulları için gerekli olan soğutma çözümlerini sunma potansiyeline sahip popüler bir ısıl kontrol tekniğidir. Bu makalede, farklı kütle (136 ve 250 kg m⁻² s⁻¹) ve ısı akısı (132 – 272 kW m⁻²) değerlerinde deiyonize suyun kademeli olarak genişleyen akış kesitine ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda (modifiye edilmiş ısı alıcı, MIA) doymuş kaynamalı akışı deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar düz duvarlı paralel mikro kanallı ısı alıcı (konvansiyonel ısı alıcı, KIA) üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. İş akışkanının giriş sıcaklığı yaklaşık 75 °C'da sabit tutulmuştur. Yüksek hızlı kamera ile akış görüntüleri alınmış (1000 fps) ve fiziksel mekanizma görüntülerle desteklenerek irdelenmiştir. MIA'da, KIA'ya kıyasla, iki fazlı ısı transfer katsayısında %827.2'ye kadar artış sağlanmış ve kaynama kararsızlıkları etkin bir şekilde bastırılabilmiştir. Isı transferindeki iyileşmeye karşı, basınç düşümünde %50.5'e kadar artış olmuştur. Genel karakter olarak, her iki ısı alıcısında da kütle akısının basınç düşümü üzerindeki etkisi görece ihmal edilebilir düzeyde olup, artan kütle akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. MIA'ya ait sonuçlar, KIA'ya kıyasla, kütle akısındaki değişimden görece daha çok etkilenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kaynamalı Akış, Mikrokanal, Yapay Kabarcıklaşma Odakları, Kesit Genişlemesi

Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Characteristics in Micro Pin Fin and Micro Cavitied Heat Sinks

ABSTRACT: Flow boiling in microchannels is a popular thermal management technique with the potential to provide cooling solutions required for sustainability and safe operating conditions in systems where high-density waste heat is released, such as high-capacity electronic systems in aircrafts, processors of computers, and batteries of electric vehicles. In the present paper, saturated flow boiling of deionized water in a heat sink having gradually expanding flow passage and artificial nucleation sites (modified heat sink, MIA) was experimentally investigated at different mass (136 and 250 kg m⁻² s⁻¹) and heat flux (132 – 272 kW m⁻²) values. Results were comparatively presented via plain wall parallel microchannel heat sink (conventional heat sink, KIA). Inlet temperature of working fluid is kept constant at nearly 75 °C. Flow images were taken via high-speed camera (1000 fps), and the physical mechanism was scrutinized by supporting with the images. Compared to KIA, in the MIA, an improvement in two-phase heat transfer coefficient up to 827.2% is obtained, and flow boiling instabilities could be successfully suppressed. Contrary to enhancement in heat transfer, an increase up to 50.5% occurred for pressure drop. As general character, for both the heat sinks, effect of mass flux on pressure drop is relatively negligible, and heat

transfer coefficients decrease with increasing mass flux. Compared to KIA, results of MIA are relatively more influenced from variation in mass flux.

Keywords: Artificial Nucleation Sites, Expansion of Cross Section, Flow Boiling, Microchannel

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üretim alanındaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak mikro/nano boyutlu bileşenlerin imalatının kolayca gerçekleştirilebilmesi ve dijital sistemlerin fonksiyonelliğine yönelik beklentilerin giderek artması, ısıl kontrolün önemini gün geçtikçe artıran temel faktörler arasında yer almaktadır. Bu sebeple hem mikro sistemlere adaptasyonu kolay hem de yüksek ısı uzaklaştırma potansiyeline sahip ısı transfer mekanizmaları ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda, [1-2] çalışmalarında da ifade edildiği üzere, ultra kompakt yapı sunmaları, doymuş koşullar sebebiyle yüzey sıcaklığının nispeten sabit tutulması, mikro akış pasajları sayesinde birim zamanda mililitre düzeyinde debilerde çalışmaları ve kaynama mekanizması aracılığıyla yüksek ısı uzaklaştırma potansiyeline sahip olmaları sebebiyle mikrokanallarda kaynamalı akış popüler ısıl kontrol teknikleri arasında yer almaktadır. Mikrokanallarda kaynamalı akışlara yönelik çalışmalar, atık ısı yoğunluğunun yüksek olduğu; elektrikli veya hibrit araçlar, roket lüleleri, uzay araçları ve havacılık elektroniği, türbin kanatları, yüksek işlemcili bilgisayarlar ve benzeri sistemleri/cihazları yakından ilgilendirmektedir [3-4]. Bu sebeple, mikrokanallarda kaynamalı akışta performans artışı sağlayacak geometrik düzenlemelere ve geometrik yapıya ek olarak diğer çalışma koşullarının akış ve ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmalara ilgi artmaktadır. Bu kapsamda, özellikle son yıllarda, mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcılarda kaynamalı akış ön plana çıkmaktadır.

[5] çalışmasında kaydırılmış sıralı olarak yerleştirilmiş hidrofoil şekilli pim tipi kanatçıklara sahip ısı alıcıda farklı kütle (976 – 2349 kg m⁻² s⁻¹) ve ısı akılarında (19 – 312 W cm⁻²) R-123 iş akışkanının kaynamalı akışı incelenmiştir. Isı transfer katsayılarının artan ısı akısı ile arttığını ve bir maksimuma eriştikten sonra sürekli olarak azaldığını, düşük ısı akısı değerlerinde kabarcıklı kaynamanın yüksek ısı akısı değerlerinde ise taşınımlı kaynamanın baskın ısı transfer mekanizması olduğunu ve artan kütle akısı ile kritik ısı akısı koşulunun yüksek ısıl güç değerlerine ötelendiğini belirtmişlerdir. [6] çalışmasında kare kesitli mikro boyutlu pim tipi kanatçıklara sahip silikon ısı alıcıda FC-72 iş akışkanı kullanarak kaynamalı akışa yönelik çalışma yapılmıştır. Kanatçıksız ısı alıcı referans olarak dikkate alınmış olup, taban kesiti 30 µm x 30 µm ölçülerinde sabit olan ve yükseklikleri sırasıyla 60 µm ve 120 µm olan kanatçıklardan oluşan iki farklı ısı alıcı üzerinde çalışmışlardır. Kanatçıklı ısı alıcıların kanatçıksız duruma göre ısı transferini iyileştirdiğini ve en yüksek kritik ısı akısı değerinin 150 W cm⁻² olarak 2 m s⁻¹ akışkan hızında ve 35 K aşırı soğutma derecesinde 120 µm kanatçık yüksekliğine sahip ısı alıcı için elde edildiğini göstermişlerdir. [7] çalışmasında pirana pim kanatçık olarak adlandırdıkları kanatçıklara sahip ısı alıcıda HFE7000 iş akışkanının kaynamalı akışı deneysel olarak incelenmiştir. İki farklı akış konfigürasyonunu dikkate almışlardır. Birincisinde, akışkan sadece kanatçıklı bölgede bulunan çıkış deliklerinden ana akış eksenine dik olarak ısı alıcısını terk etmekte olup sızdırma akışı olarak adlandırılmıştır. İkincisinde ise akışkan hem kanatçıklı bölge tabanından hem de kanatçıkların bitiminden sonra açılmış olan geniş bir kanaldan ısı alıcısını terk etmekte olup, açık akış olarak adlandırılmıştır. Sızdırma akışı için elde edilen ısı transfer katsayıları, açık akışa kıyasla daha büyüktür, ancak ısı transferindeki iyileşmeye karşın basınç düşümünde artış meydana gelmiştir. [8] çalışmasında mikro pim tipi kanatçıklı buharlaştırıcıdaki kaynamalı akış incelenmiştir. Akış desenine dayalı yeni bir metot geliştirmişlerdir. Uzun kabarcıklı akış ve halkasal akışla ilgili ısı transfer mekanizmaları dikkate alınmıştır. 7219 veri noktası kullanarak geliştirdikleri model, tüm veri tabanı üzerinden %23.4 ortalama mutlak hata ile verilerin %72'sini tahmin edebilmiştir. [9] çalışmasında FC-72'nin mikro pim tipi kanatçıklı bir ısı alıcıdaki aşırı soğuk kaynamalı akış incelenmiştir. Düşük ve orta düzeyli ısı akısı değerlerinde yer çekiminin kaynamalı akışta ısı transferi üzerinde kabarcıkların yüzeyden ayrılması açısından bir etkisinin olmadığını, yüksek ısı akılı bölgede ısıl performansın düştüğünü ve kanal içindeki kabarcık birikiminin kritik ısı akısına yol açtığını ifade etmişlerdir. [10] çalışmasında pim tipi kanatçıklı bir mikrokanalda kaynamalı akışı deneysel olarak incelenmiştir. Temel olarak yerel ve zaman bağımlı sıcaklık ölçümüne odaklanmış ve bu kapsamda mikro direnç sıcaklık detektörleri kullanmışlardır. Sıcaklık ölçümleri akış görüntüleriyle senkronize olarak alınmıştır. Uzun kabarcıklı akışta çevrimsel sıcaklık çalkantıları gözlemlenmiş olup, bir çevrim iş akışkanının yüzeyi ıslatması, film buharlaşması ve yerel kuruma olaylarını içermektedir. [11] çalışmasında elmas şekilli pim tipi kanatçıklar ile yeniden girişli kesite sahip paralel kanalların bütünleşik formunu içeren bir ısı alıcı tasarlanmıştır. Kütle akısı 125 – 300 kg m⁻² s⁻¹ aralığında değişmekte olup, 40 °C ve 10 °C olmak üzere iki farklı giriş aşırı soğutma derecesinde çalışmışlardır. Özgün geometrili ısı alıcı için elde ettikleri sonuçları konvansiyonel yeniden girişli paralel kanal için elde edilenlerle karşılaştırmışlardır. Su ve etanol kullanılarak yapılan testlerde, özgün geometride konvansiyonel geometriye kıyasla, su için %39 - %284 arasında, etanol için ise %29 - %220 arasında iyileşme (ısı transferi açısından) elde edilmiştir. Isı transferindeki iyileşme, birbiriyle bağlantılı kanal yapısı nedeniyle kabarcık sınırlandırma etkisinin azalmasına ve kabarcık oluşumu için uygun alanlarının varlığına atfedilmiştir. [12] çalışmasında farklı kanatçık kesitlerine sahip mikro pim tipi ısı alıcılarda, deiyonize suyun kaynamalı akışında, kabarcıklı kaynamanın başlangıcı (ONB) incelenmiştir. Dairesel, elmas ve oval şekilli kanatçıklara sahip ısı alıcılar kullanılmıştır. Farklı ısı akısı ve kütle akısı değerlerinde çalışmışlardır. Kabarcıklı kaynamanın daima kanatçıkların çevresinde başladığını görüntülemişlerdir. Kabarcıklı kaynamanın başlangıcı için gerekli olan ısı akısı ve duvar kızma farkının artan kütle akısı ve giriş soğutma derecesi ile arttığını belirtmişlerdir. Dairesel kesitli kanatçıklı yapıda ONB diğer şekillere kıyasla daha düşük ısı akısında gerçekleşmektedir. [13] çalışmasında açık halka tipi kanatçıklardan oluşan ısı alıcı geliştirmiş ve ilgili ısı alıcıda deiyonize suyun kaynamalı akış karakteristikleri incelenmiştir. Hem düz hem de kaydırılmış sıralı pim yerleşimleri dikkate alınmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda, her iki yerleşim düzeninde de ONB'nin 1 – 2 °C gibi oldukça küçük kızma farklarında oluştuğunu, artan ısı akısı ile sırasıyla kabarcıklı kaynama hem kabarcıklı kaynama hem de ince film buharlaşması ve taşınımlı kaynama mekanizmalarının ısı transferi üzerinde etkin rol oynadığını ve kanatçıkların düzgün olarak dizildiği geometrinin hem ısı transferi hem de basınç düşümü açısından kaydırılmış sıralı olana kıyasla avantajlı olduğunu ifade etmişlerdir. [14] çalışmasında sırasıyla 40°, 120° ve 150° temas açılarına sahip elmas şekilli mikro kanatçıklı ısı alıcıda kaynamalı akışta ısı transferi ve akış karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Elde ettikleri sonuçları dairesel, üçgen ve elips formundaki kanatçıklara sahip ısı alıcılarla karşılaştırmışlardır. Film kaynama, geçiş, kabarcıklı kaynama ve tek faz olmak üzere dört farklı akış rejimi görüntülemişlerdir. Hidrofobik yüzey kaplamasının akış direncini azalttığını, temas açısındaki artışın ısı transferi açısından dezavantaj oluşturduğunu, elmas kanat şeklinin buhar kabarcıklarını parçaladığını belirtmişlerdir.

Mikrokanallarda kaynamalı akış, hava araçlarındaki yüksek kapasiteli elektronik sistemler, bilgisayar işlemcileri ve elektrikli araç bataryaları gibi yüksek yoğunluklu atık ısının açığa çıktığı sistemlerde, sürdürülebilirlik ve güvenli çalışma koşulları için gerekli olan soğutma çözümlerini sunma potansiyeline sahip popüler bir ısıl kontrol tekniğidir. Temelde, kompakt hale gelen bileşenlerde/sistemlerde hacim kısıtlaması ve artan ısı akısı probleminin çözümünü hedef alan bir ısıl kontrol tekniğidir. Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü üzere, mikro kanatçıklı ısı alıcılarda kaynamalı akış güncel bir araştırma alanıdır ve ilgili konu kapsamında hem performans artışına yönelik hem de akış mekanizmalarının anlaşılmasına yönelik çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Isı alıcı geometrisinin direkt olarak kabarcık dinamiğini ve dolayısıyla ısı ve akış karakteristiklerini etkilemesi, geometrik-hidrolik-ısıl birlikteliğin karmaşık ilişkisinin/yapısının tam olarak anlaşılamamış olması, geometrik tasarımların ve diğer çalışma parametrelerinin performans artışı üzerindeki etkilerinin açık bir araştırma alanı olması ve benzeri sebeplerle mikro pim tipi kanatçıklı yapılarda kaynamalı akışa yönelik yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, yazarların önceki çalışmalarında [15] çalışmasında literatüre özgün bir ısı alıcı geometrisi sunulmuştur. Kare kesitli pim tipi mikro kanatçıklardan oluşan ilgili ısı alıcıda, akış pasajının kesiti akış doğrultusunda kademeli olarak artmakta ve eksilen kanatçıkların yerinde yapay kabarcıklaşma oyukları bulunmaktadır. Bu çalışmada, ilgili ısı alıcı farklı çalışma koşulları altında incelenmiş olup, çalışmanın temel amacı farklı kütle akıları altında, kademeli olarak genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyukları içeren mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcıda doymuş kaynamalı akış

karakteristiklerini incelemek ve sonuçları düz duvarlı paralel kanallı konvansiyonel ısı alıcı üzerinden karşılaştırmalı olarak sunmaktır. İlgili geometriler, literatürde ilk kez, farklı kütle akıları ve dolayısıyla farklı çalışma koşulları altında incelenmiştir. Yüksek hızlı kamera ile akış görüntüleri alınarak akış desenleri, rejimleri ve sebep olduğu termo-hidrolik davranışlar fiziksel mekanizmalar üzerinden irdelenmiştir. İş akışkanı olarak deiyonize su kullanılmıştır.

2. DENEY DÜZENEĞİ VE HESAPLAMA PROSEDÜRÜ (EXPERIMANTAL SETUP AND PROCEDURE OF DATA ANALYSIS)

2.1. Deney Düzeneği ve Detaylar (Experimental Setup and Details)

Bu makale tamamen deneysel çalışmaları kapsamakta olup, gerçekleştirilen deneylerde kullanılan düzenek Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur. Deney düzeneği üç bölüm olarak tanıtılabilir: (1) iş akışkanını istenilen giriş koşullarında test bölgesine taşıyan akış hattı, (2) akışa ait ölçümlerin alındığı test bölgesi ve (3) görüntülerin alındığı ve ölçümlere ait verilerin depolandığı veri toplama ve görüntüleme bölümü. Aşağıdaki paragraflarda ilgili bölümler detaylandırılmıştır.

Akış hattı ve üzerine yerleştirilen ekipmanlar aracılığıyla iş akışkanı istenilen özelliklerde test bölgesine giriş yapabilmektedir. Akış hattındaki ilk ana bileşen akışkan deposudur. Akışkan deposu 8 µm'lik filtreden geçirilen iş akışkanı (deiyonize su) ile doldurulur. Böylece, olası herhangi kirletici veya yabancı maddelerin iş akışkanından ayrışması sağlanır. Depo, bir ısıtıcı ünite ile bütünleşik formda olup (ısıtıcılı depo), ısıtma özelliği aktif hale getirilerek, iş akışkanı içinde çözünmüş halde bulunan gazların akışkandan ayrılması sağlanır. Bu işleme kaynamalı akış literatüründe gaz alma işlemi adı verilmekte olup, iş akışkanının şiddetli kaynatılmasıyla gerçekleştirilir [16-17]. İşlem sonucunda, iş akışkanı içindeki çözünmüş oksijen miktarı bir oksijen metre ile kontrol edilir. Depo içindeki akışkan dijital sürücülü mikro pompa ile emilerek akış hattına basılır. Dijital sürücünün devir sayısı değiştirilerek akışkanın hacimsel debisi ayarlanır. Aynı zamanda, sistemde bulunan dijital akış ölçerle debi değeri kontrol edilmektedir. Çalışma boyunca akışkanın istenilen sıcaklık değerinde test bölgesine girmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda, hem termal gerilme problemlerinin ortadan kaldırılması hem de istenilen sıcaklık değerinin hassas olarak ayarlanabilmesi için seri olarak yerleştirilmiş iki ön ısıtıcı kullanılmıştır. Ön ısıtıcılar gövde borulu ısı değiştiricisi ve sabit sıcaklık banyosu çiftinden oluşmaktadır. Sabit sıcaklık banyoları aracılığıyla iş akışkanının sıcaklığı istenilen değere kademeli olarak getirilebilmektedir. Akış hattı, ısıtıcılardan itibaren, ısı kayıplarını minimuma indirmek için yalıtılmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan düzeneğin şematik gösterimi **Figure 1**. Schematic demonstration of the apparatus used in the experiments

Deney düzeneğindeki ana bölüm test bölgesi olup, detayları Şekil 2'de görülmektedir. Test bölgesi, çalışmaya temel teşkil eden mikro kanatçıklı ısı alıcıları ve deneylerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan ısıtıcı ve ölçüm ekipmanlarını barındırır.



Şekil 2. Test bölgesinin detaylı gösterimi: (a) kesit görünüş; (b) tam görünüş Figure 2. Details of the test section: (a) partial view; (b) full view

Test bölgesindeki taşıyıcı blok Teflon malzemeden yapılmıştır. Teflon taşıyıcı blok içinde üç bölüm vardır. Birinci bölüm giriş haznesi olup, üç bağlantı portuna sahiptir. Bağlantı portlarının ikisi yanal yüzeyler üzerinde, biri ise tabandadır. Yanal yüzeylerden biri termo-elemanın giriş haznesine yerleşimi içindir ve termo-eleman bu port içerisinden geçirilerek giriş haznesine yerleştirilir. Böylece akışkanın giriş sıcaklığı ölçülebilmektedir. Karşı yanal yüzeyle açılan porta mutlak basınç sensörü bağlanır ve giriş basıncının ölçümünde kullanılır. Tabana açılan kanal ise toplam basınç düşümünün ölçümünde kullanılar.

Teflon bloğun ikinci bölümüne, ısı alıcısına istenilen ısıl gücü uygulamak için bakır ısıtıcı plaka yerleştirilir. Bakır ısıtıcı plaka içerisinde iki kartuş ısıtıcı bulunmaktadır. Kartuş ısıtıcılar dijital olarak kontrol edilip, istenilen güç değerinin kolaylıkla okunabildiği AC güç kaynağı ile tahrik edilmektedir.

Bakır ısıtıcı plakanın üzerine ise ısı alıcı yerleştirilir. Üçüncü bölümde (çıkış haznesi) ise biri yanal yüzeyde diğeri ise tabanda olmak üzere iki port bulunmaktadır. Yanal port çıkış sıcaklığını ölçmede kullanılan termo-elemanın çıkış haznesine yerleşimini sağlamak için kullanılır. Tabandaki port ise diferansiyel basınç sensörünün diğer koluyla bağlantılıdır. Böylece, diferansiyel basınç sensörü kullanılarak toplam basınç düşümü belirlenmiş olur. Test bölgesindeki basınç sensörlerinin DC bir güç kaynağı ile tahrik edildiği belirtilmelidir.

Test bölgesinin kritik parçası ısı alıcıdır. Bu çalışmada iki farklı ısı alıcı kullanılmış olup, detayları Şekil 3'te sunulmuştur.



(c)

Şekil 3. Isı Alıcılara ait detaylar: (a) MIA genel görünüş; (b) KIA genel görünüş; (c) MIA kanatçık ve oyuklar

Figure 3. Details of the heat sinks: (a) general view of MIA; (b) general view of KIA; (c) fins and nucleation sites

Birincisi kademeli genişleyen akış pasajı kesitine ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip ısı alıcıdır ve MIA ile kodlanmıştır. Ana akış doğrultusundaki kademeli genişleme veya kesit alanındaki kademeli artış kanatçık sayısının azalması ile sağlanmaktadır. Toplamda üç bölüm ve iki kademe bulunmaktadır. Birinci bölümde üniform olarak dağıtılmış, 9 sütun ve 10 sıra halinde her biri 200 µm yüksekliğe ve 500 µm uzunluk ve genişlik değerlerine sahip mikro kanatçıklar bulunmaktadır. Dokuzuncu sütundan sonra kanal merkezine göre simetrik olarak her iki tarafta da en dıştaki birer sıra kanatçık kaldırılarak yerlerine 500 µm çapa ve 200 µm derinliğe sahip yapay kabarcıklaşma oyukları yerleştirilmiştir. Bu bölüm ikinci bölüm olarak adlandırılmakta olup, 9 sütun ve 8 sıra kanatçık ile 9 sütun ve 2 sıra oyuktan oluşmaktadır. On sekizinci sütundan sonra üçüncü bölüm gelmektedir. Üçüncü bölümde en dıştaki ikişer sıra kanatçık kaldırılmış olup yerlerine yapay kabarcıklaşma oyukları açılmıştır. Üçüncü bölüm 9 sütun ve 6 sıra kanatçık ile 9 sütun ve 4 sıra oyuktan oluşmaktadır. MIA'da toplamda 216 mikro kanatçık ve 54 yapay kabarcıklaşma oyuğu bulunmaktadır.

Birinci bölge ile ikinci bölge ve ikinci bölge ile üçüncü bölge arasındaki geçişler, sırasıyla birinci ve ikinci kademe olarak adlandırılmaktadır. KIA olarak kodlanan diğer ıs alıcı ise konvansiyonel nitelikte olup, düz duvarlı paralel mikrokanallardan oluşmaktadır ve karşılaştırmalı analize referans teşkil

etmektedir. Konvansiyonel ısı alıcı her biri 333 μm hidrolik çapa sahip on bir (11) paralel mikrokanaldan oluşmaktadır. Kanalların yüksekliği 200 μm, genişlikleri ve uzunlukları ise sırasıyla 1 mm ve 40 mm'dir.

Her iki ısı alıcının da akış pasajı geometrisi haricindeki tüm özellikleri aynıdır. Saf bakır malzemeden üretilen ısı alıcılar toplamda 2 mm kalınlığa sahip olup, ısıtılan (etkin) genişlik ve uzunluk değerleri sırasıyla 16 mm ve 40 mm'dir. İlgili genişlik ve uzunluk değerinin çarpımı aynı zamanda ısıtıcı plakanın platform alanına karşılık gelmektedir. Herhangi bir sızma problemini önlemek için ısı alıcıların toplam genişlik ve uzunluk değerleri 18 mm ve 42 mm olarak tasarlanmıştır. Bu sayede, boyuna ve enine doğrultularda birer milimetrelik pay bırakılarak ilgili bölümler ısıtılmayan teflon blok üzerine oturtulmuş ve ara yüzeylerdeki olası su sızıntısının önüne geçilmiştir. Isı alıcıların alt yüzeyinde akış pasajı boyunca eşit aralıklarla açılmış termo-eleman kanalları bulunmaktadır. Toplam yedi kanal açılmış olup, ilgili kanallar kullanılarak termo-elemanlar kanal girişinden, sırasıyla, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm ve 35 mm uzaklığa konumlandırılmış ve ilgili bölümler sıcaklık okumaları yapılmıştır. Termo-elemanlar mikrokanal taban yüzeyinin 0.5 mm altına gelecek şekilde konumlandırılmıştır.

Deney düzeneğinin son bölümü akış görüntüleme ve veri toplama ünitelerini içermektedir. Test bölgesi bir mikroskop standı üzerine yerleştirilmiş olup, mikroskop ve bütünleşik yüksek hızlı kamera aracılığıyla akış görüntüleri alınmıştır. Saniyede 1000 görüntü alınmış olup, ilgili görüntüler kamera programı aracılığıyla bilgisayarda depolanmıştır. Deney düzeneğinden alınan sıcaklık ve basınç ölçümleri data logger aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Genel hatlarıyla bir deney sırasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Herhangi bir deneye başlamadan önce iş akışkanına gaz alma işlemi uygulanır.
- Dijital sürücülü pompa çalıştırılır ve devir saati üzerinden ayarlama yapılarak hem dijital gösterge paneli hem de sistemdeki akış ölçer kullanılarak istenilen debi değeri ayarlanır. Bu çalışmada, iki farklı kütle akısı ve bu kütle akılarına karşılık gelecek şekilde 18 ml dk⁻¹ ve 33 ml dk⁻¹ olmak üzere iki farklı hacimsel debi değerinde çalışılmıştır. Her iki ısı alıcının giriş kesit alanları aynı olduğu için hem aynı hacimsel debi değerlerinde hem de aynı kütle akılarında çalışılabilmiştir.
- Kalibrasyon banyosu hassasiyetindeki sıcaklık banyoları çalıştırılarak, ön ısıtıcılar (sabit sıcaklık banyosu + ısı değiştiricisi) aktif hale getirilir.
- AC güç kaynağı çalıştırılarak kartuş ısıtıcılar istenilen ısıl güç değerini verecek şekilde aktif hale getirilir. Güç kaynağı ilk olarak 90 W ısıl güç verecek şekilde ayarlanır.
- İlgili ısıl güç değerinde sistem kararlı hale gelince ölçümler alınarak bir sonraki ısıl güç değerine geçilir. Deneyler boyunca 90 W'tan başlamak üzeri 10 W artışlarla 180 W'a kadar toplamda 10 farklı ısıl güç değeri ve dolayısıyla bu değerlere karşılık gelen ısı akıları uygulanmıştır.
- İlgili debi değeri için tüm ısıl güçlerde deney yapıldıktan sonra debi değiştirilerek işlemler tekrar edilir.

Yukarıda tanımlanan süreç her iki ısı alıcı için de gerçekleştirilir.

2.2. Hesaplama Prosedürü ve Belirsizlik Analizi Sonuçları (Procedure of Data Analysis and Results of Uncertainty Analysis)

Önceki bölümde de belirtildiği üzere her iki ısı alıcısı da aynı giriş kesit alanına sahiptir. Bu sebeple, her iki ısı alıcı için de hem aynı kütlesel akıda hem de aynı kütlesel debide çalışılabilmiş olup, kütlesel akı eşitliği aşağıda verilmiştir:

$$G = \frac{\dot{V}\rho_a}{A_{gi}} \tag{1}$$

Burada, A_{gi} 151 alıcı giriş kesit alanını (toplam); \dot{V} , hacimsel debiyi ve ρ_a , akışkan yoğunluğunu temsil etmektedir. Net 151 güç (q_{net}), güç kaynağı aracılığıyla sisteme kontrollü bir şekilde uygulanan 151

110

güçten (q_u) ilgili çalışma koşulları altında oluşan kayıp ısıl gücün (q_k) çıkartılması ile aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$q_{net} = q_u - q_k$$
 (2)
Net ısıl gücün ısıtıcı plakanın platform alanına bölünmesiyle efektif ısı akısı elde edilir.

$$q_{eff}'' = \frac{q_{net}}{A_{pa}} \tag{3}$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan platform alanı ısıtıcı plakanın platform uzunluğu ile genişliğinin çarpımına eşittir. Isıtıcı plakanın platform uzunluğu aynı zamanda ısı alıcının ısıtılan (etkin) bölge uzunluğuna (L_e); platform genişliği ise ısı alıcının ısıtılan (etkin) bölge genişliğine (W_e) eşittir. Bu nedenle ısıtıcı plakanın platform alanı aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$A_{pa} = L_e \times W_e \tag{4}$$

Isi kaybi prosedürü özetle şu şekildedir: Test bölgesinde akışkan yokken, ısıl güç uygulanır ve kararlı koşullar altında ısı alıcı boyunca yerleştirilen yedi termo-elemandan okunan sıcaklık değerinin aritmetik ortalaması ile ortam sıcaklığı arasındaki fark ilgili ısıl güce karşılık kaydedilir. Bu işlem farklı ısıl güçler için tekrarlanarak ısı kaybı kalibrasyon eğrisi ve eğriyi temsil eden korelasyon elde edilir. Herhangi bir deney esnasında, ortalama termo-eleman sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farka gelen ısı kaybı değeri ilgili korelasyon kullanılarak belirlenir. Isı kaybı kalibrasyon eğrisi ve sürece yönelik detaylar yazarların önceki çalışmalarında sunulmuştur [15, 18].

İki faz ısı transfer katsayısı aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$h_{tp} = \frac{q_{net}}{A_t \left(T_y - T_d\right)} \tag{5}$$

Bu çalışmada, hesaplama prosedüründe, çıkışa en yakın olan termo-elemandan okunan sıcaklık değerleri ve dolayısıyla yedinci termo-eleman konumuna karşılık gelen (girişten 35 mm uzaklıktaki) yerel değerler dikkate alınmıştır. Bunun sebebi, literatürde de [13, 19] çalışmalarında vurgulandığı üzere, doymuş kaynama koşullarının kanal çıkışına doğru artmasıdır. Bu çalışmada, sadece doymuş kaynamanın dikkate alındığı vurgulanmalıdır. Eşitlik (5)'te, T_y yerel yüzey (duvar) sıcaklığını; T_d yerel

doyma sıcaklığını; A_t ise toplam ısı transfer alanını göstermektedir. Yerel doyma sıcaklığı, yerel doyma basıncına göre belirlenmektedir. Bu kapsamda, giriş ve çıkış basınçları arasında lineer interpolasyon uygulanarak ısı alıcı boyunca, doymuş bölgede, istenilen herhangi bir konumdaki yerel doyma basıncı değeri belirlenebilir. Bu yöntem literatürde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [13-21]. Yerel yüzey sıcaklığı ve toplam ısı transfer alanı aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir.

$$T_{y} = T_{lt} - q_{eff}''\left(\frac{l_{v}}{k_{b}}\right)$$
(6)

$$A_t = A_{dy} + \eta N A_f \tag{7}$$

Eşitlik (6)'da; l_v , termo-elemandan akış pasajı taban yüzeyine olan düşey mesafe; T_{lt} , termo-eleman aracılığıyla okunan sıcaklık değeri ve k_b , ısı alıcının (bakır malzemeden üretilmiş) ısı iletim katsayısıdır. Eşitlik (7) ile ifade edilen toplam ısı transfer alanı ise adyabatik uç kabulü yapılarak kanatçık analizi aracılığıyla belirlenmiştir. Burada; A_{dy} , kanal tabanındaki kanatçıksız alanı; A_f , tek bir kanatçığın ıslak alanını; N, kanatçık sayısını; η ise kanatçık verimini göstermektedir. Alan ifadelerinin açık formu aşağıda sunulmuştur.

$$A_f = H_f P_f \tag{8}$$

$$A_{dy} = W_e L_e - N A_{fc}$$

$$\eta = \frac{tanh(m_f H_f)}{m_f H_f}$$

$$m_f = \sqrt{\frac{h_{tp} P_f}{k_b A_{fc}}}$$
(10)
(11)

İki faz ısı transfer katsayısı, yukarıda yer alan denklemler kullanılarak, iteratif yaklaşımla belirlenir. Doymuş bölge için önemli büyüklüklerden biri yerel kuruluk derecesi olup, ilgili parametrenin açık formu aşağıda sunulmuştur:

$$x_e = \frac{1}{h_{fg}} \left(\frac{q_{eff}' A_{pa} L_n}{\dot{m} L_e} - c_p \left(T_d - T_i \right) \right)$$
(12)

Yukarıdaki eşitlikte, h_{fg} , buharlaşma gizli ısısını; \dot{m} , akışkanın kütlesel debisini; T_i , akışkanın giriş sıcaklığını; c_p , akışkanın özgül ısısını ve L_n , hesaplama yapılan veya incelenen konumun kanal girişinden uzaklığını sembolize etmektedir.

Mikro yapıdaki geometrik kısıtlamalar sebebiyle test bölgesindeki basınçlar giriş ve çıkış haznelerinden ölçülmüştür. Giriş ve çıkış haznesine yerleştirilen diferansiyel basınç sensörü aracılığıyla toplam basınç düşümü (ΔP) direkt olarak ölçülmüştür. Giriş haznesine yerleştirilen mutlak basınç sensörüyle de giriş basıncı (P_i) direkt belirlenmiştir. Basınç ölçüm konumları ve test bölgesinin geometrisi dikkate alındığında, kesit daralması basınç kayıpları ile kesit genişlemesi basınç kazanımı değerlerinin bileşke değerinin ve/veya görece büyüklüklerinin ihmal edilecek mertebelerde olması nedeniyle toplam basınç düşümü mikro kanal boyunca olan basınç düşümüne eşit alınabilir. Ayrıca, doymuş kaynama koşullarının baskın olması nedeniyle, tek faz basınç düşümü iki faz basınç düşümü yanında ihmal edilebilecek düzeydedir. Böylece, nihai olarak, toplam basınç düşümü iki faz basınç düşümüne eşit olarak alınabilir. Basınç düşümünün tüm bileşenleri ve kabullere ait detaylı açıklamalar yazarların önceki çalışmasında sunulmuştur [15].

Ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerin belirsizlik düzeyleri birbirinden farklı değerlendirilmektedir. Olçülen büyüklükler için ilgili ölçüm cihazının katalog verileri veya kalibrasyon sonucu elde edilen yeni belirsizlik düzeyleri dikkate alınmıştır. Hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler için ise literatürde yaygın bir şekilde kullanılan ve [22] çalışmasında sunulmuş olan metot kullanılmıştır. Ölçülen büyüklüklerden hacimsel debi ile ilgili olarak akış ölçer hassas bir ölçekli kap ile kalibre edilmiştir. Sıcaklık ölçümünün kalibrasyonunda ise hassas sabit sıcaklık banyosu kullanılmıştır. İlgili belirsizlik değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur.

(11)

Table 1. Levels of uncertainty				
Ölçülen Parametreler	Belirsizlik Düzeyi			
Giriş basıncı (Pi)	±%0.05 (TS)			
Uygulanan ısıl güç (q_u)	±% 0.	±% 0.6 (OS)		
Hacimsel debi (\dot{V}) ±0.2 m		nl dk-1		
Sıcaklık (T)	±0.1 °C			
Toplam basınç düşümü (${\it \Delta} P$)	±%0.08 (TS)			
Hesaplanan Parametreler	Ortalama			
	KIA	MIA		
Kütle akısı (G)	±%2.7	±%2.7		
Efektif ısı akısı ($q_{e\!f\!f}''$)	±%3.0	±%2.9		
Yerel kuruluk derecesi (x _e)	±%2.0	±%2.1		
İki fazlı ısı transfer katsayısı	±%2.1	±%12.2		
Açıklama: TS: Tüm skala; OS: Okuma skalası				

Cizelge 1. Belirsizlik düzevleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, kademeli genişleyen akış keşit alanına ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına şahip mikro kanatçıklı ısı alıcı (MIA) ile paralel düz duvarlı mikro kanatçıklardan oluşan konvansiyonel tipteki ısı alıcıda (KIA) doymuş kaynamalı akış, farklı kütle akısı değerlerinde, yüksek hızlı görüntü desteğiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 90 W ısıl güçten başlanarak 10 W aralıklarla 180 W'a kadar sabit ısıl yük değerlerinde (yaklaşık 132 – 272 kW m⁻² ısı akısı aralığına karşılık gelmektedir) ve iki farklı kütle akısında (136 ve 250 kg m⁻² s⁻¹) çalışılmıştır. Görüntüler saniyede 1000 kare olarak (1000 fps) alınmış olup, görüntülerde ana akış yönü soldan sağa doğrudur. İş akışkanı ise deiyonize sudur.

3.1. Kaynama Eğrilerinin Analizi (Analysis of Boiling Curves)

Şekil 4'te, farklı kütle akıları için KIA ve MIA'ya ait kaynama eğrileri sunulmuştur. Doymuş kaynama bölgesindeki davranışa uygun olarak, her iki ısı alıcı içinde, artan ısı akısı ile kızma farkı ($\Delta T_{sat} = T_v - T_d$

) artmaktadır. Burada önemli olan nokta, kaynama eğrisinin eğimi ve ısı akılarına karşılık gelen sıcaklık farkı değerleridir. Şekil 4'ten de görüldüğü üzere, MIA'ya ait kaynama eğrileri KIA'ya kıyasla grafiğin sol tarafında bulunmaktadır. Bir başka ifade, aynı ısı akısı değerleri için MIA'daki doymuş kaynama koşulları daha düşük kızma farklarında ve dolayısıyla daha küçük yüzey sıcaklığı değerlerinde gerçekleşmektedir. MIA ısı alıcı olarak kullanıldığında, verilen bir ısıl yük değeri için, KIA'ya kıyasla, soğutulmak istenen parçanın yüzey sıcaklığı daha düşük değerde tutulabilmekte ve artan ısı akılarına karşı yüzey sıcaklığındaki değişim KIA'ya kıyasla daha az olmaktadır. Tüm ısı akısı aralığında MIA için 136 kg m-2 s-¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 0.34 °C – 2.64 °C ve 0.36 °C – 2.90 °C aralıklarını kapsamaktadır. Buna karşın, KIA için 136 kg m-2 s-1 ve 250 kg m-2 s-1 kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 3.6 °C – 9.0 °C ve 3.75 °C – 10.31 °C aralıklarını kapsamaktadır. Kütle akısının kaynama eğrisi üzerindeki değişimi MIA için görece ihmal edilebilecek düzeyde iken, KIA için genel karakter olarak azalan kütle akısı ile kızma farkı değerleri azalmaktadır.



Şekil 4. Farklı kütle akıları için KIA ve MIA'ya ait kaynama eğrileri Figure 4. Boiling curves of KIA and MIA for different mass fluxes

3.2. Isi Transfer Katsayısının Belirlenmesi (Determination of Heat Transfer Coefficient)

Şekil 5'te, her iki ısı alıcı için, farklı kütle akılarında, iki faz ısı transfer katsayısının efektif ısı akısı ve yerel kuruluk derecesi ile değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Şekil 5 kütle akısı, ısı akısı ve geometrinin ısıl performans üzerindeki etkisinin belirlenmesine olanak sunmaktadır. Öncelikle parametrelerin etki düzeyleri niceliksel olarak sunulacak; nicel değerlendirmeden sonra akış görüntü destekli analize geçilecektir. Şekil 5'ten de görüldüğü üzere, MIA (akış pasajı kesiti kademeli olarak genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip mikro pim tipi kanatçıklı ısı alıcı), KIA'ya (konvansiyonel mikro kanallı ısı alıcı) kıyasla ısı transferini belirgin bir şekilde iyileştirmektedir. Öyle ki, G = 136 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerinde, MIA kullanıldığında KIA'ya kıyasla iki faz ısı transfer katsayısı %827.2'ye kadar artış göstermekte olup, tüm veri tabanı üzerinden ortalama artış %410.5'tir. G = 250 kg m-2 s-1 kütle akısı değeri için ise artış yüzdesi maksimum %819.5; ortalama olarak ise %402.1'dir. Ayrıca, MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları ısı akısına daha fazla bağımlıdır. Artan ısı akısıyla, MIA'nın ısı transfer katsayıları sürekli olarak azalmakta olup, ilk veri ile son veri arasındaki azalış oranı G = 136 kg $m^{-2} s^{-1}$ için %73.8 ve G = 250 kg m $^{-2} s^{-1}$ için %74.6'dır. Isı akısı ile ısı transfer katsayısındaki söz konusu ilişki KIA için de geçerli olup, artan ısı akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. KIA için ilk veri ile son veri arasındaki azalış oranı; G = 136 kg m⁻² s⁻¹'de %17.7 ve G = 250 kg m⁻² s⁻¹'de %25.3'tür. MIA için elde edilen 1sı transfer katsayılarının, KIA'ya kıyasla, çok daha büyük değerlerde olması ve 1sı akısıyla değisim hızının daha fazla olması sebebiyle, görece olarak grafikte (Şekil 5a) KIA için yaklaşık yatay bir eğilim görülmektedir.



Şekil 5. Farklı kütle akıları için iki faz ısı transfer katsayısının (a) ısı akısı ve (b) kuruluk derecesi ile değişimi

Figure 5. Variation of two-phase heat transfer coefficient with (a) heat flux and (b) vapor quality for different mass fluxes

Kütle akısının, iki faz ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ise ısı akısına kıyasla zayıftır. MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla kütle akısına daha fazla bağlıdır. MIA'da kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %16.4, ortalama olarak ise %9.6 değişim meydana gelmektedir. KIA'da ise kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %12.7, ortalama olarak ise %7.8 değişim meydana gelmektedir. Genel karakter olarak, her iki ısı alıcısı için de artan kütle akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır.

Şekil 5b'de iki faz ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi verilmiştir. Eşitlik (12)'den de hatırlanacağı üzere, kuruluk derecesi, temelde, ısı ve kütle akısına bağlı olarak hesaplanan bir büyüklüktür ve doymuş kaynamanın derecesinin bir ölçüsüdür. Bu sebeple, iki faz ısı transfer katsayısının kuruluk derecesi ile değişimi Şekil 5a'daki değişime benzerdir. Burada, farklı olarak kütle akısının kuruluk derecesi üzerindeki etkisine vurgu yapılacaktır. Her iki ısı alıcı için de artan kütle akısı ile kuruluk dereceleri belirgin şekilde azalmaktadır. Bunun sebebi, verilen bir ısıl yük değerinde artan kütle akısı ile kanal içindeki doymuş kaynama koşullarının zayıflamasıdır.

Yukarıda sunulan niceliksel sonuçlar ve parametrik ilişkiler bu bölümde fiziksel mekanizmanın, akışa ait görüntülerle desteklenmesi ve irdelenmesiyle açıklanacaktır. Şekil 6'da KIA için düşük ısıl yüklerdeki akış rejimlerini karakterize eden görüntüler sunulmuştur. Bu kapsamda 100 W değerindeki ısıl yük altında, hesaplamalarda kullanılan ölçümlerin alındığı konumdaki bir başka ifade ile girişten 35 mm uzaklığa sahip bölgelerdeki akış görüntüleri ile ters akış olayını göstermek için kanal giriş bölgesindeki görüntüler verilmiştir. KIA için düşük ısıl yüklerde temel akış desenleri kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır. Şekil 6a – c'de gösterilen bu akış deseni modunda, bir seri halinde, sırasıyla, kanalın mikro boyutu nedeniyle sınırlanmış ve eksenel doğrultuda uzamış görece büyük buhar kabarcığı ile devamında genel karakter olarak kanal köşelerinde oluşan küçük kabarcıklar ile daha önceki bölgelerde (görüntü alanına girmeyen) oluşarak sıvı fazla birlikte sürüklenen görece küçük kabarcıkların geçişi gerçekleşir. Etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Buna ek olarak, uzun kabarcıklar ile ısı transfer yüzeyi arasında kalan sıvı filminin buharlaşması, sıvı geçişi esnasındaki tek fazlı taşınım ve kabarcıkların sıvı faz içindeki rastgele hareketleri sonucu karışımın iyileşmesi (taşınımın iyileşmesi) de kısmen ısı transferi üzerinde etkilidir.





Şekil 6d'de, uzun bir kabarcığın geçişi esnasında kabarcık ile yüzeyler arasında kalan ince sıvı filminin görüntüsü sunulmuştur; ancak yukarıda detaylı olarak açıklandığı üzere, KIA için düşük ısıl yüklerde taşınımlı kaynama mekanizmalarının etkinliğinin zayıf olduğu belirtilmelidir. Şekil 6e ve f'de paralel iki kanalı içeren görüntüler sunulmuştur. İlk görüntüdeki zaman başlangıç zamanı olarak alınmış ve t = 0 olarak ifade edilmiştir. İkinci görüntüdeki (Şekil 6f) zaman ise başlangıç zamanına göre 1 ms sonra gerçekleştiği için t = 1 ms olarak gösterilmiştir. Zaman bağımlı olarak sunulan tüm görüntülerde ilk görüntü başlangıç zamanını ifade etmekte olup, zamanla değişimi belirtmek için görüntülerin üzerinde başlangıç zamanına göre geçen süreler tanımlanmıştır. Şekil 6e ve f'de önemli olan husus, kanallarda eş zamanlı olarak farklı akış olaylarının gerçekleşmekte olduğunun görülmesidir. Farklı zamanlarda paralel kanallar içinde farklı akış rejimleri/desenleri gerçekleşmekte olup, bu durum paralel kanal kararsızlığına neden olmaktadır. İlgili şekillerde, bir kanaldan uzun bir kabarcığın geçişi görülürken sadece 1 ms içinde komşu kanalda kabarcıklı akışın olduğu görülmektedir. Şekil 6g ile i'de ise kanal girişindeki görüntüler sunulmuştur. İlgili şekillerde, kanal içinde oluşan kabarcığın akışa ters doğrultuda genişlemesi görülmektedir. Bu tür ters yöndeki kabarcık hareketi, ıslatma sıvısının kanala girmesine karşı direnç oluşturur, yerel ve anlık olarak basıncı artırır ve/veya oluşan mikro kabarcıkları bünyesine katarak kabarcıklaşmayı sönümler. Bu nedenle, hem ısı transfer performansını düşürür hem de akış kararsızlıklarını tetikler. Şekil 6'yı kapsayan düşük ısıl yükler altında veya bir başka ifade ile doymuş kaynamanın erken periyotlarında, bu tür bir ters akışın etkisi, Şekil 6g ile i'den de görüldüğü üzere zayıftır. Kanal girişinin bir miktar dışına çıkan buhar, doymuş kaynama etkinliğinin zayıf olması ve dolayısıyla kanal içinde sıkışan kabarcık tarafından ters yönde uygulanan buharlaşma momentum kuvvetinin etkisinin zayıf olması sebebiyle, ıslatma sıvısı tarafından uygulanan atalet kuvvetine direnemeyerek tekrar akış doğrultusunda hareket eder. Her ne kadar ters akışın etkisi zayıf olsa da kabarcıklaşma potansiyelini zayıflatması, ıslatma sıvısının kanala girişini bir süre engellemesi ve akışın tek bir kanaldaki sürekliliğini olumsuz etkilemesi sebebiyle KIA'daki ısıl performans düşüklüğünün önemli sebeplerinden birisidir.

Şekil 7'de yüksek ısıl güç değerlerini temsilen 180 W ısıl güçte alınan ve KIA'ya ait olan akış görüntülerinden örnekler sunulmuştur.



Şekil 7. KIA için q_u = 180 W ısıl güç değerindeki akış görüntüleri **Figure 7.** Flow images for KIA at heat input of q_u = 180 W

Yüksek ısıl güç değerlerinde, KIA için baskın akış desenleri uzun kabarcıklı ve halkasal akıştır. Şekil 7a'da halkasal akışa ait bir görüntü sunulmuş olup, halkasal akış, iç bölgede buharın kenarlarda ise ince sıvı filminin olduğu akış desenini ifade eder. Kabarcıklı akış sönümlenerek etkisini kaybetmiş olup, baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır. Artan ısıl yük sebebiyle, kabarcıklaşma çok şiddetli ve hızlı gerçekleşir ve patlamalı kaynama olarak da adlandırılır. Oluşan kabarcık sınırlı akış pasajı hacmi sebebiyle sınırlanır ve sınırlanma olayı düşük ısıl yüklere kıyasla çok daha şiddetlidir. Dolayısıyla kabarcık hem akış doğrultusunda hem de akışa ters doğrultuda kuvvet uygular. Bu kuvvet buharlaşma momentum kuvvetidir. Buharlaşma momentum kuvveti nedeniyle ters akış oluşur ve kabarcıklaşma sönümlenir. Ters yönde uzayan kabarcık hem yerel olarak basıncı artırarak kabarcıklaşmayı sönümler hem de ıslatma sıvısının kanala girişini engeller. Şekil 7b ve c'de ters akışın şiddeti görülmektedir. Komşu iki kanaldan çıkan buhar kabarcıkları birleşerek kanal girişinden dışarı çıkmakta ve görece geniş bir alanı kaplamaktadır. Ters akış kaynama kararsızlıklarına yol açarak ısıl performansı önemli ölçüde düşürür.

Şekil 8'de, düşük ısıl yüklere karşılık gelen koşullarla ilgili olarak, MIA için elde edilen ve farklı akış olaylarını karakterize eden görüntüler sunulmuştur.



Figure 8. Flow images for MIA at heat input of $q_u = 100$ W

Şekil 8a ve b'den görüldüğü üzere, düşük ısıl yüklerde ısı transfer yüzeyinde yoğun bir kabarcık popülasyonu vardır. Bu durum kabarcıklı kaynamanın etkinliğinin bir göstergesidir. İlgili kabarcıklar, genel karakter olarak, kanatçıklarda ve kabarcıklaşma oyuklarında oluşan kabarcıklar ile sıvı içinde sürüklenerek önceki bölgelerden gelen kabarcıkları içermektedir. Kanatçıklar ve yapay oyuklar kabarcıklaşmayı önemli düzeyde destekler. Burada, önemli noktalardan biri kabarcık boyutlarının, genel olarak, KIA'ya kıyasla küçük olmasıdır. İkincil kanalların varlığının sağladığı alternatif yollar ve özellikle akış kesitinin genişlemiş olması, sınırlanma/tıkanma problemi ve buna bağlı olarak kabarcıklaşmanın sönümlenmesi ve yerel basınçtaki artışların önemli ölçüde engellenmiş olması, mikro kabarcıkların varlığını sürdürebilmesini ve akışın karışarak taşınımlı ısı transfer mekanizmasının iyileşmesini sağlamaktadır. Özellikle, akış kesitinin genişlemesi, buharın hızla ve akışa karşı direnç uygulamadan akış doğrultusunda akmasını sağlar. Şekil 8b'de sıvı tarafından buharın ısı alıcı çıkışına doğru sürüklenmesi görülmektedir.

Şekil 8a ve b'deki önemli fiziksel süreçlerden bir diğeri oyukların su tutucu veya su haznesi görevi görmesidir. Bu durum, sıvının ısı transfer yüzeyi ile temasının kesilmemesi (kuruma probleminin oluşmaması) açısından MIA için üstünlük sağlamaktadır. Şekil 8c'den görüldüğü üzere, genişleyen kabarcık sınırlı bir kanal kesitinde sıkışmak yerine ikincil kanallara doğru genişler. Bu sebeple, genişleyen kabarcığın kanal içinde sıkışarak ıslatma sıvısını engelleme problemi MIA için söz konusu değildir. Ayrıca, Şekil 8c'deki mikro kabarcıkların varlığını sürdürmesi, kabarcık genişlemesinin kabarcıklaşmayı sönümleyecek kadar bir probleme yol açamadığını göstermektedir (MIA'daki geometri için). Şekil 8d ve e'de kanatçıkta kabarcık oluşumu ve dolayısıyla kanatçıkların kabarcıklaşmayı desteklemesi görülmektedir. Şekil 8e ve f'de iki önemli olay söz konusudur: (1) Herhangi bir buhar kabarcığı genişleyerek kanatçığı/kanatçıkları sardığında buhar ile kanatçık arasında sıvı filmi bulunur. Bu nedenle,

B. MARKAL, B. KUL

ısı transfer alanının bir bölümü buhar kabarcığı ile kaplanmış olsa bile kanatçığın sıvı film ile çevrili olması nedeniyle ince sıvı filminin buharlaşması ile etkin bir ısı transferi sağlanır. Aynı zamanda, sıvı filmle çevrili kanatçık kabarcıklaşmanın da sürdürülmesini sağlamış olur. (2) Kanatçıklar arasında sıvı köprüsü oluşur. Sıvı köprülerinin varlığı yüzeyin sıvı ile temasının kesilmemesine, kabarcıklaşma potansiyelinin devam etmesine ve kurumanın önlenmesine katkı sağlar.

Şekil 9'de ise MIA için yüksek ısıl güçlerdeki akış görüntülerine örnekler sunulmuştur. Çalışmadaki en yüksek ısıl güç değerine (180 W) rağmen, ısıl yük altında genişleyen buhar kabarcıkları kanalın genişleyen kesitine doğru yönlenerek çıkışa doğru hızlı bir şekilde hareket eder ve kabarcık tıkanması problemi oluşmaz. Şekil 9a'da genişleyen buharın kanatçıksız bölgeye doğru yönelmesi ve ıslatma sıvısı tarafından ısı alıcı çıkışına doğru itilmesi görülmektedir. Şekil 9b'de ise yüksek ısıl güçlere rağmen, oyukların sürdürülebilir kabarcık oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Oyukların en önemli katkısı ise su hapsetme özelliğidir. Bu sayede, Şekil 9c'de görüldüğü gibi ortam buharla kaplansa bile oyuklarda su bulunduğu için yüzeyin suyla temasının kesilmesi engellemekte ve kabarcık oluşum potansiyeli sürdürülmektedir. Ayrıca, kanatçıkların etrafı da sıvı film ile kaplanmakta ve sıvı film buharlaşması ve kabarcıklaşma sağlama potansiyeli ile ısı transferine katkı sunulmaktadır. Yüksek ısıl yüklerde de sınırlanma problemi olmadığı için mikro kabarcıklar varlığını sürdürerek akış pasajları içinde oluşabilmekte ve/veya sıvı içinde sönümlenmeden sürüklenerek taşınabilmektedir (Şekil 9d). Şekil 9e ve f'de ise kanatçıklarda kabarcık oluşumunu ve kanatçıklar arası sıvı köprüleri gösteren görüntüler verilmiştir.

Sonuç olarak, MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır. Kademeli genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip olan geometri kabarcık tıkanma problemini (çalışılan tüm ısıl yük aralığı için) ortadan kaldırmaktadır. Oyukların kabarcıklaşmayı desteklemesi, oyuklarda su tutulması, buhar kabarcıklarının genişleyen bölgelere doğru hızla yönelmesi ve mikro kabarcıklı akışın hızlı, tek yönlü ve sürekli hareketinin sağlanması, kanatçıklar etrafındaki ince sıvı filminin buharlaşması, sıvı köprülerinin oluşumu ve ısı transfer yüzeyinin sıvı tarafından etkin bir şekilde ıslatılması MIA için ısı transferini iyileştiren fiziksel mekanizmalardır.

İsil performanstaki düşüşün göstergelerinden biri de kaynama kararsızlıklarının şiddetidir. Her iki ısı alıcı için hem sıcaklık hem de basınç düzeyindeki kararsızlık grafikleri Şekil 10a ve b'de sunulmuştur. Bu kapsamda, ilgili grafiklerde, giriş sıcaklığı ve giriş basıncının zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi çalışma kapsamındaki en yüksek ısıl güç değerine rağmen MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı salınım düzeyleri KIA'ya kıyasla oldukça düşüktür. Niceliksel olarak ifade edilecek olursa, KIA'nın sıcaklık verilerinde (Şekil 10a) ardışık iki ölçüm arasındaki maksimum mutlak fark 1.39 °C olup, ±%1.8'e karşılık gelmektedir. Buna karşın, MIA için elde edilen sıcaklık ölçümlerinden, ardışık iki veri arasındaki maksimum mutlak fark 0.15 °C olup, %0.21'lik bir değişime karşılık gelmektedir. Giriş basıncı için ise KIA'nın ardışık herhangi iki verisi arasındaki maksimum mutlak fark 1.13 kPa olup, yaklaşık %1'lik değişime karşılık gelmektedir. MIA için ise ardışık herhangi iki giriş basıncı verisi arasındaki maksimum mutlak fark 0.37 kPa olup, %0.33'lük değişime karşılık gelmektedir. [2] çalışmasında önerilen standart sapma eşitlikleri kullanıldığında ise MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı standart sapma değerleri, sırasıyla, 0.05 °C ve 0.08 kPa iken, KIA için ilgili değerler, sırasıyla, 0.43 °C ve 0.32 kPa'dır. MIA'nın kademeli genişleyen yapısı buhar tıkanması veya sınırlanması problemini sönümlemekte ve/veya ortadan kaldırmaktadır. Böylece, artan ısıl yüklere rağmen, buhar tıkanmadan veya sınırlanarak ıslatma sıvısının gelişini engellemeden ısı alıcı çıkışına doğru hızlı bir şekilde hareket etmekte ve akışın tek yönlü sürekli hareketini desteklemektedir. Sınırlanmayan buhar kabarcıkları ıslatma sıvısının gelişini engelleyecek şekilde veya geçici olarak ıslatma sıvısını giriş haznesine itecek şekilde bir buharlaşma momentum kuvveti uygulamadığı için giriş sıcaklık ve basınç çalkantıları başarılı bir şekilde sönümlenmektedir. KIA'da ise sınırlanan kabarcığın uyguladığı buharlaşma momentum kuvveti, ıslatma sıvısı tarafından kanal çıkışına doğru uygulanan sıvı atalet kuvvetine baskın gelir ve oluşan şiddetli ters akış sonucu akışkan kanal girişinden ters yönde çıkarak giriş haznesine girer. Bu durum farklı zaman periyotlarında ve farklı konumlarda (farklı kanalların girişinde) gerçekleşir. Akışkan bazı kanallardan ters yönde çıkarak giriş haznesine girerken, aynı anda farklı kanallarda tek yönlü akış olur. Sıvı atalet kuvveti

ile buharlaşma momentum kuvvetinin etkileşimi baskındır. Şiddetli ve zaman bağımlı ters akış giriş sıcaklığı ve giriş basıncında yüksek genlikli çalkantılara yol açar.



Figure 9. Flow images for MIA at heat input of $q_u = 180$ W





3.3. Basınç Düşümü Verilerinin Değerlendirilmesi (Evaluation of Pressure Drop Data)

Şekil 11 a ve b'de her iki ısı alıcıya ait basınç düşümü grafikleri sunulmuştur.



Şekil 11. Farklı kütle akıları için basınç düşümünün (a) ısı akısı ve (b) kuruluk derecesi ile değişimi Figure 11. Variation of pressure drop with (a) heat flux and (b) vapor quality for different mass fluxes

Artan ısı akısı ile her iki ısı alıcı için de toplam basınç düşümünün arttığı görülmektedir (Şekil 11a). Bunun sebebi, iki faz basınç düşümünü oluşturan ivmelenme ve sürtünme basınç düşümü bileşenlerinin artan ısı akısı ile artmasıdır. MIA için elde edilen basınç düşümü değerleri KIA için elde edilenlerden daha yüksektir. Tüm veri tabanı üzerinden, MIA'da KIA'ya kıyasla basınç düşümünde 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerinde, sırasıyla, %50.5 ve %37.1'e kadar artış olmaktadır. Isı transfer katsayısını yaklaşık %827.2'ye kadar iyileştiren geometrik özellikler basınç düşümünde görece düşük bir artışa yol açmıştır. Kanatçıklar sebebiyle akış karışımının iyileşmesi, buharın hızlanarak geniş bölgelere yayılması ve sıvı/buhar fazları arasındaki etkileşimin/sürtünmenin artması ve böylece sürtünme ve ivmelenme basınç düşümü bileşenlerin artması sonucu toplam basınç düşümünde artış meydana gelmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında, mikro kanatçıklara ve mikro oyuklara sahip genişleyen kesitli bir ısı alıcı ile konvansiyonel paralel kanallı bir ısı alıcıda kaynamalı akış karakteristikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı çalışma koşulları altında deneyler yapılmış ve akış görüntüleri üzerinden fiziksel mekanizma irdelenmiştir. Elde edilen ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Tüm ısı akısı aralığında; MIA için 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 0.34 °C 2.64 °C ve 0.36 °C 2.90 °C aralıklarını kapsamaktadır. Buna karşın, KIA için 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerlerindeki kızma farkı değişimi, sırasıyla, 3.6 °C 9.0 °C ve 3.75 °C 10.31 °C aralıklarını kapsamaktadır. MIA ısı alıcı olarak kullanıldığında, verilen bir ısıl yük değeri için, KIA'ya kıyasla, soğutulmak istenen parçanın yüzey sıcaklığı daha düşük değerde tutulabilmekte ve artan ısı akılarına karşı yüzey sıcaklığındaki değişim KIA'ya kıyasla daha az olmaktadır.
- Kütle akısının kaynama eğrisi üzerindeki değişimi MIA için görece ihmal edilebilecek düzeyde iken, KIA için genel karakter olarak azalan kütle akısı ile kızma farkı değerleri azalmaktadır.
- G = 136 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değerinde, MIA kullanıldığında KIA'ya kıyasla iki faz ısı transfer katsayısı %827.2'ye kadar artış göstermekte olup, tüm veri tabanı üzerinden ortalama artış %410.5'tir. G = 250 kg m⁻² s⁻¹ kütle akısı değeri için ise artış yüzdesi maksimum %819.5; ortalama olarak ise %402.1'dir.
- Kütle akısının, iki faz ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi ısı akısına kıyasla zayıftır. MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla kütle akısına daha fazla bağlıdır. MIA'da kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %16.4, ortalama olarak ise %9.6 değişim meydana gelmektedir. KIA'da ise kütle akısına bağlı olarak, ısı transfer katsayısında maksimum %12.7, ortalama olarak ise %7.8 değişim meydana gelmektedir.

- Her iki ısı alıcı için de artan ısı akısı ile ısı transfer katsayıları azalmaktadır. Buna karşın, MIA için elde edilen ısı transfer katsayıları KIA'ya kıyasla ısı akısına daha fazla bağımlıdır.
- KIA için düşük ısıl yüklerde temel akış desenleri kabarcıklı ve uzun kabarcıklı akıştır. Etkin ısı transfer mekanizması kabarcıklı kaynamadır. Buna ek olarak, uzun kabarcıklar ile ısı transfer yüzeyi arasında kalan sıvı filminin buharlaşması, sıvı geçişi esnasındaki tek fazlı taşınım ve kabarcıkların sıvı faz içindeki rastgele hareketleri sonucu karışımın iyileşmesi de kısmen ısı transferi üzerinde etkilidir.
- Yüksek ısıl güç değerlerinde, KIA için baskın akış desenleri uzun kabarcıklı ve halkasal akıştır. Kabarcıklı akış sönümlenerek etkisini kaybeder. Baskın ısı transfer mekanizması taşınımlı kaynamadır.
- MIA'da hem kabarcıklı kaynama hem de taşınımlı kaynama etkin ısı transfer mekanizmalarıdır. Kademeli genişleyen ve yapay kabarcıklaşma oyuklarına sahip olan geometri kabarcık tıkanma problemini ortadan kaldırmaktadır. Oyukların kabarcıklaşmayı desteklemesi, oyuklarda su tutulması, buhar kabarcıklarının genişleyen bölgelere doğru hızla yönelmesi ve mikro kabarcıklı akışın hızlı, tek yönlü ve sürekli hareketinin sağlanması, kanatçıklar etrafındaki ince sıvı filminin buharlaşması, sıvı köprülerinin oluşumu ve ısı transfer yüzeyinin sıvı tarafından etkin bir şekilde ıslatılması MIA için ısı transferini iyileştiren fiziksel mekanizmalardır.
- MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı salınım düzeyleri KIA'ya kıyasla oldukça düşüktür. MIA için giriş sıcaklığı ve giriş basıncı standart sapma değerleri (250 kg m⁻² s⁻¹ ve 180 W için), sırasıyla, 0.05 °C ve 0.08 kPa iken, KIA için ilgili değerler, sırasıyla, 0.43 °C ve 0.32 kPa'dır.
- Artan ısı akısı ile her iki ısı alıcı için de basınç düşümü artar. MIA için elde edilen basınç düşümü değerleri KIA için elde edilenlerden daha yüksektir. Tüm veri tabanı üzerinden, MIA'da KIA'ya kıyasla basınç düşümünde 136 kg m⁻² s⁻¹ ve 250 kg m⁻² s⁻¹kütle akısı değerlerinde, sırasıyla, %50.5 ve %37.1'e kadar artış olmaktadır.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Burak Markal: Kavramsallaştırma; Metodoloji; Araştırma; Kaynakların sağlanması; Makalenin yazımı, Makalenin düzenlenmesi, Görselleştirme; Proje yönetimi; Finansman sağlama. Beyzanur Kul: Validasyon; Araştırma; Kaynakların sağlanması; Görselleştirme.

beyzanar Rai. Vanaasyon, Anaştırına, Raynakların bağlanınası, Görben

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu makale/çalışma 219M142 nolu proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından desteklenmiştir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler, gizlilik veya diğer kısıtlamalar nedeniyle yalnızca yazarlardan talep edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] T. G. Karayiannis and M. M. Mahmoud, "Flow boiling in microchannels: Fundamentals and applications," Appl. Therm. Eng., vol. 115, pp. 1372–1397, 2017, doi:

10.1016/j.applthermaleng.2016.08.063.

- [2] D. Deng, L. Zeng, and W. Sun, "A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 175, p. 121332, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121332.
- [3] G. Liang and I. Mudawar, "Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 146, p. 118864, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118864.
- [4] J. Tang, Y. Liu, B. Huang, and D. Xu, "Enhanced heat transfer coefficient of flow boiling in microchannels through expansion areas," Int. J. Therm. Sci., vol. 177, no. February, p. 107573, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107573.
- [5] A. Koşar and Y. Peles, "Boiling heat transfer in a hydrofoil-based micro pin fin heat sink," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 50, no. 5–6, pp. 1018–1034, 2007, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.032.
- [6] A. Ma, J. Wei, M. Yuan, and J. Fang, "Enhanced flow boiling heat transfer of FC-72 on micro-pinfinned surfaces," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 52, no. 13–14, pp. 2925–2931, 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.031.
- [7] C. Woodcock, X. Yu, J. Plawsky, and Y. Peles, "Piranha Pin Fin (PPF) Advanced flow boiling microstructures with low surface tension dielectric fluids," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 90, pp. 591–604, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.072.
- [8] C. Falsetti, M. Magnini, and J. R. Thome, "A new flow pattern-based boiling heat transfer model for micro-pin fin evaporators," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 122, pp. 967–982, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.050.
- [9] Y. Zhang, B. Liu, J. Zhao, Y. Deng, and J. Wei, "Experimental study of subcooled flow boiling heat transfer on micro-pin-finned surfaces in short-term microgravity," Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 97, no. February, pp. 417–430, 2018, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.05.003.
- [10] Y. Wang, J. -heon Shin, C. Woodcock, X. Yu, and Y. Peles, "Local, transient heat transfer measurements for flow boiling in a microchannel with a pin fin," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 134, pp. 377–387, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.048.
- [11] D. Deng, L. Chen, W. Wan, T. Fu, and X. Huang, "Flow boiling performance in pin fininterconnected reentrant microchannels heat sink in different operational conditions," Appl. Therm. Eng., vol. 150, no. August 2018, pp. 1260–1272, 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.092.
- [12] K. Lingjian, L. Zhigang, J. Lei, L. Mingming, L. Ying, "Experimental study on flow and heat transfer characteristics at onset of nucleate boiling in micro pin fin heat sinks," Exp. Therm. Fluid Sci., vol. 115, no. April 2019, 2020, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109946.
- [13] D. Deng, L. Zeng, W. Sun, G. Pi, and Y. Yang, "Experimental study of flow boiling performance of open-ring pin fin microchannels," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 167, p. 120829, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120829.
- [14] L. Qin, S. Li, X. Zhao, and X. Zhang, "Experimental research on flow boiling characteristics of micro pin-fin arrays with different hydrophobic coatings," Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 126, no. July, p. 105456, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105456.
- [15] B. Markal and B. Kul, "Combined influence of artificial nucleation site and expanding cross section on flow boiling performance of micro pin fins," Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 135, p. 106081, 2022, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106081.
- [16] P. S. Lee and S. V. Garimella, "Saturated flow boiling heat transfer and pressure drop in silicon microchannel arrays," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 51, no. 3–4, pp. 789–806, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.019.
- [17] T. Alam, P. S. Lee, C. R. Yap, and L. Jin, "Experimental investigation of local flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in microgap channel," Int. J. Multiph. Flow, vol. 42, pp. 164–174, 2012, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.02.007.

- [18] B. Markal, B. Kul, M. Avci, and R. Varol, "Effect of gradually expanding flow passages on flow boiling of micro pin fin heat sinks," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 197, p. 123355, 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123355.
- [19] M. Law, P. S. Lee, and K. Balasubramanian, "Experimental investigation of flow boiling heat transfer in novel oblique-finned microchannels," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 76, pp. 419–431, 2014, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.045.
- [20] M. Law and P. S. Lee, "Effects of varying secondary channel widths on flow boiling heat transfer and pressure characteristics in oblique-finned microchannels," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 101, pp. 313–326, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.055.
- [21] W. Wan, D. Deng, Q. Huang, T. Zeng, and Y. Huang, "Experimental study and optimization of pin fin shapes in flow boiling of micro pin fin heat sinks," Appl. Therm. Eng., vol. 114, pp. 436– 449, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.182.
- [22] S. J. Kline and F. A. McClintock, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," Mechanical Engineering, vol. 75, no. 1, pp. 3-8, 1953.



ACCURACY ASSESSMENT TOWARD MERGING OF TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT DATA AND UNMANNED AERIAL SYSTEM POINT DATA

¹Lütfiye KARASAKA^(D), ^{2*}Hasan Bilgehan MAKİNECİ^(D), ³Kasım ERDAL^(D)

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE ¹lkarasaka@ktun.edu.tr, ²hbmakineci@ktun.edu.tr, ³f218223001006@ktun.edu.tr

Highlights

- UAV and TLS point clouds can be integrated and the integration improves the understanding, interpretation and quality of data
- UAV is a complementary data source with insufficient data produced with TLS, likewise TLS is a complementary data source when the data created with UAv is inadequate
- Measurements with merged point clouds generate satisfactory metric results



Graphical Abstract



ACCURACY ASSESSMENT TOWARD MERGING OF TERRESTRIAL LASER SCANNER POINT DATA AND UNMANNED AERIAL SYSTEM POINT DATA

¹Lütfiye KARASAKA^(D), ^{2*}Hasan Bilgehan MAKİNECİ^(D), ³Kasım ERDAL^(D)

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE ¹lkarasaka@ktun.edu.tr, ²hbmakineci@ktun.edu.tr, ³f218223001006@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 09.08.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.11.2022)

ABSTRACT: Terrestrial Laser Scanning (TLS) techniques are widely preferred for 3D models of small and large objects, buildings, and historical and cultural heritages. However, sometimes relying on a single method for 3D modelling an object/structure is insufficient to arrive at a solution or meet expectations. For example, Unmanned Aerial Systems (UAS) provide perspective for building roofs, while terrestrial laser scanners provide general information about building facades. In this research, several facades of a selected building could not be modelled using terrestrial laser scanning, and UAS was used to complete the missing data for 3D modelling. The transformation matrix, a linear function, is created to merge different data types. In the transformation matrix, the scale was found to be 1:1.012. The accuracy analysis of the produced 3D model was also made by comparing the spatial measurements taken from different building statistically. According to the accuracy analysis results, the Root Mean Square Error (RMSE) value is approximately 3 cm. The results of the accuracy research, which are within the 95% confidence interval with the three-sigma rule, are approximately 2 cm as RMSE. As a result of the study, it was determined that the data obtained from UAV photogrammetry and the data obtained by the TLS technique could be combined, and the integrated 3D model obtained can be used more efficiently.

Keywords: Merging of Point Data, Terrestrial Laser Scanning, Unmanned Aerial Systems, 3D Modelling

1. INTRODUCTION

3D modeling is the vectorial representation of the geometric information of an object in a computer environment. Today, 3D models of the physical earth or any object can be obtained by analyzing numerical data acquired using perspective imaging geometry and photogrammetric mathematical principles in a computer environment [1]. In addition, vectorial and visual presentations of the obtained 3D models can be made easily. Close-up photogrammetry and terrestrial laser scanning (TLS) are frequently preferred techniques for creating 3D models of small to large objects, buildings, and historical and cultural artifacts [2-4]. TLS has been a popular measurement technique in recent years for documenting objects, figures, historical buildings, and cultural heritages [5-7]. Point data produced by high-resolution laser scanning offers various solutions in cases where conventional techniques are impractical or impossible to apply [6, 8-10]. Unmanned Aerial Systems (UASs) are cost-effective systems capable of low-altitude flight, which can be operated remotely due to their pilotless use [10-12].

As a photogrammetry technique, image acquisition with UAS enables photogrammetric evaluation of the obtained images [13-14]. The evaluated data can then be used in various engineering projects, map production, documentation of historical/archaeological artifacts, and 3D modeling of objects and figures [15-16]. In addition, one significant feature is that the UAS collects data without endangering human life [17].

However, sometimes using a single method for 3D reconstruction of an object/structure may be

insufficient to arrive at a solution or meet expectations. For instance, when constructing a 3D model of a building, building facades can be modeled using close-up photogrammetry or the TLS method [18]. In contrast, the necessary perspective for building roofs can be provided by the aerial photogrammetry method. In such cases, when a single method is insufficient for 3D modeling research, the problem must be solved by combining data obtained from different platforms and measurement methods [2, 19-23]. Recent studies show that neither data from UAV images nor data from TLS could create the desired 3D model of a building. To get more accurate 3D models, combined data has been used recently. Today, the UAS and TLS methods are used in conjunction for biomass prediction, the documentation of buildings, historical artifacts, and archaeological sites in engineering applications [24-29].

This study applied a combination of the TLS technique and UAS photogrammetry technique data to create a 3D model of Meliha Ercan Guest House located on the Selçuk University Campus. While TLS point data for the front and side facades of the building have suitable viewing angles, the back facade of the building is limited to a garden wall adjacent to heavily wooded land with a sloped topography and data acquisition conditions for laser scanning could not be provided. For this reason, the 3D modeling of the missing areas, or, the back facade and roof of the building, was completed by combining the point data obtained from the images through the UAS. The root mean square errors (RMSE) and standard deviations (StD) of point differences were calculated to assess their accuracy. Then, three sigma tests were performed, and the same calculations were repeated for the differences within the 95% confidence interval [30-31].

2. MATERIAL AND METHODS

Within the study's scope, it aims to create a 3D model of the Meliha Ercan Guest House located on the Selçuk University Campus. In order to create the desired 3D model, other techniques such as classical terrestrial photogrammetry and the TLS method cannot produce adequate data for the back facade of the building. UAS and TLS, alternative measurement and modeling techniques were combined. Thus, while developing the 3D model, the point data for the building's back façade and the roof that could not be obtained using TLS was completed using the point cloud data obtained through the UAS method. While combining UAV images, the software presents an algorithmic infrastructure called Structure from Motion (SfM). It is an algorithm that creates key points from images depending on the shooting distances (base length) between images (base length) and camera positions (angular positioning with the terrain) and then creates point data in images by combining the least faulty points that can be mapped in more than one image (they are called tie points). All point data obtained from all sessions were processed, registered, and cleaned to get the gridded point cloud with TLS in Faro Scene Software. As well as TLS field works done, UAV got images from an aerial position. Either TLS point data or UAV images were used for the study to create a more accurate 3D model of building together. The average grid spacing for the point cloud was about 2 cm. The workflow chart displaying the scope of the study is given in Figure 1.

2.1. Study Area

The study area is Meliha Ercan Guesthouse located on the Selcuk University Alaeddin Keykubat Campus, Selçuklu, Konya (38° 01′ 07″ N, 32° 30′28″ E). The guesthouse, located in the northwest part of the campus area on the inner campus highway, makes a good subject for 3D reconstruction with general photogrammetric techniques due to its architecture. However, the back facade of the building does not provide adequate conditions for data collection using a single photogrammetric technique because the back facade is limited by a garden wall adjacent to sloping and densely forested topography. High garden walls and landscaping in front of the wall limit the distance at which photographs can be taken in suitable directions and angles for close-up photogrammetry. Therefore, it is an insufficient measuring distance for the TLS. In addition, the barn area, which is located very close to the building on the right back facade, is another restraining factor to terrestrial measurement methods.



Figure 1. The workflow charts



Figure 2. The examples of problem definition of distances that restrict photogrammetric techniques between the building and the surrounding wall (A: Side Facade, B: Back Facade, C: Side Facade)

2.2. Data Acquiring

In this study, three different measurement systems were used to acquire the data.

Total Station

As a classical measurement technique, data were collected from the area using a total station. Within this technique, a Sokkia Fx-101 total station (Figure 3A), which has a 1" angle measurement sensitivity, was applied. The manufacturer's default value for the distance measurement sensitivity is [(3+2 ppm x D) mm]. Without a reflector, the device can measure distances between 30 cm and 500 m using a laser with a battery life of approximately 20 hours.

Faro Focus 3D X330

Faro Focus 3D X330 TLS produces realistic and detailed scanning results by scanning objects with a wide scanning range of up to 330 meters away with high precision and accuracy for detailed documentation and measurement. Laser technology is used to rapidly produce highly detailed 3D models of complex structures and objects. The distance between the laser scanner and the target is determined using the phase difference distance measurement method with the fixed infrared light waves reflected from the scanner [26] (Figure 3B).

Parrot Anafi UAS

Parrot ANAFI features 180° integrated frame-based camera types that provide approximately 70° field of view and oblique image acquisition, as well as a camera resolution of 5472 × 3568 pixels, pixel size 2.41 × 2.41 μ m, and a focal length of 8.8 mm. According to the General Directorate of Aviation of TURKEY UAS Regulations, it is a device under the toy class and does not require any legal license for use due to its weight of 320 g including the battery (Figure 3C).



Figure 3. Field researches (A: Terrestrial measurements made with the total station, B: Terrestrial measurements made with TLS, C: Measurement with UAS)

Within the scope of the research, the TLS was performed as the initial application. Prior to performing the TLS, the stations where the device will be placed were determined. Following that, target markings to

help register the scanning data were positioned around the building, and the front and side facades of the building were scanned with TLS. Each session lasted approximately 10 minutes, and each scan was overlapped by the previous scan. As a second method, UAS flights were carried out to obtain missing data for the back facade and roof of the building, which could not be scanned with TLS. In the study carried out to create the full 3D model of the object, the data obtained from the UAS method was used for the missing roof data and the back facade of the building that could not be scanned with the TLS method. Prior to the UAS flight, seven Ground Control Points (GCP) were established around the building, and their coordinates were obtained in real-time with the UTM projection CORS system. A flight plan was prepared using PIX4DCapture software to obtain aerial photographs of the building's roof and back facade for photogrammetric purposes in the UAS method. As a result, 114 images were obtained within the flight plan with a 1.51 cm/pix Ground Sampling Distance (GSD), and an 80% side and 70% forward overlap ratio. Parameters of the flight plans are given in Table 1.

In order to conduct accuracy analysis, measurements were taken from all facades of the building with the total station and compared with the length values obtained from the produced 3D model.

Table 1. Parameters of flight plan				
Flight Parameters	Choice			
Flight Height	52 m			
GSD	1.51 cm/pix			
Side overlap	80%			
Forward overlap	70%			
Image Number	114			
Camera Angle	70			
GCP Number	7			
Flight Time (min.)	6.40			

2.3. Data-Processing and Accuracy Assessment

Both closed source code commercial software and open-source code software were used to process and evaluate the data obtained from TLS and UAS measurements. To begin, the Scene software preprocessed and converted all the TLS raw data into a 3D point set shape. Following that, the merging of point clouds was manually combined using paper target marks homogeneously positioned on the building surfaces, as reflective target marks were not employed. Next, photogrammetric processes were performed using the Agisoft PhotoScan software, which uses Structure From Motion (SfM) based techniques [10, 30-32] (Deliry and Avdan 2021, Elkhrachy 2021, Jiménez-Jiménez, Ojeda-Bustamante et al. 2021, Xiao, Wang et al. 2021). Finally, TLS and UAS georeferenced point data were integrated with CloudCompare, an open-source code software, to produce a 3D structure model.

CloudCompare software enables various combining alternatives. This research integrated point data obtained from different sources with manual point selection (Figure 4). During manual point selection, TLS data is aligned with UAS data. In other words, the reference point dataset is the point data obtained from the UAS, and the target point data is data from the TLS scan (Figure 5A, Figure 5B). Thus, a 3D model was obtained by directly transforming the laser scanning data obtained in a local coordinate system into georeferenced UAS data (Figure 5C). Unnecessary points were removed from TLS and UAS data, resulting in the presentation of Figure 5D.



Figure 4. Integration of point data (manually combining of point data and transformation)



Figure 5. Integrated UAS and TLS point data (A and B: Dark blue UAS reference data and red TLS target data, C: Merged point data, D: Cleared merged point data)

3. RESULTS

The accuracy assessment of the 3D model, which is conducted through combining the point data obtained with TLS, an active detection method, with the point data obtained from the UAS camera images, a passive detection system, has been tested by investigating each facade of the building. This investigation was carried out by comparing measurements taken from all facades of the building at the field to those taken on the model. Figure 6 shows the sections on the building where the measurements taken with the total station are compared to the model measurements. Since there are two different data sources (UAV and TLS) in this research, a linear transformation matrix (a function) should be created between the different point data obtained from these two various data sources. As seen in Table 2, the RMSE value of
Table 2. Parameters of transformation						
MSE	Scale		Transform	ation Matrix		
Y	•1	A11	A12	A13	A14	
		0.617	0.802	0.013	-14.506	
_	0121	A21	A22	A23	A24	
lm		-0.802	0.617	0.005	-20.985	
.0581		A31	A32	A33	A34	
	1.0	-0.004	-0.014	1.012	1147.526	
•		A41	A42	A43	A44	
		0.000	0.000	0.000	1.000	

the obtained transformation matrix is approximately 6 cm. The scale was calculated as 1:1.012 on average.

In order to perform the accuracy analysis of the 3D model of the building, total station measurements were made, and the sizes of various details around the building were determined. With the 3D model, the actual dimensions of the building elements were listed, and the differences were calculated. Statistical analysis was carried out using the differences. RMSE and StD. values indicate that a high-accuracy 3D model has been produced. In Table 3, the measurements acquired on different building details on the front, back, and side facades and compares these with the measurements acquired on the model.



Figure 6. Comparison of the measurements (A: Measurement No 2, B: Measurement No 3, C: Measurement No 18, D: Measurement No 11)

Facade	Measurement	Description	Measure from	Measure	Differences
	Number	-	Field (m)	from	(m)
				Model (m)	
	1	Building bottom left	9.820	9.815	0.0055
Side 1		to right			
Side I	2	Bottom window	0.570	0.586	-0.0160
		wall to wall			
	3	Gas valve big	0.600	0.593	0.0067
	4	Gas valve small	0.400	0.370	0.0300
	5	Window bottom	2.580	2.600	-0.0200
		vent glass			
Back	6	Glass guard Width	0.860	0.822	0.0380
	7	Glass cover length	2.200	2.120	0.0800
	8	Protrusion	0.200	0.215	-0.0150
	9	Window inside	1.130	1.115	0.0150
	10	Window inside	0.560	0.600	-0.0400
	11	Connecting wall	3.070	3.058	0.0120
	12	Window width wall	0.550	0.578	-0.0280
		to wall			
Side 2	13	Floor tile	0.880	0.870	0.0101
Side 2	14	Bordure	4.000	4.021	-0.0209
	15	Side wall	2.510	2.501	0.0095
	16	Intermediate door	1.000	0.953	0.0474
		wall to wall			
	17	Floor ventilation	9.870	9.907	-0.0369
	18	Main door	2.840	2.838	0.0025
Front	19	Small marble next to	0.910	0.920	-0.0100
		the main door			
	20	Front wall width	0.320	0.294	0.0257

Table 3.	Comparison	of the measure	ements
rable 5.	Companson	or the measure	monu

As a result of statistical analysis, the RMSE of the measurement differences was determined to be 2.95 cm. The StD of the differences was approximately 3 cm. The mean of the measurement differences was 4.8 mm, while the minimum measurement difference value was -4 cm. The maximum measurement difference was 8 cm (Table 4). The graph displaying the statistical analysis results of the measurement differences is presented in Figure 7.

Table 4. Statistical analysis of differences (Min: Measurement Number 10 and Max: Measurement Number 7)

(tullioer /)						
RMSE (m)	StD (m)	Mean (m)	Median (m)	Min. (m)	Max. (m)	
0.0295	0.0299	0.0048	0.0061	-0.0400	0.0800	



Figure 7. Chart of statistical analysis of differences

Given the normal distribution of error, the accuracy value is calculated within a certain confidence interval. The statistical results calculated at the 95% confidence interval for all the different measures are given in Table 5 and Figure 8 contains the graphical representation of the analysis.

Table 5. Statistical analysis of differences values within the 95% confidence interval



Figure 8. Chart of statistical analysis of differences within the 95% confidence interval

4. CONCLUSIONS

Within the scope of the study, the 3D modeling of Meliha Ercan Guest House, located within the campus of Selçuk University, was carried out using TLS and UAS. In this research, point data (the building's roof and back facade) that cannot be obtained by TLS were attempted to be completed with point data obtained via UAS photogrammetry. It has been revealed with the research that UAV data can be used in cases where the roofs of the buildings cannot be obtained with TLS or that TLS data is suitable for integration in cases where the side facades of the building cannot be modeled with the UAV data. In order to assess the accuracy of the created 3D model, the lengths of the horizontal and vertical facades of the building were determined using the classical measurement technique. The identical facades were

measured on the created model, and statistical analysis of the measurement difference was conducted. As a result, the RMSE of the 3D model obtained at a 95% confidence interval was 2.29 cm, and its StD was 2.34 cm. Therefore, in cases where appropriate image/data acquisition is limited due to unsuitable terrain conditions or incomplete data that cannot be obtained with a single measurement technique, point data obtained from multiple sources were combined, and the applicability of the method as demonstrated by the accuracy of the resulting 3D model. It has been shown in the study that by merging point data from multiple sources, a more accurate and lesser facade 3D model can be obtained as a void. In addition, in analyzing the accuracy of the transformation matrix function used to combine different data types, the 1:1.012 scale reveals an acceptable modeling result.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that be aware and accept all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Lütfiye Karasaka: Visualization, Investigation, Supervision. **Hasan Bilgehan Makineci**: Data Collection, Writing- Reviewing and Editing. **Kasım Erdal**: Software, Validation.

Declaration of Competing Interest

The authors declared that they have no conflict of interest.

Funding / Acknowledgements

This work is supported by Konya Technical University Scientific Research Projects Coordinatorship with Project number 191005034.

Data Availability

The datasets generated and analysed during the current study are not publicly available but are available from the corresponding author on reasonable request.

REFERENCES

- [1] Lichti, D. D., W. Tredoux, R. Maalek, P. Helmholz and R. Radovanovic, "Modelling extreme wideangle lens cameras." The Photogrammetric Record, 2021.
- [2] Karasaka, L., H. Karabörk, B. Makineci, A. Onurlu and G. İşler, "Indoor Surveying with Terrestral Photogrammetry: A Case Study for Sırçalı Masjid" **6**: 810-817, 2018.
- [3] Beyene, S. M., "Estimation of Forest Variable and Aboveground Biomass using Terrestrial Laser Scanning in the Tropical Rainforest." Journal of the Indian Society of Remote Sensing 48(6): 853-863, 2020.
- [4] Wang, C., X. Xu, L. Yu, H. Li and J. B. H. Yap, "Grid algorithm for large-scale topographic oblique photogrammetry precision enhancement in vegetation coverage areas." Earth Science Informatics 14(2): 931-953, 2021.
- [5] Kushwaha, S., K. R. Dayal, S. Raghavendra, H. Pande, P. S. Tiwari, S. Agrawal and S. Srivastava,
 3D Digital documentation of a cultural heritage site using terrestrial laser scanner A case study.
 Applications of Geomatics in Civil Engineering, Springer: 49-58, 2020.
- [6] Shokri, D., H. Rastiveis, W. A. Sarasua, A. Shams and S. Homayouni, "A Robust and Efficient Method for Power Lines Extraction from Mobile LiDAR Point Clouds." PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing Geoinformation Science: 1-24, 2021.

- [7] Ulvi, A., "Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners." International Journal of Remote Sensing **42**(6): 1994-2021, 2021.
- [8] Herban, I. and C. B. Vilceanu, "Terrestrial laser scanning used for 3D modeling. 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 2012.
- [9] Arıkan, D., F. Yıldız and H. B. Makineci, "Hava Lidarı Verilerine Uygulanan Farklı Enterpolasyon Yöntemlerinin Sam Doğruluğuna Etkisi, "Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi 9(2): 377-394, 2021
- [10] Deliry, S. I. and U. Avdan, "Accuracy of Unmanned Aerial Systems Photogrammetry and Structure from Motion in Surveying and Mapping: A Review." Journal of the Indian Society of Remote Sensing 49(8): 1997-2017, 2021
- [11] Dhulkefl, E., A. Durdu and H. Terzioğlu, "DIJKSTRA ALGORITHM USING UAV PATH PLANNING." Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi 8: 92-105, 2020
- [12] Makineci, H. B., H. Karabörk and A. Durdu, "ANN estimation model for photogrammetry-based UAV flight planning optimisation." International Journal of Remote Sensing: 1-23, 2021.
- [13] Wierzbicki, D., "Multi-camera imaging system for UAV photogrammetry." Sensors **18**(8): 2433, 2018.
- [14] Alfio, V. S., D. Costantino and M. Pepe, "Influence of Image TIFF Format and JPEG Compression Level in the Accuracy of the 3D Model and Quality of the Orthophoto in UAV Photogrammetry." Journal of Imaging 6(5): 30, 2020.
- [15] Toprak, A. S., N. Polat and M. Uysal, "3D modeling of lion tombstones with UAV photogrammetry: a case study in ancient Phrygia (Turkey)." Archaeological Anthropological Sciences 11(5): 1973-1976, 2019.
- [16] Pepe, M. and D. Costantino, "Uav photogrammetry and 3d modelling of complex architecture for maintenance purposes: The case study of the masonry bridge on the sele river, italy." Periodica Polytechnica Civil Engineering 65(1): 191-203, 2021.
- [17] Makineci, H. B., H. Karabörk and A. Durdu, "Comparison of Digital Elevation Models Produced with Photogrammetric Usage of UAV by Geodetic Techniques." Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi **2**(2): 58-69, 2020.
- [18] Makineci, H. B., and Karasaka, L., "Investigation of 3D models acquired with UAV oblique images". Turkish Journal of Geosciences, 2(2), 13-20, 2021.
- [19] Karabörk, H., L. Karasaka, H. B. Makineci, A. Tanrıverdi, B. Yener, N. Ulutaş and F. N. Öztürk, "3D Modelling of Geometric Triangle Construction Elements in Indoor Spaces: A Case Study for Tahir and Zühre Masjid." International Journal of Environment Geoinformatics 6(1): 135-138, 2019.
- [20] Šašak, J., M. Gallay, J. Kaňuk, J. Hofierka and J. Minár, "Combined use of terrestrial laser scanning and UAV photogrammetry in mapping alpine terrain." Remote Sensing 11(18): 2154, 2019.
- [21] Yurtseven, H., "Comparison of GNSS-, TLS-and different altitude UAV-generated datasets on the basis of spatial differences." ISPRS International Journal of Geo-Information **8**(4): 175, 2019.
- [22] Bolkas, D., B. Naberezny and M. Jacobson, "Comparison of sUAS Photogrammetry and TLS for Detecting Changes in Soil Surface Elevations Following Deep Tillage." Journal of Surveying Engineering 147(2): 04021001, 2021.
- [23] Hirt, P.-R., Y. Xu, L. Hoegner and U. Stilla, "Change Detection of Urban Trees in MLS Point Clouds Using Occupancy Grids." PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing Geoinformation Science: 1-18, 2021.
- [24] Achille, C., A. Adami, S. Chiarini, S. Cremonesi, F. Fassi, L. Fregonese and L. Taffurelli, "UAVbased photogrammetry and integrated technologies for architectural applications methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy)." Sensors 15(7): 15520-15539, 2015.
- [25] Beg, A., Boyutlu Modellemede Yersel Lazer Tarama ve İnsansız Hava Araçları Verilerinin Entegrasyonu ve Kilistra Antik Kenti Örneği Master, Yüksek Lisans Tezi, TC Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2018.

- [26] Jo, Y. H. and S. Hong, "Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry." ISPRS International Journal of Geo-Information 8(2): 53, 2019.
- [27] Valenti, R. and E. Paternò, "A comparison between TLS and UAV technologies for historical investigation." Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci **42**(2): W9, 2019.
- [28] Wijesingha, J., T. Moeckel, F. Hensgen and M. Wachendorf, "Evaluation of 3D point cloud-based models for the prediction of grassland biomass." International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation 78: 352-359, 2019.
- [29] Lussem, U., J. Schellberg and G. Bareth, "Monitoring forage mass with low-cost UAV data: case study at the Rengen grassland experiment." PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing Geoinformation Science **88**(5): 407-422, 2020.
- [30] Elkhrachy, I., "Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry." Alexandria Engineering Journal **60**(6): 5579-5590, 2021.
- [31] Jiménez-Jiménez, S. I., W. Ojeda-Bustamante, M. d. J. Marcial-Pablo and J. Enciso, "Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy." ISPRS International Journal of Geo-Information 10(5): 285, 2021.
- [32] Xiao, T., X. Wang, F. Deng and C. Heipke, "Sequential Cycle Consistency Inference for Eliminating Incorrect Relative Orientations in Structure from Motion." PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing Geoinformation Science: 1-17, 2021.



ANFIS-BASED REAL-TIME POWER ESTIMATION FOR WIND TURBINES

*Göksel GÖKKUŞ

Nevşehir Hacı Bektaş University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, Nevşehir, TÜRKİYE

gokselgokkus@nevsehir.edu.tr

Highlights

- Machine Learning: The method proposed in the study can estimate the output power of the wind turbine by learning with ANFIS without the need for a mathematical equation.
- Sustainability: With the proposed method, the Vestas V44-600 model is able to predict what the power curve will be like using only the atmospheric data of that region, without the need to physically install the model.
- Flexibility: The proposed method allows, with minor modifications, to estimate the output power of not only the Vestas V44-600 model, but also other wind turbine models.
- Current Trends: In terms of study results; The behavior of ANFIS, which has been applied to many areas and obtained very efficient results, proves that it also provides success in non-linear systems such as wind turbines.



Graphical Abstract

Flowchart of the proposed method

*Corresponding Author: Göksel GÖKKUŞ, gokselgokkus@nevsehir.edu.tr



ANFIS-BASED REAL-TIME POWER ESTIMATION FOR WIND TURBINES

*Göksel GÖKKUŞ

Nevşehir Hacı Bektaş University, Engineering and Architecture Faculty, Electrical Electronics Engineering Department, Nevşehir, TÜRKİYE gokselgokkus@nevsehir.edu.tr

(Geliş/Received: 06.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.12.2022)

ABSTRACT: In this study, it is aimed to make real-time power estimation for the V44-600 model wind turbine of Vestas company. The scope of the study is aimed to perform ANFIS-based power estimation for the V44-600 VESTAS wind turbine, which is intensely used in the wind industry, by using the wind speed and air density data of the city of Nevşehir. For this purpose, an Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS) trained on V44-600 wind turbine data was used. For the training and testing steps of ANFIS, wind speed, air density, and output power of the wind turbine are used as input-output parameters. As a result of the simulations and training, the percent relative error value in the widest range where the prediction value deviates from the true value is 11.86%. This value was higher than expected due to the scarcity of the data used in the ANFIS training (144) and the repetitive values in the output power. Similarly, the lowest efficiency value is 89.4%. Despite all this, it has been observed that ANFIS gives good results if the data used in the testing process is within the scope of the data used in the training. Moreover, the developed model when supported with 32-bit hardware can make real-time power estimation for a real wind turbine. The main motivation for this study; is develop a model that can predict the output power for the Vestas V44-600 model based on wind speed and air density data. In addition, it is to produce the Fuzzy Interface System (FIS) file that enables the developed model to run on embedded systems.

Keywords: ANFIS, Wind Turbine, Real-Time Power Estimation, Vestas V44-600

1. INTRODUCTION

In addition to being a rapidly increasing energy policy in the last 20 years due to its high energy potential, wide application area, and negative effects of fossil resources on the environment, wind power; has become a remarkable phenomenon in both industrial and academic research [1]. In addition to these, it came to the idea that every country should provide the energy it needs with its resources, due to the current energy crisis due to epidemics and war situations.

Although fossil fuels are easy to convert into various energy fuels, having a regional potential is one of their biggest drawbacks. For many such reasons, the interest in energy sources that can be found all over the world such as wind and solar has increased even more []2. Although electricity generation from solar energy is very popular due to its accessibility and relatively simple structure, the energy value produced is seriously reduced in the winter months, as it is very affected by shading, dust, and dirt, and in the evening hours when the sun is not present. In addition, when it is evaluated as the rate of benefiting from solar energy, an average 1000 W/m² of energy comes to the earth's surface and when it is considered the accessible price and number of solar panels work with a maximum efficiency of 20 %, a maximum of 200 W electrical energy can be obtained from an area of 1 m² under full sun and at an appropriate angle. For this reason, to obtain a very high amount of energy by using solar panels, it is necessary to cover large agricultural areas or apply them on the sea-ocean.

*Corresponding Author: Göksel GÖKKUŞ, gokselgokkus@nevsehir.edu.tr

Agricultural areas or sea-ocean surfaces-floors covered with solar panels are deprived of the beneficial light and heat of the sun and cause various ecological problems.

Wind power has a major role in providing energy to industrial and local consumers, it has the largest share among other alternative energy sources [3-4]. But it also has some disadvantages like solar energy. Chief among these are mechanical problems. Because wind turbines convert mechanical energy into electrical energy, they have many moving parts. Most failures from wind turbines occur in the bearing structure [5]. Apart from that, wind energy is not always accessible like solar energy. One of the most fundamental problems in wind turbine management is the high rate of deterioration and variation in wind speed and the inability to effectively measure this variation [6]. In the generation of electricity from wind, the operation of the system is as important as the installation. Wind turbines that are not operated properly have a long payback period, and the longer this process, the higher the maintenance-repair and operating costs.

With the developing wind energy policy, the need for more and more complex control techniques on turbines is increasing [7]. Estimating the potential and power output of wind energy in large-scale applications such as wind farm is critical to the profitability and realization of the system [8]. To make maximum use of both wind and solar energy, it may be possible to shorten the payback period of the system by applying various control methods.

Producing sustainable and clean energy, creating more efficient wind turbines and maximizing system efficiency can only be possible by estimating the design parameters of WT correctly [9-10]. Moreover, it is possible to increase the efficiency of wind turbines by using ANFIS-based Maksimum Power Point Tracker (MPPT) algorithms and mechanical control methods [11]. Efficiency increases in wind turbines can be done with other methods besides MPPT. On the basis of such methods; it can be done by estimating the power that can be produced with the wind speed, air temperature, and rotation information of the turbine [12]. Making power estimation using various parameters allows early warning of risky situations that may occur in turbines and taking precautions, as well as error checking [13]. With ANFIS-based studies, not only power estimation is made, but also the speed and position estimation of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSGs) to provide power increase and efficiency in turbines, the excitation processes of such generators can be controlled without sensors [14].

The rest of this article is organized as follows: In Section II, a literature review of studies related to the subject of the article is addressed. In Section III, the materials and methods that enabled the study to achieve its purpose are explained. In Section IV, the simulation results are provided and discussed. Section V contains the conclusion.

2. RELATED WORKS

When similar studies in the literature are examined; [15] conducted an ANFIS-based study estimating the optimal power coefficient value for wind turbines. FLC member functions are set by using ANFIS in the simulation environment. In another study [16], they conducted an ANFIS-based study that calculates the effective wind speed for wind turbines online. Within the study, it makes an estimation using real-time wind turbine Tip Speed Ratio (TSR), mechanical power, and rotor speed information. [17], estimated the effective wind velocity value by using an ANFIS-based method in their study, TSR and blade pitch angle were used as input parameters to ANFIS.

In another study conducted within the scope of wind turbine parameter estimation [18], they carried out a method that can predict torque for Savonius-type wind turbines by using ANFIS. The obtained results were compared with the Radial Basis Function (RBF). In the study [19] for the estimation of power output in wind turbines, an estimation study including soft computing methods in which wind speed and rotor speed are used as inputs. Scope of work; they used ANFIS, Elman Neural Network (ENN), and Feed-forward Neural Network (FNN) approaches.

In another study [20], they prepared an ANFIS-based study for the safe and efficient operation of systems that generate energy from wind in variable and unpredictable natural conditions. The study aimed to estimate the power coefficient value, which is a function of tip-speed ratio and pitch angle, with ANFIS. With the study, a National Renewable Energy Laboratory (NREL) offshore 5 MW baseline wind turbine was simulated. The proposed method is more reliable, computationally intelligent, and easy to implement for rapid estimation of power efficiency.

In another study [21], in which rotor speed, turbine output power, and pitch angle were used, wind speed estimation was made. ANFIS was used as an estimation tool within the scope of the study. They used ANFIS to estimate output power for Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT), which is more efficient in overcoming the negative effects of the naturally variable behavior of wind speed [22]. Output power, rotor speed, and output torque data are used in the training of ANFIS. The performance and analysis of the intelligent forecasting system researches done in the simulation environment.

3. MATERIAL AND METHOD

In this section; details of the real-time power estimation study tested on the Nevşehir province data are explained by making ANFIS training on the Vestas V44-600 model wind turbine data.

3.1. Model and operation of wind turbine

Wind turbines are systems that first convert kinetic energy into mechanical energy and then into electrical energy. A simplified block diagram of the process of generating electricity from wind turbines is given in Figure 1.



Figure 1. Block diagram of power conversion in wind turbines

According to the block diagram in Figure 1; wind hitting the turbine blades creates a lifting force on the blades due to the aerodynamic structure of the blades. This lifting force acting on the wings turns into a rotational force due to the fact that the wings are fixed on the rotor. The resulting rotational force is applied to the electric generator directly or via the transmission mechanism such as the gearbox. At the end of all these processes, wind energy in the form of kinetic energy is converted into electrical energy. It is possible to calculate the power that can be obtained from the wind turbine with Equation 1. The mechanical power obtained from the turbine is calculated with Equation 2.

$$P = \frac{1}{2}A\rho V^3 \tag{1}$$

$$P_m = \frac{1}{2} A \rho V^3 C_P(\alpha, \beta)$$
⁽²⁾

$$C_P = \frac{P_m}{P} \tag{3}$$

Wind turbines, the conversion of the kinetic energy of the wind to mechanical energy is also called the efficiency of the wind turbines and is calculated with Equation 3. Where;

A : Rotor swept area in m^2 VWind speed in m/s ρ Air density in kg/ m° C_{P} : *Power coefficient* P_m : Wind türbine output power in w α : Tip Speed Ratio (TSR) β : Blade pitch angle in $^{\circ}$

In the study, the data of the V44-600 model, which is a commercial product of Vesta's, has been investigated. The company has published various data on its products as open access. The electrical and mechanical parameters of the V44-600 model are given in Table 1.

In wind turbines, the energy conversion process and the control of the turbine are carried out according to the amount of wind speed. Wind turbines; it is an energy conversion system that is costly to install and has operating costs due to the mechanical components in their structure. Companies investing in the field of energy expect these systems to cover their installation costs as soon as possible. The healthy operation and sustainability of wind turbines can only be possible if the stages in the energy production process are carried out properly and their maintenance is carried out at appropriate intervals. Operating wind turbines outside of the appropriate wind speeds or in areas with insufficient energy potential will do more harm than good. The wind speed and turbine output power graph of the V44-600 model, whose data were used within the scope of the study, is given in Figure 2.

Table 1. Electrical data of the V44-600 wind turbine in the study [23].					
Parameter	Value	Unit			
Rated Power	600.0	kW			
Rated Wind Speed	16.0	m/s			
Survival Wind Speed	52.0	m/s			
Cut-in Wind Speed	4.50	m/s			
Cut-out Wind Speed	20.0	m/s			
Rotor Diameter	44.0	М			
Swept Area	1521.0	m^2			
Number of Blades	3	Pieces			
Rotor Maximum Speed	28.0	U/min			
Tipspeed	65	m/s			
Rotor Material	GFK/Epoxy	-			
Gear Box Ratio	1:51	-			
Generator Type	Asynchronous				
Gen. Maximum Speed	1650	U/min			
Generator Voltage	690	V			
Grid Connection	Thyristor	-			
Frequency	50	Hz			



Figure 2. Wind speed and output power graph of V44-600 model.

When we examine the areas on the graph:

Region 1: It is the area where the wind speed is too low to generate power or is much lower than the desired value. According to the manufacturer, the wind turbine is disabled at wind speeds below 4.5 m/s, and according to the company, the lower wind cut value of the V44-600 model is 4.5 m/s.

Region 2: The wind speed in this area is higher than the lower cut value and less than the optimum value. In other words, the wind speed varies between 5-16 m/s. In this area, it is possible to produce mechanical

power and therefore electrical energy. The wind turbine is constantly controlled by various methods in this area, and it is aimed to produce maximum power from the turbine. This field is also called the MPPT field.

Region 3: This is the area where the wind turbine produces the highest power and energy. The rotor speed of the wind turbine is fixed in this area, ensuring that the power produced is at the maximum rate. The rotor speed of the turbine is fixed by methods such as blade angle control, variable TSR, and variable Cp.

Region 4: This area is the wind speed area determined by the manufacturer and includes the risks if the wind turbine continues to operate. If the wind speed exceeds 20 m/s, the braking process is activated, preventing structural damage to the components under pressure or to the wind turbine.

A. Training and Testing Data

ANFIS is a widely used learning approach today and is trained using data stacks with input and output parameters and aims to reach the desired output value by using various input data [24].

With this aspect, ANFIS can be used in many places to solve the problem [25]. It is possible to study and predict wind energy with both single and hybrid ANFIS [26]. In order to make real-time output power estimation of the wind turbine with ANFIS, historical data to be trained beforehand is needed.

The wind speed (*V*), air density (ρ), and output power (P_m) values of the V44-600 model used in the ANFIS training are given in Table 2.

		Air Densiyt (kg/m³)									
	rower (kw)		1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.225	1.24	1.27
		4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		5	24.7	25.8	26.8	27.8	28.9	29.9	30.4	31.0	32.0
		6	65.2	67.4	69.6	71.8	74.0	76.2	77.3	78.4	80.6
		7	115	119	123	126	130	134	135	137	141
		8	176	181	187	192	198	203	206	209	214
	(s)	9	246	253	261	268	275	283	287	290	298
Speed (m.	<i>m</i>)	10	320	329	338	348	357	366	371	375	384
	eed	11	393	404	415	425	436	445	450	454	463
	Sp	12	461	471	482	492	503	511	514	518	525
	ind	13	517	525	534	542	551	556	558	560	565
	Μ	14	557	563	568	573	579	581	582	584	586
		15	581	584	587	589	592	593	594	594	595
		16	593	594	595	596	598	598	598	598	599
		17	598	598	598	599	599	599	600	600	600
		18	599	599	600	600	600	600	600	600	600
		19-20	600	600	600	600	600	600	600	600	600

 Table 2. Wind and power data of the V44-600 wind turbine in the study (thewindpower).

The values given in Table 2 were taken into operation with the block diagram given in Figure 3 and ANFIS training was carried out. Neural network in ANFIS adjusts the input parameters of the membership function in the fuzzy inference system.



Figure 3. Block diagram of the ANFIS training process

The wind turbine data given in Table 2 were trained with ANFIS and the FIS file required for FLC was produced. The layers and members of the generated FIS file are given in Figure 4.



Figure 4. Layer and relationships graph of the FIS file created in the study

According to the diagram given in Figure 4, the air density (ρ) and wind speed (V) parameters are used as inputs and the turbine output power is calculated as a result of the relations between the layer and the members.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The simulations are performed to make real-time power estimation on the Vestas V44-600 model. For this purpose, first of all, ANFIS training was conducted over the wind speed, air density, and power output values of the turbine provided by the company in Table 2. In this context, the graph of the data obtained from Table 2 is given in Figure 5 and ANFIS was trained using these data. The data stacks obtained from Table 2 were applied to the simulation model given in Figure 6, and the training data tested and verified.



Figure 5. Graph of data used for ANFIS training.



Figure 6. A simulation model in which data used for ANFIS training is tested and verified.

The graph given in Figure 7 was obtained from the test study carried out through the model given in Figure 6. The black graph shows the power data used in the training, and the blue graph shows the predicted power data made by ANFIS.



Figure 7. Comparison graphs of data used for training and testing.

As a result of the simulations and training, the estimated power value was found to be 671.2 kW while the actual power value was 600 kW in the widest range where the estimated value deviated from the true value. The reason for this situation is the small number of data (144 items) in Table 2 used in ANFIS training and the repetitive values in the output power. The percent relative error value of this difference is 11.86%. Similarly, the lowest efficiency value is 89.4%. Within the scope of the study, the model created to make the output power estimation with ANFIS over the wind speed and air density data of Nevşehir province is given in Figure 8.



Figure 8. Block diagram of the model that enables the use of Nevşehir province data.

By using the model given in Figure 8, the wind speed and air density data of Nevşehir province were used as input, the output power of the Vestas V44-600 model was estimated and its graph was created. The wind speed, air density, and estimated output power graph of the V44-600 model for Nevşehir are given in Figure 9.



Figure 9. Wind data of Nevşehir province and estimated output power graph

The graph of the wind speed and air density data set for Nevşehir province is given in Figure 9 (a). The testing process of the FIS file obtained as a result of the ANFIS training was carried out on this data set. The graph of the data set of the estimated power value obtained as a result of the test process is given in Figure 9 (b). Detailed analysis of the estimated output power value versus the wind speed value is given in Figure 10.



Figure 10. Analysis graph of the estimated output power value versus the wind speed value

When the graph in Figure 10 is carefully examined, it can be seen that the Vestas V44-600 model behaves in accordance with its characteristics and cannot generate power at wind speeds below 5 m/s.

4. CONCLUSION

In this paper, we proposed an ANFIS-based power estimation forecasting approach to make real-time power estimation for the V44-600 model wind turbine of Vestas company. The scope of the study is aimed to perform ANFIS-based power estimation for the V44-600 VESTAS wind turbine, which is intensely used in the wind industry, by using the wind speed and air density data of the city of Nevşehir. Firstly, real data from the V44-600 model were used in the ANFIS training. Wind speed, air density, and output power of the wind turbine are used as input-output parameters. Using the real data values given in Table 2, ANFIS training was carried out. After that Neural network in ANFIS adjusts the input parameters of the membership function in the fuzzy inference system. As a result of the simulations and training, the estimated power value was found to be 671.2 kW while the actual power value was 600 kW in the widest range where the estimated value deviated from the true value. The reason for this situation is the small number of data (144 items) in Table 2 used in ANFIS training and the repetitive values in the output power. The percent relative error value of this difference is 11.86%. Similarly, the lowest efficiency value is 89.4%. When the graph in Figure 10 is carefully examined, it can be seen that the Vestas V44-600 model behaves in accordance with its characteristics and cannot generate power at wind speeds below 5 m/s. It has been observed that ANFIS gives good results if the data used in the testing process is within the scope of the data used in its training. Moreover, the developed model can be transferred to an embedded system with an embedded coder. When the developed model is supported with 32-bit hardware, it can make real-time power estimation for a real wind turbine. The main motivation for this study; To develop a model that can predict the output power for the Vestas V44-600 model based on wind speed and air density data. In addition, it is to produce the Fuzzy Interface System (FIS) file

that enables the developed model to run on embedded systems.

Declaration of Ethical Standards

Author agree and commit to abide by all ethical guidelines, including authorship, citation, data reporting, and original research publication.

Credit Authorship Contribution Statement

Author agree to CRediT (Contributor Roles Taxonomy). The manuscript is not the product of a project or group work so there in no need to recognizing individual author contributions.

Declaration of Competing Interest

There is no conflict competing Interest such as the validity of research or financial gain.

Funding / Acknowledgements

There are no funding or research grants (and their source) received in the course of study, research or assembly of the manuscript.

Data Availability

There in no research data or a data repository in available.

REFERENCES

- O. Noureldeen, & I. Hamdan, "An Efficient ANFIS Crowbar Protection for DFIG Wind Turbines during Faults", 2017 Nineteenth International Middle-East Power Systems Conference (Mepcon), 263-269, 2017.
- [2] Y. S. Guclu, "Angström-Prescott Modelinin Polinom İle Geliştirilmesi Ve Diyarbakir Güneş Işinimi Verilerine Uygulanmasi" *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 7(1), 75-88, 2019.
- [3] L. Rajaji, & C. Kumar, "ANFIS Based Soft Starter for Grid Integration with Wind Turbine System", 2008 Ieee Region 10 Conference: Tencon 2008, Vols 1-4, 1560-+, 2008.
- [4] P. Pinson, "Wind Energy: Forecasting Challenges for Its Operational Management", *Statistical Science*, 28(4), 564-585, 2013. doi:10.1214/13-Sts445.
- [5] M. Kordestani, M. Rezamand, R. Carriveau, D.S.K. Ting, & M. Saif, "Failure Diagnosis of Wind Turbine Bearing Using Feature Extraction and a Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)", *Advances in Computational Intelligence, Iwann 2019, Pt I, 11506, 545-556, 2019. doi:10.1007/978-3-030-20521-8_45.*
- [6] K. Ramesh, & P.B. Kumar, "A Nonlinear Controller Design for Variable Speed Wind Turbines Using Anfis" Proceedings of the 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (Icces 2018), 639-644, 2018.
- [7] B. Chen, P.C. Matthews, & P. J. Tavner, "Wind turbine pitch faults prognosis using a-priori knowledge-based ANFIS", *Expert Systems with Applications*, 40(17), 6863-6876, 2013. doi:10.1016/j.eswa.2013.06.018.
- [8] R. Belu, & D. Koracin, "Effects of complex wind regimes and meteorlogical parameters on wind

turbine performances", Paper presented at the 2012 IEEE Energytech, (2012, 29-31 May 2012).

- [9] T. Demirdelen, P. Tekin, I. O. Aksu, & F. Ekinci, "The Prediction Model of Characteristics for Wind Turbines Based on Meteorological Properties Using Neural Network Swarm Intelligence", *Sustainability*, 11(17), 2019. doi:ARTN 4803 10.3390/su11174803.
- [10] A. Heydari, M. Majidi Nezhad, M. Neshat, D. A. Garcia, F. Keynia, L. De Santoli, & L. Bertling Tjernberg, "A Combined Fuzzy GMDH Neural Network and Grey Wolf Optimization Application for Wind Turbine Power Production Forecasting Considering SCADA Data", *Energies*, 14(12), 3459, 2021.
- [11] M. R. Sarkar, S. Julai, C. W. Tong, & S. F. Toha, "Effectiveness of Nature-Inspired Algorithms using ANFIS for Blade Design Optimization and Wind Turbine Efficiency", *Symmetry-Basel*, 11(4), 2019. doi:ARTN 456 10.3390/sym11040456.
- [12] F. Ekinci, T. Demirdelen, & M. Bilgili, "Modelling of Wind Turbine Power Output by Using ANNs and ANFIS Techniques", 2017 Seventh International Conference on Innovative Computing Technology (Intech 2017), 126-131, 2017.
- [13] Q. Zhou, T. T. Xiong, M. B. Wang, C. M. Xiang, & P. Q. Xu, "Diagnosis and Early Warning of Wind Turbine Faults Based on Cluster Analysis Theory and Modified ANFIS", *Energies*, 10(7), 2017. doi:ARTN 89810.3390/en10070898.
- [14] A. D. Janarthanan, L. Venkatesan, & G. Muruganandam, "Sensorless Control of PMSG Wind Turbine Using ANFIS", *Energy Efficient Technologies for Sustainability*, 2013, 768, 131-135. doi:10.4028/.
- [15] D. Petkovic, Z. Cojbasic, & V. Nikolic, "Adaptive neuro-fuzzy approach for wind turbine power coefficient estimation", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 28, 191-195, 2013. doi:10.1016/j.rser.2013.07.049
- [16] A. B. Asghar, & X. Liu, "Adaptive neuro-fuzzy algorithm to estimate effective wind speed and optimal rotor speed for variable-speed wind turbine", *Neurocomputing*, 272, 495-504, 2018. doi:https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.07.022
- [17] F. Golnary, & H. Moradi, "Dynamic modelling and design of various robust sliding mode controls for the wind turbine with estimation of wind speed", *Applied Mathematical Modelling*, 65, 566-585, 2019. doi:10.1016/j.apm.2018.08.030
- [18] J. Sargolzaei, & A. Kianifar, "Neuro-fuzzy modeling tools for estimation of torque in Savonius rotor wind turbine", Advances in Engineering Software, 41(4), 619-626, 2010. doi:10.1016/j.advengsoft.2009.12.002
- [19] S. Tumse, A. Ilhan, M. Bilgili, & B. Sahin, "Estimation of wind turbine output power using soft computing models", *Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects*, 44(2), 3757-3786, 2022. doi:10.1080/15567036.2022.2066226
- [20] A. B. Asghar, & X. D. Liu, "Estimation of wind turbine power coefficient by adaptive neuro-fuzzy methodology", *Neurocomputing*, 238, 227-233, 2017. doi:10.1016/j.neucom.2017.01.058
- [21] F. Golnary, & H. Moradi, "Design and comparison of quasi continuous sliding mode control with feedback linearization for a large scale wind turbine with wind speed estimation", *Renewable Energy*, 127, 495-508, 2018. doi:10.1016/j.renene.2018.04.081
- [22] V. Nikolic, D. Petkovic, S. Shamshirband, & Z. Cojbasic, "Adaptive neuro-fuzzy estimation of diffuser effects on wind turbine performance", *Energy*, *89*, 324-333, 2018. doi:10.1016/j.energy.2015.05.126
- [23] Thewindpower. (08 July 2022). V44/600. *https://www.thewindpower.net/turbine_en_177_vestas_v44-600.php*. Retrieved from https://media.mwps.world/static/2011/03/Technical-description-Vestas-600-kW.pdf, (Erişim zamanı; 02, 24, 2023).
- [24] V. Gumus, İ. M. Yolluk, O. Simsek, & G. Soydan, "Batmiş Hidrolik Siçramada Geri Dönüş Bölgesi Uzunluğunun Yapay Zekâ Yöntemleriyle Tahmini", Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(3), 606-620, 2021.

- [25] A. A. Kulaksiz, "ANFIS-based estimation of PV module equivalent parameters: application to a standalone PV system with MPPT controller", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 21(8), 2127-2140, 2013.
- [26] P. A. Adedeji, S. Akinlabi, N. Madushele, & O. O. Olatunji, "Wind turbine power output very shortterm forecast: A comparative study of data clustering techniques in a PSO-ANFIS model", *Journal of Cleaner Production*, 254, 2020. doi:ARTN 120135 10.1016/j.jclepro.2020.120135



KOMŞU İZOLE SAÇILMA SAYISININ ALGORİTMASI

¹Mehmet Aykut TOSUN¹, ²Ersin ASLAN¹, ³Emin BORANDAĞ¹

¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde, TÜRKİYE ^{2,3}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE ¹aykuttosun@ohu.edu.tr, ²ersin.aslan@cbu.edu.tr, ³emin.borandag@cbu.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Ağların graflarla modellenebilirliğinden bahsedilerek, graflarda zedelenebilirlik yardımıyla da ağlarda güvenliğin sağlanabileceği konusu üzerinde durulmuştur
- Komşu ve izole kavramlarının önemi vurgulanarak komşu izole saçılma sayısının çalışmada kullanım amacı ortaya konulmuştur.
- Zedenelebilirlik ölçüm parametrelerinin yaptığı ölçümü hesaplayan algoritma çalışmalarının literatürdeki örneklerinden bahsedilmiş, algoritma ile hesaplama yapıldığında insan işgücünden zaman ve çaba konusunda tasarruf sağlanacağının önemi vurgulanmış ve komşu izole saçılma sayısını hesaplayan algoritma literatürde ilk kez verilmiştir.
- Verilen algoritma çeşitli yazılım metrikleri ile analiz edilmiş, algoritma karmaşıklığı hesaplanmış ve kullanılabilir bir algoritma olduğu gösterilmiştir.
- Verilmiş olan komşu izole saçılma sayısını hesaplayan algoritmanın ürettiği hesaplama sonuçları ile gerçek komşu izole saçılma sayısı hesaplama sonuçları tablolarla karşılaştırılarak ölçümlerin doğruluğu gösterilmiştir.



KOMŞU İZOLE SAÇILMA SAYISININ ALGORİTMASI



¹Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi, Niğde, TÜRKİYE ^{2,3}Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE ¹aykuttosun@ohu.edu.tr, ²ersin.aslan@cbu.edu.tr, ³emin.borandag@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 12.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.12.2022)

ÖZ: Ağ güvenliği ve güvenilirliği, bilgisayar ağlarının önemli bir parçasıdır. Bilgisayar korsanları nedeniyle ağ güvenliği iyileştirilmek zorundadır. İş sürekliliği, iyileştirme için başka bir nedendir. Ağlar graflarla modellenebilir. Grafların ve dolayısıyla ağların zedelenebilirliğini ölçmek için çeşitli parametreler mevcuttur. Bu makalede, komşu izole saçılma sayısı ele alınmış ve önerilen zedelenebilirlik ölçüm parametresinin herhangi bir graf için ölçülmesini önerdiğimiz bir algoritma geliştirilmiş ve algoritma yazılım kod metrikleri ile analiz edilmiş ve faydalı olduğu gösterilmiştir. Böylelikle herhangi bir graf için zedelenebilirlik ölçümü yaparken algoritma kullanarak insan işgücünden tasarruf sağlanacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Graf Teori, Algoritma, Ağ Tasarımı, Zedelenebilirlik, Komşu İzole Saçılma Sayısı (NIS)

Algorithm of Neighbor Isolated Scattering Number

ABSTRACT: Network security and reliability is an essential part of computer networks. Network security has had to improve due to hackers. Business continuity is another reason for improvement. Networks can be modeled with graphs. Various parameters exist to measure the vulnerability of graphs, and hence of networks. In this paper, we consider neighbor isolated scattering number and an algorithm has been developed for the proposed vulnerability measurement parameter, which we recommend to measure for any graph and the algorithm is analyzed by software code metrics and have been shown to be useful. Thus, it has been concluded that humanpower will be saved by using an algorithm while measuring vulnerability for any graph.

Keywords: Graph Theory, Algorithm, Network Design, Vulnerability, Neighbor Isolated Scattering Number (NIS)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Herhangi bir ağ, merkezleri ve aralarında bağlantıları olan ilişkisel bir yapıdır. Bu yapıda merkezler tepelerle (düğümlerle) ve bağlantılar ayrıtlarla (kenarlarla) ifade edildiğinde bir graf modeli oluşturulur. Ağlar graflarla modellendiğinde tasarlanırken zedelenebilirlikleri ölçülebilir ve ayrıca maliyeti hesaplanabilir. Ağ, henüz tasarım aşamasındayken güvenlik açıklarını öngörmek ve önlemek, bunu yanında daha ekonomik ve güvenli ağlar tasarlamak için önerilmiş bağlanırlık (connectivity) [1], mukavemet (tenacity) [2] ve kopma derecesi (rupture degree) [3] gibi zedelenebilirlik ölçüm parametreleri bulunmaktadır.

Bir ağın merkezleri veya bağlantıları fiziksel veya siber yolla hasar aldığında iletişim kesintiye uğrar. Zedelenebilirlik ölçümü, bu iletişim kesintisine kadar ağın direncini ifade eder. Bu ölçümler, bir ağın ne kadar hassas veya dayanıklı olduğuna dair fikir verir. Saçılma sayısı [4], bu zedelenebilirlik ölçüm parametreleri için bir örnektir. Birçok parametre türü, etkilenen ağ merkezlerinin komşularını yok sayar. Casus ağlarda bir merkez deşifre olduğunda, o merkezin komşuları da deşifre olur. Bu da iletişimin kesilmesine neden olur [5]–[7]. Bu nedenle komşuluk da dikkate alınmalıdır. Komşuluk kavramını kullanan parametrelerden biri komşu izole saçılma sayısıdır [8]. Komşu izole saçılma sayısının, [8] çalışmasında kullanılabilirliği ve ayırt edici sonuçlar verdiği gösterilmiştir. [8]'te komşu izole saçılma sayısı için matematiksel açıklamalar, teoremler ve bunların detayları verilmiştir.

Literatürde saçılma sayısı tabanlı, ancak izole ve komşuluk kavramlarını tek başına kullanan zedelenebilirlik parametrelerinin algoritmaları önerilmiştir. Bunlar, izole saçılma sayısını ölçen algoritmalar [9], [10] ve komşu saçılma sayısını ölçen algoritma [11] çalışmalarıdır. Biz, bu çalışmada komşuluk ve izole kavramlarını bir arada kullanan komşu izole saçılma sayısını ölçen algoritmayı ilk kez öneriyoruz. Bu çalışma, [8] çalışmasından farklı olarak komuşu izole saçılma sayısını ölçen bir algoritmayı ve bu algoritmanın analizini içermektedir.

Bu çalışmadaki amacımız, komşu izole saçılma sayısının algoritmasını oluşturmak ve insan gücünü azaltmaktır. Zedelenebilirlik ölçüm parametreleri çalışmalarında verilen tanımlar grafların zedelenebilirliğini ölçerken insan gücünü kullanmayı azaltıyor olsa da standart bir özel graf sınıfına girmeyen grafların algoritma kullanılarak hesaplanması insan gücünü daha çok azaltır. Bu algoritmanın kullanışlılığı yazılım kod metrik analiz sonuçlarıyla gösterilmiştir. Geliştirilen algoritma, Python programlama dili ile test edilmiştir. Bu bağlamda kod metrikleriyle analiz gerçekleştirmek için Radon [12] kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Radon, Halstead metriklerini, ham metrikleri, sürdürülebilirlik endeksini ve döngüsel karmaşıklığı hesaplayabilir [12]. Döngüsel Karmaşıklık, bir kod bloğunun artı 1 içerdiği kararların sayısına karşılık gelir. Kod boyunca doğrusal olarak bağımsız ayrıtların sayısıyla bu sayı (ayrıca McCabe numarası olarak da adlandırılır) eşittir. Bu sayı, bloklarda koşullu mantığı (döngü, if, boolean gibi mantıksal ifadeler) test ederken kılavuz olarak kullanılabilir. Sürdürülebilirlik Endeksi, farklı metriklerin bazı değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanır. Ham metrikler, diğer kod metriklerinin hesaplamak adına kullandığı kod içerindeki satır sayısını, yorum satırı sayısını, çok satırlı dizeleri, boş satır sayısını vb. ifade eder. Kodun ölçülebilir özelliklerini ve aralarındaki ilişkileri tanımak Halstead'in amacıdır [13]–[16]. Radon kütüphanesinin sonuçlarını verdiği bu yazılım metriklerinin detayları yazının sonraki bölümünde verilmiştir.

2. YAZILIM METRİKLERİ (SOFTWARE METRICS)

Yazılım metrikleri, yazılımda gerçekleştirilen ölçümlere dayalı olarak ölçülebilen veya hesaplanabilen değerlerdir. Beş ana yazılım metriği boyut, kalite, çaba, maliyet ve süredir [17]. Yazılım geliştirme sürecinde kaydedilen metrikler, hataların tespit edilmesine, yazılımın izlenmesine ve kalitesinin artırılmasına yardımcı olur. Yazılımda çok çeşitli bilgiler bulunduğundan farklı metrikler de geliştirilebilir. En iyi bilinen metriklerden biri, genellikle kaynak kodun basit satır sayısı olarak tanımlanan kodun boyutudur [18]. Chidamber Kemerer (CK) tarafından tanımlanan Nesne Yönelimli metrikler de yaygın olarak kullanılan metriklerdir. Ayrıca Halstead'in karmaşıklık metriği [19] ve McCabe'in Döngüsel Karmaşıklık metriği (CC) gibi bazı metrikler de geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılmaktadır. CC, (1) denkleminde verilen formülle hesaplanır [20].

$$CC = E - N + 2P \tag{1}$$

Burada E, yazılımın kontrol akış grafının ayrıt sayısını, N tepe sayısını ve P bu graftaki bağlı bileşenlerin sayısını temsil eder. CC için belirlenmiş olan ideal sınırlar şöyledir; 1-10 aralığı düşük risk ve basit karmaşık, 11-20 aralığı orta risk ve daha karmaşık, 21-50 aralığı yüksek risk ve karmaşık ve 50 üzeri çok yüksek risk ve test edilemez kod [20]–[22].

Yorum Oranı, (2) denkleminde görüldüğü gibi yorum ifadesinin sayısının toplam ifade sayısına bölünmesiyle hesaplanır.

$$Yorum \, Orani = Yorum \, if a desi/Top lam \, if a de \tag{2}$$

Ayrıca, literatürde Ortalama Derinlik ve Maksimum Derinlik gibi metrikler de tanımlanmıştır [22], [23]. Ortalama Derinlik, koddaki her bir ifadenin blok derinliklerinin toplanması ve ardından bu toplamın (2) denkleminde verilen toplam ifadeye bölünmesiyle hesaplanır. Maksimum Derinlik, en derin iç içe ifadenin blok derinliğidir.

Halstead Metrikleri: Halstead metrikleri, yazılımın ölçülebilir özelliklerini tanımlamak için kullanılır. Bu metrikler statik olarak kaynak koddan hesaplanır. (3) denkleminde Halstead program uzunluğu (\hat{N}) hesaplaması gösterilmiştir.

$$\widehat{N} = \eta_1 \log_2 \eta_1 + \eta_1 \log_2 \eta_2 \tag{3}$$

 η_1 , farklı operatörlerin sayısını, η_2 , farklı işlenenlerin sayısını temsil etmektedir. Bu sayılardan çeşitli yazılım ölçüleri hesaplanabilir. Programlama dillerinde sabit veya değişkenleri işleyen karakterlere operatör (operator), bu operatörlerin işlediği sabit veya değişkenlere ise işlenen (operand) denilmektedir.

Table 1. Calculations of Some Software Metrics					
Program sözlüğü	$\eta = \eta_1 + \eta_2$				
Program uzunluğu	$N = N_1 + N_2$				
Hesaplanan program uzunluğu	$\widehat{N} = \eta_1 \log_2 \eta_1 + \eta_2 \log_2 \eta_2$				
Hacim	$V = N \log_2 \eta$				
Zorluk	$D = (\eta_1/2) * (N_2/\eta_2)$				
Çaba	E = D * V				
Buglar	B = V/3000				

Çizelge 1. Bazı yazılım metriklerinin hesaplanması

 N_1 , toplam operatör sayısını, N_2 , toplam işlenen sayısını ifade eder. Verilen bu metriklerin ideal sınırları Halstead tarafından [19] çalışmasında belirtilmiştir.

Sürdürülebilirlik endeksi, (4) denklemindeki gibi hesaplanır [12], [15], [16].

$$S \ddot{u} r \ddot{u} le bilir lik Endeksi = \max \left[0,100 * \frac{171 - 5.2 \ln V - 0.23G - 16.2 \ln L - 50 \sin \sqrt{2.4C}}{171} \right]$$
(4)

Burada V Halstead hacmini, G döngüsel karmaşıklığı, L kodun kaynak satır sayısını (SLOC), C ise yorum satırlarının radyana dönüştürülmüş yüzdesini ifade eder. Çıkan sonuç kötüden iyiye şu şekilde yorumlanır; 0-9 aralığı C (kötü), 10-19 aralığı B (orta) ve 20-100 aralığı A (iyi) [12], [15], [16].

3. KOMŞU İZOLE SAÇILMA SAYISI (NEIGHBOR ISOLATED SCATTERING NUMBER)

Bu çalışmada komşuluk parametrelerinden biri olan komşu izole saçılma sayısı kullanılmıştır ve komşu izole saçılma sayısının tanımı şu şekilde verilmektedir: Bir *G* grafi için, komşu izole saçılma sayısı

$$NIS(G) = max\{i(G/X) - |X|: i(G/X) \ge 1\}$$
(5)

olarak tanımlanır. *X*, *G* grafının kesme stratejisidir, maksimum tüm kesme stratejileri için alınır ve i(G/X), *G*/*X* grafında izole tepelerin sayısıdır. *G* grafının tüm tepelerini içeren küme *V*(*G*) olarak ifade edilir. *NIS*(*G*) = i(G/X) - |X| ise, bir $X \subset V(G)$ kümesine *G* grafının *NIS-kümesi* olduğu söylenir [8].

Komşu izole saçılma sayısı, bir ağ zarar görmeden önce karşılaşacağı hasarı ölçer, böylece ağa gelecek zarar önceden görülebilir. Kullanılması planlanan iki graftan birinin büyük bir komşu izole saçılma sayısı varsa, graf daha savunmasızdır. Bu yüzden küçük değere sahip olan grafın kullanılması ağ için daha güvenilir olacaktır. Komşu izole saçılma sayısı ile ilgili detaylar Aslan tarafından [8]'te verilmiştir.

3.1. Bir Grafın Komşu İzole Saçılma Sayısını Hesaplayan Algoritma (Algorithm for Calculating the Neighboring Isolated Scattering Number of a Graph)

Bu kısımda bir grafın komşu izole saçılma sayısını hesaplayan algoritma verilmiştir. Şekil 1'deki algoritmada görüldüğü gibi temel birkaç işlemin de yürütülebilmesi için bazı metotlar kullanılmıştır. Bunlar Python için geliştirilmiş NetworkX [24] kütüphanesi içinde kullanılan graf yapısındaki metotlar ve arayüzlerdir. İzole tepe sayısını belirleyen IsolatedCount ve komşularıyla birlikte belirtilen tepeyi graftan kaldıran NeighborRemoveVertex olmak üzere iki yardımcı metot hesaplama için hazırlanmıştır.

Şekil 1'deki algoritma, graflar için komşu izole saçılma sayısını hesaplayabilir.

4. ALGORİTMA ANALİZİ VE SONUÇLARI (ALGORITHM ANALYSIS AND RESULTS)

Verilen algoritma ve yardımcı metotlar Python'da geliştirilmiş ve test edilmiştir. Test sonucunda yönsüz ve ağırlıksız graflar için, [8] çalışmasında bulunan "Bazı Özel Graf Sınıflarının Komşu İzole Saçılma Sayısı" bölümündeki teoremlere göre doğru sonuç verdiği görülmüştür.

Verilen algoritmanın karmaşıklığının hesaplanması (6), (7), (8), (9) ve (10) denklemlerinde gösterilmiş ve $O(2^n)$ olarak bulunmuştur. T(0), karmaşıklıkta ilk ve en kısa adımdır ve T(0) = 1'dir.

$$T(n) = T(n-1) + T(n-2) + \dots + T(0)$$
(6)

$$T(n-1) = T(n-2) + T(n-3) + \dots + T(0)$$
⁽⁷⁾

$$T(n) = T(n-1) + T(n-1) = 2 * T(n-1) = 2 * 2 * T(n-2)$$
(8)

$$T(n) = 2^{n} * T(n - n) = 2^{n} * T(0) = 2^{n} * 1$$
(9)

$$T(n) = O(2^n)$$
 (10)

Radon kütüphanesi yardımıyla elde edilen yazılım metrikleri analiz sonuçları Çizelge 2-5 üzerinde görülmektedir. Algoritma tarafından hesaplanan bazı zedelenebilirlik ölçüm sonuçları da Çizelge 6-9 üzerinde görülmektedir.

Çizelge 2'ye göre NIS algoritması 44 satırdan (LOC) oluşur. Mantıksal satırların sayısı (LLOC) 34'tür. Yorum satırlarının LLOC'ye oranının %20'nin üzerinde olması, programın yorum satırlarıyla iyi anlatıldığı anlamına gelir. SLOC, sürdürülebilirlik endeksi tanımında da görüldüğü gibi sürdürülebilirlik endeksi hesaplamasında yardımcı olur. C%L, yorum satırı sayısı ile LOC arasındaki oranı, C%S, yorum satırı sayısı ile SLOC arasındaki oranı, C+M%L ise yorum ve çok satırlı dize satırlarının sayısı ile LOC arasındaki oranı ifade eder.

```
Girdi: G graf,
       L graftaki toplam tepe sayısı olan özyineleme sayısı,
       S etkilenen tepe sayısı.
Çıktı: G grafının komşu izole saçılma sayısı
   1: if L = 0 then
  2:
          # Eğer özyineleme sayısı 0 ise G grafindaki izole tepe sayısını döndür
          return IsolatedCount(G)
  3: esle if L = 1 then
          # Eğer özyineleme sayısı 1 ise G grafının NIS değerini döndür
   4:
          return IsolatedCount(G)-S
   5: else
          # Maksimum NIS'i minimum integer olarak tanımla
   6:
          maxNIS \leftarrow minInt
          # G grafinin tepelerinin listesi
   7:
          vertices \leftarrow G.nodes
   8:
          for all v in vertices do
   9:
            # Geçici graf olarak G grafinın kopyasını al
            tempG \leftarrow copy.deepcopy(G)
   10:
            # v tepesini komşularıyla birlikte çıkar
            tempG. NeighborRemoveVertex(v)
   11:
            # Geçici graf için NIS'i hesapla
            tempNIS1 \leftarrow IsolatedCount(tempG)-S
   12:
            # Geçici graftan bir tepe daha silerek NIS'i hesapla
            tempNIS2 \leftarrow NIS(tempG, L - 1, S + 1)
   13:
            # Geçici NIS'leri maksimum NIS ile karşılaştır
            if tempNIS1>maxNIS then
   14:
   15:
              maxNIS \leftarrow tempNIS1
   16:
            end if
   17:
            if tempNIS2>maxNIS then
              maxNIS \leftarrow tempNIS2
   18:
   19:
            end if
   20:
            tempG.clear()
   21:
          end for
   22:
          # Hesaplanan NIS'i döndür
          return maxNIS
  23: end if
```

Şekil 1. Bir G grafının Komşu izole saçılma sayısını veren sözde kod algoritması (NIS) *Figure 1. Algorithm in pseudocode that gives Neighbor Isolated Scattering Number of a graph G (NIS)*

Table 2. Raw Metrics of NIS						
Ham Metrikler	NIS					
LOC	44					
LLOC	34					
SLOC	34					
Yorumlar	15					
Tekil yorumlar	7					
Çoklu yorumlar	0					
Boş satır	3					
Yorum istatistikleri						
(C%L)	34%					
(C%S)	44%					
(C+M%L)	34%					

Çizelge 2. N	JIS'in ham	metrikleri
\$ 0		

Halstead Metrikler	NIS
η_1	5
η_2	14
N_1	11
N_2	22
Kelime Bilgisi	19
Uzunluk	33
Hesaplanan Uzunluk	64.91
Hacim	140.18
Zorluk	3.93
Çaba	550.71
Zaman	30.60
Buglar	0.05

Çizelge 3. NIS'in Halstead metrikleri

Halstead metrikleri, fonksiyonel yazılım karmaşıklığını ölçmek için kullanılabilir. Bu doğrultuda Çizelge 3'e göre, Çizelge 1'de verilen program uzunluğu formülünden hareketle $N_1 + N_2$ 33 olarak hesaplanır. İdeal üst limit 300'ün altındadır. Program hacim değeri 140 olarak hesaplanmıştır. Hacim için ideal üst limit değeri 1000 olduğundan algoritma karmaşık bir yapıya sahip değildir. Çaba, bir kalite standardı olarak görülür ve algoritma, sınır değeri 5000'in altında sonuç vermiştir. Bu da programın metrikleri açısından bir başka artı olarak görünmektedir. Aynı şekilde zaman değerinin 90'ın altında olması da programın kalitesini gösteren bir diğer değerdir. Bug değeri 0'a çok yakındır, tahmini hata sayısını ifade eder, bu programda çok düşük bir hata olasılığına sahip olduğunu gösterir.

Çizelge 4. NIS'in sürdürülebilirlik endeksi

 Table 4. Maintainability Index Metrics of NIS

 Algoritma
 Sürdürülebilirlik Endeksi

 NIS
 A

Çizelge 4'e göre Sürdürülebilirlik Endeksi, programın daha sonra güncellenebilirliğini gösterir. Geliştirilen algoritma A ile en yüksek değeri almıştır. Bu, algoritmanın gerekli koşullar için güncellenebilir olduğunu göstermiştir.

Çizelge 5. NIS'in döngüsel karmaşıklığı					
Table 5. Cyclomatic Complexity	Table 5. Cyclomatic Complexity of NIS				
Algoritma	СС				
NIS	16				
IsolatedCount	4				
NeighborRemoveVertex	11				

Çizelge 5, geliştirilen algoritmada, IsolatedCount oldukça küçük bir değer almıştır ve düşük risk sınıfındadır. NIS ve NeighborRemoveVertex, 10'un üzerinde bir değere sahip oldukları için orta risk ve daha karmaşık sınıfta yer almaktadır. Döngüsel karmaşıklık için üst sınır 50 olduğu için programın döngüsel karmaşıklık oluşturmadığı görülmektedir.

Algoritma, yol, çember, tekerlek ve tam graflar gibi çeşitli graf sınıflarında test edilmiştir. Çizelge 6-9, bu graflar için komşu izole saçılma sayısı değerlerini içerir. Ayrıca Çizelge 6-9 üzerinde bulunan s(V(G)) ifadesi, bir *G* grafındaki toplam tepe sayısını gösterir.

Table 6. Results for P _n path graph							
n	$s(V(P_n))$	$NIS(P_n)$	Süre (sn)				
5	5	1	0.0018				
6	6	0	0.0044				
7	7	0	0.0091				
8	8	0	0.022				
9	9	1	0.0546				
10	10	0	0.1315				
11	11	0	0.4395				
12	12	0	0.9855				
13	13	1	2.9267				

Çizelge 6. P_n yol grafi için sonuçlar

Farklı *n* tepe sayıları için her bir P_n yol grafının komşu izole saçılma sayısı, geliştirilen algoritma ile hesaplanmış ve hesaplanan komşu izole saçılma sayıları ve bu sayıların ne kadar sürede hesaplandığı Çizelge 6 içerisinde gösterilmiştir.

Table 7. Results for C_n cycle graph			
n	$s(V(C_n))$	$NIS(C_n)$	Süre (sn)
4	4	0	0.001
5	5	-1	0.0018
6	6	-1	0.0039
7	7	-1	0.0068
8	8	0	0.0201
9	9	-1	0.0325
10	10	-1	0.0841
11	11	-1	0.2811
12	12	0	0.5891
13	13	-1	1.7682
14	14	-1	4.8263
15	15	-1	14.653
16	16	0	46.092

Çizelge 7. C_n çember grafi için sonuçlar Table 7. Results for C_n cucle graph

Farklı *n* tepe sayıları için her bir C_n çember grafının komşu izole saçılma sayısı, geliştirilen algoritma ile hesaplanmış ve hesaplanan komşu izole saçılma sayıları ve bu sayıların ne kadar sürede hesaplandığı Çizelge 7 içerisinde gösterilmiştir.

Table 8. Results for W_n wheel graph			
n	$s(V(W_n))$	$NIS(W_n)$	Süre (sn)
5	5	0	0.0012
6	6	-1	0.0018
7	7	-1	0.003
8	8	-1	0.0071
9	9	0	0.0158
10	10	-1	0.0348
11	11	-1	0.1759
12	12	-1	0.2111

Çizelge 8. W_n tekerlek grafi için sonuçlar Table 8. Results for W wheel graph

Farklı n tepe sayıları için her bir W_n tekerlek grafının komşu izole saçılma sayısı, geliştirilen algoritma ile hesaplanmış ve hesaplanan komşu izole saçılma sayıları ve bu sayıların ne kadar sürede hesaplandığı Çizelge 8 içerisinde gösterilmiştir.

Table 9. Results for K_n complete graph			
n	$s(V(K_n))$	$NIS(K_n)$	Süre (sn)
5	5	-1	0.0009
6	6	-1	0.0015
7	7	-1	0.0023
8	8	-1	0.0024
9	9	-1	0.0027
10	10	-1	0.0035
11	11	-1	0.0051

Cizelge 9. K_n tam graf icin sonuclar

Farklı n tepe sayıları için her bir K_n tam grafının komşu izole saçılma sayısı, geliştirilen algoritma ile hesaplanmış ve hesaplanan komşu izole saçılma sayıları ve bu sayıların ne kadar sürede hesaplandığı Çizelge 9 içerisinde gösterilmiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmanın amacı, insan gücünden tasarruf etmek için komşu izole saçılma sayısı algoritmasını oluşturmaktır. Zedelenebilirlik parametreleri, tanımları ve teoremleri sayesinde ölçümde insan gücünden tasarruf sağlıyor olsa da standart dışı grafların zedelenebilirliğini ölçmek için bu tanım ve teoremler yetersiz kalacağından bunların algoritmalarının oluşturulması ve geliştirilmesi insan gücünden daha fazla tasarruf sağlayacaktır. Bir graf modeli hazırlanmak istendiğinde grafın herhangi bir saldırı girişimine karşı oldukça dayanıklı olması beklenir. Bu nedenle istenilen graf modelinin zedelenebilirlik analizi komşu izole saçılma sayısı gibi parametrelerle belirlenmelidir. Grafların zedelenebilirliğinin ölçümünde yaygın olarak kullanılan parametrelerden komşu izole saçılma sayısı ele alınmıştır. Parametreyi hesaplamak için bir algoritma önerilmiş ve Radon yazılım metrikleri ile analiz edilerek ve birkaç graf türünde sonuçlarla birlikte çalışma süreleri gösterilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın komşu izole saçılma sayısını doğru bir şekilde hesapladığını göstermiştir. Algoritmanın Radon yazılım metriklerinden elde edilen sonuçları ideal sınırlar içinde yer almıştır. Sonuçlara göre NIS algoritmasının komşu izole saçılma sayısını ölçmek için faydalı olduğu görülmüştür.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu çalışmanın yazarları olarak tüm etik standartlara uyulduğunu bildiririz.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Bu çalışmada yazar katkı oranları Mehmet Aykut TOSUN %34, Ersin ASLAN %33 ve Emin BORANDAĞ %33 şeklindedir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Bu çalışmanın yazarları olarak herhangi bir çatışma beyanımız bulunmadığını bildiririz.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

calışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından B11 desteklenmektedir. Proje no: 2019-071.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Bu çalışma kullanılabilir veri içermemektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- C. A. Barefoot, R. C. Entringer, ve H. C. Swart, "Vulnerability in graphs A comparative survey", Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing, c. 1, ss. 13-22, 1987.
- [2] M. B. Cozzens, D. Moazzami, ve S. Stueckle, "The tenacity of the Harary Graphs", J. Combin. Math. Combin. Comput., c. 16, ss. 33-56, 1994.
- [3] Y. Li, S. Zhang, ve X. Li, "Rupture degree of graphs", Int J Comput Math, c. 82(7), ss. 793-803, 2005, doi: 10.1080/00207160412331336062.
- [4] H. A. Jung, "On a class of posets and the corresponding comparability graphs", Journal of Combinatorial Theory, Series B, c. 24(2), ss. 125-133, 1978, doi: 10.1016/0095-8956(78)90013-8.
- [5] G. Gunther ve B. L. Hartnell, "Optimal K-secure graphs", Top Catal, c. 2(3), ss. 225-231, 1980, doi: 10.1016/0166-218X(80)90042-6.
- [6] Z. Wei, A. Mai, ve M. Zhai, "Vertex-neighbor-scattering number of graphs", Ars Combinatoria, c. 102, ss. 417-426, 2011.
- [7] S. S. Y. Wu ve M. B. Cozzens, "The minimum size of critically m-neighbour-connected graphs", Ars Combinatoria, c. 29, ss. 149-160, 1990.
- [8] E. Aslan, "Neighbour isolated scattering number of graphs", ScienceAsia, c. 41, sy 6, ss. 423-431, 2015, doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.2015.41.423.
- [9] M. Jurkiewicz, "Bounds on isolated scattering number", ANZIAM J, c. 62, ss. 72-83, 2020, doi: 10.21914/anziamj.v62i0.15912.
- [10] F. Li, Q. Ye, ve Y. Sun, "Isolated Scattering Number Can be Computed in Polynomial Time for Interval Graphs", ANZIAM Journal, c. 58, sy March, s. 81, 2017, doi: 10.21914/anziamj.v58i0.10993.
- [11] F. Li ve X. Li, "The neighbour-scattering number can be computed in polynomial time for interval graphs", Computers and Mathematics with Applications, c. 54, sy 5, ss. 679-686, 2007, doi: 10.1016/j.camwa.2007.02.006.
- [12] "Radon Documentation". https://radon.readthedocs.io/en/latest/ (erişim 7 Nisan 2022).
- [13] D. Coleman, D. Ash, B. Lowther, ve P. Oman, "Using Metrics to Evaluate Software System", IEEE Computer, c. 27, sy 8, ss. 44-49, 1994.
- [14] A. van Deursen, "Think Twice Before Using the 'Maintainability Index'", https://avandeursen.com/2014/08/29/think-twice-before-using-the-maintainability-index/, 2014.
- [15] "Maintainability Index Range and Meaning", Code Analysis Team Blog, blogs.msdn, 2007. https://docs.microsoft.com/en-us/archive/blogs/codeanalysis/maintainability-index-range-andmeaning (erişim 7 Nisan 2022).
- [16] P. Oman ve J. Hagemeister, "Metrics for assessing a software system's maintainability", Proceedings - Conference on Software Maintenance, ICSM 1992, ss. 337-344, 1992, doi: 10.1109/ICSM.1992.242525.
- [17] S. R. Schach, Object-Oriented and Classical Software Engineering. New York: NY: McGraw-Hill, 2011.
- [18] A. G. Koru, K. el Emam, D. Zhang, H. Liu, ve D. Mathew, "Theory of Relative Defect Proneness", Empir Softw Eng, c. 13, sy 5, ss. 473-498, 2008, doi: 10.1007/s10664-008-9080-x.
- [19] M. H. Halstead, Elements of Software Science. New York: NY, USA: Elsevier Science Inc., 1977.
- [20] T. J. McCabe, "A Complexity Measure", IEEE Transactions on Software Engineering, c. 2, sy 4, ss. 308-320, 1976, doi: 10.1109/TSE.1976.233837.
- [21] M. Bray vd., "C4 Software Technology Reference Guide-A Prototype", Oca. 1997.

- [22] M. Shepperd, "A Critique of Cyclomatic Complexity as a Software Metric", Software engineering journal, c. 3, sy 2, ss. 30-36, 1988, doi: 10.1049/sej.1988.0003.
- [23] M. Jørgensen, "A Review of Studies on Expert Estimation of Software Development Effort", Journal of Systems and Software, c. 70, sy 1-2, ss. 37-60, 2004, doi: 10.1016/S0164-1212(02)00156-5.
- [24] "NetworkX Offical Website". http://networkx.github.io (erişim 7 Nisan 2022).



INVESTIGATION OF DRILLING PERFORMANCE OF REINFORCED POLYAMIDE 6 POLYMER COMPOSITE

¹Abdurrahman GENÇ^(D), ²*Ferhat YILDIRIM^(D), ³Murat KOYUNBAKAN^(D), ⁴Salih Hakan YETGIN^(D), ⁵Volkan ESKIZEYBEK^(D), ⁶Gözde KUŞ^(D)

 ^{1,6} Kütahya Dumlupınar University, Institute of Science, Advanced Technologies Department, Kütahya, TÜRKİYE
 ²Çanakkale Onsekiz Mart University, Biga Vocational School, Machine and Metal Technologies Department, Çanakkale, TÜRKİYE
 ³ Kütahya Dumlupınar University, Simav Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, Kütahya, TÜRKİYE
 ⁴ Tarsus University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Mersin, TÜRKİYE
 ⁵ Çanakkale Onsekiz Mart University, Engineering Faculty, Material Science and Engineering Department, Çanakkale, TÜRKİYE

¹abdurrahman.genc@ogr.dpu.edu.tr, ²ferhatyildirim@comu.edu.tr, ³murat.koyunbakan@dpu.edu.tr, ⁴shakanyetgin@tarsus.edu.tr, ⁵veskizeybek@comu.edu.tr, ⁶gozde_kus88@hotmail.com

Highlights

- Polyamides are preferred polymer materials for manufacturing industrial products due to their lightness, resistance to corrosion, ease of processing, and recyclability.
- The machinability properties of Polyamide 6 (PA6) polymer composite plates reinforced with chopped carbon fiber (CF) and multi-walled carbon nanotube (MWCNT) in different proportions were investigated by the drilling method using different cutting tools and cutting parameters.
- Multi-response Taguchi optimization shows successful approach to obtaining minimum Ra, inlet, and outlet deformation.
- High cutting speed and low feed rate are ideal parameters to achieve low Ra and low inlet-outlet deformations.
- The particle addition made to the PA6 polymer reduced the Ra.
- MWCNT has more positive effect on both reducing Ra and reducing inlet-outlet deformations compared to the CF.

Graphical Abstract









Results

Material Manufacturing

Drilling Analysis Flowchart of the applied experimental method



INVESTIGATION OF DRILLING PERFORMANCE OF REINFORCED POLYAMIDE 6 POLYMER COMPOSITE

¹Abdurrahman GENÇ^(D), ²*Ferhat YILDIRIM^(D), ³Murat KOYUNBAKAN^(D), ⁴Salih Hakan YETGİN^(D), ⁵Volkan ESKİZEYBEK^(D), ⁶Gözde KUS^(D)

 ^{1,6} Kütahya Dumlupınar University, Institute of Science, Advanced Technologies Department, Kütahya, TÜRKİYE
 ²Çanakkale Onsekiz Mart University, Biga Vocational School, Machine and Metal Technologies Department, Çanakkale, TÜRKİYE
 ³ Kütahya Dumlupınar University, Simav Technology Faculty, Mechanical Engineering Department, Kütahya, TÜRKİYE
 ⁴ Tarsus University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Mersin, TÜRKİYE
 ⁵ Çanakkale Onsekiz Mart University, Engineering Faculty, Material Science and Engineering Department, Çanakkale, TÜRKİYE

¹abdurrahman.genc@ogr.dpu.edu.tr, ²ferhatyildirim@comu.edu.tr, ³murat.koyunbakan@dpu.edu.tr, ⁴shakanyetgin@tarsus.edu.tr, ⁵veskizeybek@comu.edu.tr, ⁶gozde_kus88@hotmail.com

(Geliş/Received: 10.10.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.12.2022)

ABSTRACT: Polyamides are preferred polymer materials for manufacturing industrial products due to their lightness, resistance to corrosion, ease of processing, and recyclability. In this study, the machinability properties of Polyamide 6 (PA6) polymer composite plates reinforced with chopped carbon fiber (CF) and multi-walled carbon nanotube (MWCNT) in different proportions were investigated by the drilling method using different cutting tools and cutting parameters. The experiments were carried out according to the L16 orthogonal array. Drilling experiments were carried out in a dry environment. The deformations occurring on the inlet and outlet surfaces of the drilled samples were calculated, and the surface roughness (Ra) of the hole walls was measured. According to the results obtained, the particle addition made to the PA6 polymer reduced the Ra. It has been observed that high cutting speed and low feed rate are ideal parameters to achieve low Ra and low inlet-outlet deformations.

Keywords: Drilling, Polymer Composite, Optimization, Polyamide 6

1. INTRODUCTION

In recent years, the use of materials with high-level properties has increased in many rapidly developing industries. Due to the fact that these materials are intended to be lightweight, studies on particle reinforced polymer composites are one of the current research topics [1-2]. Polyamide's (PA) is the most widely used semi-crystalline polymer type among engineering plastics due to its high strength/weight ratio, corrosion resistance, resistance to UV and gamma rays, very simple and economical production processes compared to conventional materials [3-7]. PA6 polymer are used in automotive, aviation, energy industries, in areas where flexibility as well as temperature and chemical resistance is required, packaging, household appliances, sport equipment's etc. [4-5]. However, due to the presence of polar amide groups, high moisture absorption, low dimensional stability, low heat deflection temperature, low impact resistance at low temperatures and sensitivity to heat with easy flammability limit the usage areas of PA polymer [7-8].

Although polymers and polymer composites are produced by molding methods, some machining operations are required to be transform them into the final product. Drilling is one of the most important

machining operations and involves approximately 33% of the machining operations. Again, 25% of the total time spent in machining processes is spent as drilling [9]. In machining operations, the main target has always been to achieve optimum machining conditions in order to reduce cost and increase performance [9]. For example, while millions of holes are required for rivets and bolted connections in the manufacture of aircraft, delamination, and micro-cracking in the holes significantly reduce the performance of the composite material. In the aviation industry, 60% of all parts rejected during the final assembly of an aircraft structure are due to defects in drilling operations associated with delamination [10-11]. For this reason, the study of the quality and performance of holes in composite structures is of great importance when considering the large financial losses that they can cause and the irreparable loss of life.

To reduce or eliminate the problems encountered in the processing of composite materials, researchers are conducting different studies. These studies focus on issues such as cutting parameters, cutting conditions, tool geometries, and different cutting tool materials [12]. The including high data amount and the size of the number of variables be required complex statistical analysis in the improvement studies. Early in the 60s, Genichi Taguchi's new methodology is start to use due its success in improving all kind of industrial performance. The small number of experiments, easy implementation and easy evaluation of the variables are the features that increase the prevalence of the Taguchi method [13-16].

Composite materials can be produced as different combinations using different reinforcing materials, resin materials, and production methods. Different materials used in the production of composite materials improve these structures' mechanical, impact, thermal, and abrasion properties [4-5, 17]. However, it is necessary to investigate how the machining processes of these composite structures. Although there are many studies in the literature on the machining processes of composite materials, studies are generally carried out on drilling tests of layered polymer composite materials using thermoset resin.

[18] conducted a study using different cutting parameters and drill bit diameters to reduce the deformation that occurs when drilling glass fiber reinforced polyester composite materials. In addition to these parameters, [19] also took into account the fiber orientation angle. The effects of cutting parameters on surface quality were also examined in the studies conducted on machinability. It has been observed that increasing the number of cutting edges and decreasing the point angle reduce the damage factor on the entry surfaces [20]. It is believed that reducing the thrust forces and torque that occur in drilling experiments will reduce surface damage. The thrust force increases due to the increase in the feed rate and drill bit diameter [21-22]. As a result of increasing the number of revolutions and drill bit diameter, it is observed that the Ra of hole surface increases [23].

In the studies conducted on the machinability of reinforced and non-reinforced polyamide materials, the effects of cutting parameters and cutting tool geometries were investigated. [24] found that the increase on PA66 hole quality with the addition of glass fiber whiskers. On another study according to the findings it is said that tool wear is greater in machining of reinforced Polyamide 6 composite material [25]. [26] investigated the milling of multi-walled carbon nanotube reinforced Polyamide 6 composite. They pointed out the feed rate was most effective parameter on Ra. Low feed rate and high spindle speed were the best combination for obtaining good Ra. They explained that the multi-walled carbon nanotube slightly improved the surface quality compared to non-reinforced Polyamide 6. In experimental studies conducted with different drill bit materials, it is observed that the surface roughness of the drill bit material affects, and carbide was found the ideal drill bit material [27]. [28-29] investigated the hole quality, surface roughness in drilling of polyamide (PA6) and 30% glass fibers reinforced polyamide (PA66 GF30) using cemented carbide (K20) tool. The effects of cutting speed, feed rate, tip point was analyzed by response surface methodology based second order and third-order mathematical models. PA66 GF30 material provides better surface finish by employing low feed rate with low to medium speed for all the surface results compared to the neat PA6. Performed analysis also showed that the quality of holes can improved by employing higher spindle speed with low feed rate and point angle during drilling for both neat and reinforced polyamides. The drill bit temperature and chip formations were experimentally investigated in the drilling of neat and carbon black reinforced polyamide by [30]. According to the results, the drill bit

temperature increased with increasing the cutting speed and with decreasing the feed for both polyamides. In addition, higher drill tip temperatures were observed in the drilling of carbon black reinforced polyamide compared to the neat polyamide. The regular chips were formed at low cutting speed and high feed rate values. In addition, the carbon black reinforced polyamide has created more uniform chips compared to neat polyamide due to the more heat was transferred to the drill bit from the drilling region.

According to the literature, composite reinforcement materials affect the properties of the production processes such as molding, machinability due to its characteristic properties in forming compounds. The exposure of production strategies to the effects of additive-based unknown variables constitutes an important node point that needs to be investigated in terms of efficiency. In this study, the machinability properties of carbon fiber (CF), and multi walled carbon nanotube (MWCNT) reinforced Polyamide 6 polymer composite materials were investigated by experimentally and statistically on drilling experiments. Inlet and outlet surface damages and hole wall surface roughness were examined in experiments conducted using different cutting speed, feed rate and four kind of drill bit materials. Manufactured composite used parameters and drill bit materials were not evaluated together in the literature before. Thus, it was aimed to contribute to the literature and production industry by examining its multivariate machinability processes of Polyamide 6 and that one of the highly used polymers in the industry.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Materials

In the study, the used Polyamide 6 (PA6) polymer (Cas Number:25038-54-4) was purchased from the EMAŞ A.Ş. (Sumika Polymer Compounds, Bursa/Türkiye). Mechanical properties of PA6 according to the supplier were given in Table 1 (http://www.emasplastik.com.tr/). The chopped carbon fiber (CF) used as the micro sized filler was purchased with AC-4101 commercial code from DOWAKSA Advanced Composite Materials Industry (Yalova/Türkiye). The physical and mechanical properties of CF according to the supplier were given in Table 2 (https://www.dowaksa.com/tr). The multi-walled carbon nanotube (MWCNT) was used as the nano sized filler and purchased from DETSAN A.Ş. (Eskişehir/Türkiye). The according to the supplier were given in Table technical properties of MWCNT (https://www.detsankimya.com.tr).

able 1. Technical specifications of Polyamide 6 (PA6) [31].		
Material	Polyamide 6	
Density g/cm ³	1.12	
Viscosity (%96 H ₂ SO ₄)	2.40-2.80	
Melting Temperature (°C)	220	
Moisture absorption (23 °C, %50RH)	%2.50-3.50	

Table 1. Technical specifications of Polyamide 6 (PA6) [31]

Table 2. Technical specifications of Carbon fiber (CF) [32].
--

Material	Carbon Fiber
Tensile Strength (MPa)	4200
Modulus of Elasticity (Tensile) (MPa)	240
Elongation (%)	1.8
Density(g/m ³)	1.76
Fiber length (mm)	6
Typical bulk density (6 mm length) (G/l)	500
Emulsion type	Polyamide based
Material	Multi Walled Carbon Nanotube
--------------------------------	------------------------------
Outer diameter (nm)	< 8
Inner diameter (nm)	2-5
Purity (%)	> 97
Length (µm)	10-30
Specific surface area (m²/g)	500
Electrical conductivity (S/cm)	> 10-2

Table 3. Technical specifications of Multi Walled Carbon Nanotube (MWCNT) [33].

2.2. Manufacturing of Composite Materials

Composite manufacturing process was designed according to the PA6 supplier, literature, and past studies of our study group [4-5] PA6 material was dried for 4 hours at 80 °C in the Nüve FN120 model oven before production due to its high moisture absorption property. The dried PA6 and CF materials were mixed using the mechanical mixing method in a dry form. In the mixture of MWCNT and PA6, the MWCNT solution prepared in alcohol essence was added to the polymer for maximum wetting and dispersion, and mechanical mixing was applied again, and then the alcohol was evaporated in the drying oven. Thus, it was tried to obtain homogeneous mixtures for both groups of materials. The materials prepared from the mixture were then passed through two different extruder processes and made into a composite mixture ready for final injection production. The extrusion process of the CF and PA6 mixture was carried out in a Coperion branded extruder with a screw diameter of 26 mm, an L/D ratio of 46, and 11 heat zones located in Gama-Alfa Plastic Co. İstanbul. The extruded polymer was cooled and then granulated again in the crusher. Materials prepared by mixing MWCNT and PA6 were produced in a corotating twin-screw extruder with a screw diameter of 22 mm, an L/D ratio of 32, and 6 heat sections located in Kütahya Dumlupinar University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering. After the mixture of MWCNT and PA6 was also granulated in the crusher. In injection molding process, the polymer material heated around the ball screw melts and is mixed again thanks to the ball screw. Mixing the remelted material within itself again ensures that the unbalanced parts are dispersed. The polymer material pushed into the mold from the outlet nozzle at the end of the machine is produced here as the desired drilling sample plate. Figure 1 shows the production stages of a polymer composite material [4-5].



Figure1. Manufacturing process of PA6 composites.

Scanned Electron Microscopy (SEM) images of the reinforced PA6 composite samples are given in Figure 2 and Figure 3. Also, Table 4 shows the materials used in the experiments and their abbreviations. In the study, with PA6 polymer, 6 different samples were produced, including by weight 10%, 20%, and 30% CF added and 0.1%, 0.2%, and 0.3% MWCNT added composites. In addition, neat PA6 polymer was manufactured with the same procedure except reinforcement process.



Figure 2. SEM images of CF reinforced polymer composite.



Figure 3. SEM images of MWCNT reinforced polymer composite.

Materials	Abbreviations
Polyamide 6	PA6
Polyamide 6 + 10 % wt. Carbon Fiber	PA6+10CF
Polyamide 6 + 20 % wt. Carbon Fiber	PA6+20CF
Polyamide 6 + 30 % wt. Carbon Fiber	PA6+30CF
Polyamide 6 + 0.1 % wt. Multi Walled Carbon Nanotube	PA6+0.1MWCNT
Polyamide 6 + 0.2 % wt. Multi Walled Carbon Nanotube	PA6+0.2MWCNT
Polyamide 6 + 0.3 % wt. Multi Walled Carbon Nanotube	PA6+0.3MWCNT

2.3. Experimental Study

Drilling experiments of all PA6 composite were carried out in the VMC850B branded CNC vertical machining center (Figure 4). The maximum number of revolutions of the machine is 8000 rpm, and drilling operations were carried out in a dry environment. Drilling experiments were carried out using different cutting speeds (40, 70, 100, and 130 m/min), feed rates (0.1, 0.2, 0.3, and 0.4 mm/rev), and drill bits material. High Speed Steel (HSS), Tungsten Carbide, Polished Tungsten carbide (cutting faces has been polished for composite materials), and Polly Crystal Diamond (PCD) are selected as drill bit materials. The diameter of all drill bits were 6 mm. Cutting parameters and drill materials were selected from the most widely used and preferred ones in the machining industry. It has been decisive in criteria such as cost and availability.



Figure 4. CNC Machining center.

Figure 5 shows the drill bits used in the study. The cutting parameters and the experimental design are given in Table 5. A L16 orthogonal experimental design was performed for drilling experiments, and the Taguchi method was used to determine the effects of the experimental parameters on machinability. Factor levels in the experimental design were determined as Cutting Speed (m/min) (A), Feed Rate (mm/rev) (B), and Drill bit Material (C).



Figure 5. Drill bit materials: a) HSS, b) Tungsten carbide, c) Polished tungsten carbide, d) PCD.

Because of the drill bit materials data was non-numerical, they were assigned numerical values as 1, 2, 3, and 4 for HSS, Tungsten carbide, Polished tungsten carbide and PCD respectively for use in Taguchi. Thus, the meaning of each factor can be better interpreted in prediction and validation experiments. The recommendations of cutting tool providers and the literature have been considered in the selection of cutting parameters [18, 20-23, 27].

Test No	Cutting Speed (m/min) (A)	Feed Rate (mm/rev) (B)	Drill bit Material (C)
1	40	0.1	HSS (1)
2	40	0.2	Tungsten carbide (2)
3	40	0.3	Polished tungsten carbide (3)
4	40	0.4	PCD (4)
5	70	0.1	Tungsten carbide (2)
6	70	0.2	HSS (1)
7	70	0.3	PCD (4)
8	70	0.4	Polished tungsten carbide (3)
9	100	0.1	Polished tungsten carbide (3)
10	100	0.2	PCD (4)
11	100	0.3	HSS (1)
12	100	0.4	Tungsten carbide (2)
13	130	0.1	PCD (4)
14	130	0.2	Polished tungsten carbide (3)
15	130	0.3	Tungsten carbide (2)
16	130	0.4	HSS (1)

Table 5. L16 Orthogonal array.

The lowest results for Ra are detected from experiments with cutting parameters, and drill bits materials can be determined as optimal cutting conditions. As a result of the experiments, the TIME TR 200 surface roughness measuring device was used to measure the roughness of the inner walls of the hole on. The roughness measurements were performed perpendicular to the hole surface at 4 mm length with 3 repetitions on the prepared measuring setup [34]. The calibration of the device was checked before each measurement group. Optical images of the inlet and outlet surfaces of the holes were taken to detect surface deformations. An INSIZE brand optical microscope was used to take the images. D_{max} and D_{min} diameters were measured by image processing on obtaining images. Where D_{max} is maximum diameter of the delamination region and D_{min} is the diameter of the hole. The ratio of these values to each other gives the deformation factor [14-15]. The performed experimental study are given in Figure 6.



Figure 6. Experimental procedure.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Drilling Results of CF Reinforced PA6

As a result of drilling experiments of CF reinforced PA6 composite materials, Ra was measured, and deformation factor values were calculated. The obtained results were examined and interpreted in two groups. The measured Ra values are given in Table 6, and the calculated deformation factors are given in Table 7.

Table 6. Surface roughness (Ra) of CF reinforced PA6 composites.										
Test No.	Surface Roughness (Ra), (µm)									
Test NU	PA6	PA6+10CF	PA6+20CF	PA6+30CF						
1	0.489	0.484	0.422*	0.744						
2	0.701	0.569*	0.843	0.917						
3	0.951	0.590	0.467	0.437*						
4	0.911	0.722	0.614*	0.711						
5	0.810*	1.458	1.956	1.673						
6	0.337*	0.882	0.669	0.790						
7	1.081	0.881	0.749	0.705*						
8	0.822*	0.913	1.078	1.147						
9	1.046	0.796*	0.966	1.565						
10	1.324	1.410	1.164	0.875*						
11	0.665	1.070	0.760	0.493*						
12	0.528	0.744	1.670	0.561*						
13	1.089	1.420	0.738*	0.719						
14	1.274	1.347	0.966*	2.327						
15	0.998*	1.531	1.366	1.455						
16	0.966	1.738	0.751*	0.790						

*: Lowest value.

When Table 6 and Table 7 are examined, the surface roughness and deformation factor values obtained from PA6+20CF reinforced material were generally found as the lowest or close to the lowest than the other CF reinforced materials. Taguchi analysis was performed on the experiments conducted for this material and presented in detail. The S/N ratio is determined according to three basic performance characteristics. Since the Ra and deformation factor were required to be low in the drilling of PA6+20CF composite materials, the "smaller-better" performance characteristic was chosen for the S/N ratio. The Equation (1) used to calculate the S/N ratios is given below [13, 15, 35-36].

$$S/N_{SB} = \eta = -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right]$$
(1)

Statistical analyses were performed with Minitab 17 software. The S/N ratio response table for PA6+20CF material is given in Table 8. The main effect graphs for the S/N ratios prepared according to the Ra and deformation factors which derived from the "smaller-better" rule for 4-level cutting speed, feed rate, and drill bits material, which are the parameters in drilling the composites, are shown in Figure 7. The results of the analysis of variance for S/N ratios are given in Table 9.

Test	140	Inlet defo	rmation facto	Outlet deformation factors					
No	PA6	PA6+10CF	PA6+20CF	PA6+30CF	PA6	PA6+10CF	PA6+20CF	PA6+30CF	
1	1.047	1.023	1.019*	1.028	1.063	1.030	1.020*	1.033	
2	1.010	1.017	1.015	1.009*	1.011	1.009*	1.015	1.012	
3	1.014	1.013	1.017	1.010*	1.036	1.019	1.015*	1.017	
4	1.016*	1.018	1.028	1.017	1.028	1.019	1.028	1.015*	
5	1.013*	1.019	1.031	1.066	1.024	1.039	1.018	1.017*	
6	1.036	1.027	1.022*	1.034	1.060	1.033	1.028*	1.035	
7	1.019*	1.019*	1.019*	1.022	1.027	1.018	1.018	1.015*	
8	1.018	1.019	1.019	1.014*	1.024	1.015*	1.020	1.018	
9	1.032	1.017	1.018	1.007*	1.046	1.018	1.012*	1.017	
10	1.022	1.015*	1.025	1.017	1.029	1.019	1.013	1.011*	
11	1.023*	1.028	1.024	1.034	1.035	1.016*	1.020	1.030	
12	1.016*	1.018	1.018	1.018	1.007*	1.013	1.015	1.015	
13	1.020	1.016	1.019	1.013*	1.040	1.038	1.015*	1.019	
14	1.021	1.023	1.033	1.015*	1.027	1.018	1.015*	1.017	
15	1.011*	1.020	1.039	1.020	1.020	1.033	1.017	1.008*	
16	1.016*	1.021	1.030	1.039	1.023*	1.024	1.026	1.038	

Table 7. Inlet and outlet deformation factors of CF reinforced PA6 composites.

*: Lowest value.

 Table 8. Response table for PA6+20CF sample surface roughness (Ra) S/N ratio.

Loval	Surface	Roughn	ess (Ra)	Inlet de	formation	n factors	Outlet deformation factors			
Level	CS	FR	DM	CS	FR	DM	CS	FR	DM	
1	4.9523	1.1470	3.9566	-0.1753	-0.1912	-0.2079	-0.1713	-0.1428	-0.2045	
2	-0.1215	0.9867	1.6398	-0.1998	-0.2080	-0.1929	-0.1859	-0.1566	-0.1401	
3	-0.7745	2.1978	-2.8775	-0.1856	-0.2160	-0.2226	-0.1343	-0.1573	-0.1445	
4	0.6757	0.4005	2.0130	-0.2624	-0.2078	-0.1996	-0.1601	-0.1948	-0.1624	
Difference	5.7268	1.7973	6.8341	0.0871	0.0248	0.0297	0.0516	0.0520	0.0644	
DoI	2	3	1	1	3	2	3	2	1	

CS: Cutting Speed (m/min), FR: Feed Rate (mm/rev), DM: Drill bit Material, DoI: Degree of Importance.

When the results for PA6+20CF polymer material were examined, the lowest Ra was obtained as 0.422 μ m in an experiment using a 40 m/min cutting speed, 0.1 mm/rev and HSS drill bit. The lowest inlet deformation factor was found as 1.015 in the experiments using 40 m/min cutting speed, 0.2 mm/rev feed rate, and tungsten carbide drill bit, and the lowest outlet deformation factor was found as 1.012 in the experiments using 100 m/min cutting speed, 0.1 mm/rev cutting speed and polished tungsten carbide drill bit for PA6+20CF. However, it should be noted that the while the 1.012 was the lowest value for outlet deformation factor, 1.015 was the second lowest value for inlet deformation factors. The PA6+30CF sample has the lowest inlet deformation factor with 1.009 value. It can be thought that the 30%CF reinforced sample is better than the other but when the Ra and outlet deformation factors taken into account PA6+30CF sample was not enough good as the PA6+20CF sample. This unusual situation is thought to be due to the anisotropic structure of the composite. In addition, beside to the parameters, different drill bit material also lead to the differences in the cutting results due to the interactions that occurred between drilling bit and composite during drilling [15].



Figure 7. Main effect graphs for PA6+20CF sample S/N ratios a) Surface Roughness (Ra), b) Inlet deformation factors, c) Outlet deformation factors.

When the results obtained were interpreted by performing Taguchi analysis, drill bit material was found to be the most effective parameter for Ra and outlet deformation factor. However, the cutting speed was the most effective parameter for inlet deformation factor in line with the principle of smallest is the best. When Figure 7 is examined, A1B3C1 combination is the most suitable for optimum Ra level, while

A1B1C3 for inlet deformation, and A3B1C3 for optimum outlet deformation factors. The drill bit material and cutting speed are predominantly the most influential parameter. The analysis of variance (ANOVA) was performed, to determine the effect of differences between the factors affecting the process for PA6+20CF polymer composite. The effects of parameters in ANOVA are calculated by comparing the F-values of each factor [13]. As seen from Table 9, drill bit material is the most effective parameter on surface roughness and outlet deformation factor, while cutting speed only effect the inlet deformation factor. Drill bit material and cutting speed are the main factors to be considered statistically. The semantic coefficients are quite close to each other. Although statistically feed rate has less meaning, cannot be excluded due to the nature of machinability process and it is one of the parameters that must be selected in the system. However, the weakness of its statistical significance can be evaluated as flexibility of parameter selection in the machinability process.

Source	DI	SS				MS			F			Р		
	Dof	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF	
Cutting														
Speed	3	79.993	0.018315	0.000078	79.993	0.006105	0.000026	26.664	1.27	2.63	0.004	0.367	0.145	
(m/min)														
Feed Rate	З	6 728	0.001308	0.000082	6 728	0.000436	0.000027	2 2/3	0.09	2 76	0.0383	0.963	0.134	
(mm/rev)	5	0.720	0.720	0.001500	0.000002	0.720	0.000450	0.000027	2.240	0.07	2.70	0.0505	0.705	0.104
Drill bit	З	100 312	0 001968	0.000143	100 312	0.000656	0.000048	33 /37	0.14	1 79	0.002	0.935	0.049	
Material	0	100.012	0.001700	0.000140	100.012	0.0000000	0.000040	00.407	0.14	1.77	0.002	0.700	0.047	
Residual	6	11 087	0 028878	0.000060	11 087	0.004813	0.000010	1 8/18						
Error	0	11.007	0.020070	0.000000	11.007	0.004015	0.000010	1.040						
Sum	15	198.119	0.050469	0.000364										

Table 9. Analysis of variance (ANOVA) for PA6+20CF sample S/N ratio.

DoF: Degree of Freedom, SS: Sequential sum of squares, MS: Mean sum of squares, F: F-Value, P: Probability, SR: Surface Roughness (Ra), IDF: Inlet Deformation Factor, ODF: Outlet Deformation Factor,

Most studies in the literature are on the machinability of composites obtained by layered production of woven fibers. When the machinability of these materials is examined, high cutting speed and low feed rate are the most recommended cutting parameters for optimal cutting of fiber integrity [3, 10, 21]. However, when the machinability of composites is made of thermoplastic polymers is examined, there are opposite findings. Accordingly, it has been determined that the heat at the drill bit disrupts the chip formation cut from the polymer, thus negatively affecting the performance of the cutting process and the Ra. To compensate for this, it is thought that the cutting speed should be reduced, and the feed rate should be increased. Due to the low cutting speed, the drill bit will heat up less. The drill bit material will quickly move away from the cutting zone. Thus, the negative effect of heat on the chip form and the material surface will be eliminated [30, 34-37].

3.2. Drilling Results of MWCNT Reinforced PA6

A similar detailed examination was also made for MWCNT added PA6 polymer materials. Surface roughness's for all doped samples are given in Table 10. According to the findings 0.2% MWCNT added PA6 polymer composites generally has the lowest Ra values compared to other MWCNT reinforced composite materials. All deformation factors occurring on the inlet and outlet surfaces have been calculated for PA6 polymer materials versus MWCNT reinforcement are given in Table 11.

Test No		Surface Roughness (Ra), (µm)										
	DA6	PA6+0.1MWCN	PA6+0.2MWCN	PA6+0.3MWCN								
	IAU	Т	Т	Т								
1	0.489*	1.204	1.654	0.729								
2	0.700	0.918	0.497*	0.732								
3	0.951	0.640	0.888	0.599*								
4	0.911	0.789*	1.101	1.385								
5	0.810	1.551	0.679*	1.540								
6	0.337*	1.214	0.614	1.457								
7	1.081	0.738	0.663*	0.847								
8	0.822	1.876	0.649*	1.231								
9	1.046*	1.457	1.716	3.005								
10	1.324	1.005	0.413*	0.832								
11	0.665	1.725	0.653*	2.446								
12	0.528	0.619	0.483*	0.627								
13	1.089*	1.431	1.094	2.290								
14	1.274	2.069	0.657*	1.652								
15	0.998	1.419	1.033	0.526*								
16	0.966	0.562*	1.251	0.972								

Table 10. Surface roughness (Ra) of MWCNT reinforced Polyamide 6 composites.

*: Lowest value.

	In	let deform	ation fact	ors	Outlet deformation factors				
Test No	PA6	PA6+0.1 MWCNT	PA6+0.2 MWCNT	PA6+0.3 MWCNT	PA6	PA6+0.1 MWCN T	PA6+0.2 MWCNT	PA6+0.3 MWCNT	
1	1.047	1.053	1.030*	1.038	1.063	1.046	1.028*	1.055	
2	1.010*	1.012	1.036	1.034	1.011*	1.019	1.066	1.028	
3	1.014	1.018	1.011*	1.025	1.036	1.013*	1.028	1.014	
4	1.016*	1.055	1.020	1.029	1.028^{*}	1.052	1.054	1.057	
5	1.013	1.024	1.012*	1.022	1.024	1.019*	1.019*	1.033	
6	1.036	1.035	1.020*	1.034	1.060	1.042	1.024*	1.039	
7	1.019	1.045	1.017*	1.027	1.027	1.016*	1.056	1.078	
8	1.018	1.017	1.015*	1.020	1.024	1.034	1.024	1.017*	
9	1.032	1.031	1.013*	1.035	1.046	1.021	1.027	1.019*	
10	1.022	1.061	1.015	1.010*	1.029*	1.042	1.044	1.077	
11	1.023*	1.042	1.031	1.030	1.035	1.035	1.023*	1.037	
12	1.016*	1.026	1.016*	1.016*	1.007*	1.025	1.020	1.017	
13	1.020*	1.052	1.021	1.028	1.040	1.082	1.035*	1.109	
14	1.021	1.062	1.018*	1.040	1.027	1.066	1.036	1.023*	
15	1.011*	1.069	1.026	1.051	1.020*	1.034	1.080	1.051	
16	1.016	1.030	1.025	1.029	1.023	1.034	1.023	1.029	

*: Lowest value.

The lowest Ra was obtained as 0.337 μ m at 70 m/min cutting speed, 0.2 mm/rev feed rate, and HSS drill bit in experiments conducted for neat PA6. Thus, for PA6+0.2MWCNT sample Ra was measured as 0.413 μ m at 100 m/min cutting speed, 0.2 mm/rev feed rate, and PCD drill bit parameters. It has been

observed that the MWCNT reinforcement was reduces the Ra. However, this Ra value was lower than the CF reinforced PA6 composites. Similarly, while [26], stated that the Ra decrease with CNT addition compared to neat PA6 in their study, [24] found out the increase on PA66 hole quality with the addition of glass fiber whiskers. It was declared that the decrease of Ra was corelated with the heat transformation from drilling region to tool bit and chip [30]. It has been thought that carbon-based particles improve the heat transfer mechanism in the structure, and the removed heat contributes to the improvement of the cutting surface between the drill bit-polymer. The results showed that the PA6+0.2MWCNT sample are better than the other MWCNT reinforcement ratios. The lowest inlet and outlet deformation factors found as 1.030 and 1.028 respectively, for PA6+0.2MWCNT sample in MWCNT reinforcement composite group. However, both of the deformation factor obtained at 40 m/min cutting speed, 0.1 mm/rev and HSS drill bit parameters. It is thought that the obtaining better result of the 0.2% reinforcement ratio is attributed to the efficiency of the cutting surface between the drill, the reinforcement material, and the polymer. Amount of the carbon-based reinforcement materials let the friction decrease more than the other ratios between the drill and composite. This phenomenon also related with the manufacturing process of composite. Efficient contact interface with the PA6 and MWCNT was observed by mixing, extrusion, and injection manufacturing process. However, it is possible to talk about the efficiency of dissipating the friction-induced heat and removing the chips in an ideal way [30, 37]. Taguchi analysis was performed for the results obtained from this material for Ra, inlet, and outlet deformation factors. The S/N ratios response table is given in Figure 8.

According to the Figure 8, A2B2C2 parameters are the required combination for ideal Ra level. For obtaining optimum inlet deformation and outlet deformation factors, A2B1C3 and A3B1C1 combinations have to be chosen, respectively. While the drill bit material and feed rate are looks likes the most influential parameters, according to the graphs all parameters have close and high effects for getting optimum drilling performance of MWCNT reinforced composites. Moreover, this effect is even greater compared to the drilling of CF reinforced PA6 composites. The meaning of the feed rate parameter is greater compared to the drilling of CF reinforced materials. Feed rate is usually directly proportional to the increase in deformation factors when drilling polymer composites. It has been determined that feed rate is the most important factor in many machinability studies conducted in the literature [14]. Similar to these results, which are valid for thermoset polymers and layered composites, the low feed rate in thermoplastic composites resulted in less deformation. For low Ra, medium feed rates were found to be effective. The lower the feed rate, the more friction it causes. Therefore, it can be said that the feed rate for Ra, unlike deformation, should be moderate and high.

In Table 12, The results of the ANOVA for the PA6+0.2MWCNT composite are given. According to the analyzes, it is seen that the feed rate parameter for the Ra, and the drill bit material for the inlet and outlet deformation factors are the effective parameters. It is observed that the outlet deformation factor for carbon fiber and carbon nanotube reinforced materials is greater than the inlet deformation factor. Also, [38] stated in his study that the output deformation is larger than the input. In this case, it is consistent with our study. This is due to the blasting force's effect when the material exits the lower surface of the drill bit. The material that is not supported from the bottom is partially stretched during exit, which causes contact failure on the cutting surface of the drill bit. However, the thickness of the material itself provides good support for the drill bit during entry. Thus, the cutting mouth of the drill bit is in contact with the material at a better angle. The importance of cutting angles in the cutting process is known. The deterioration of these angles by the wear of the cutter or the deterioration of the material by deformation adversely affects the efficiency of the cutting process.



Figure 8. Main effect graphs for PA6+0.2MWCNT sample S/N ratios a) Surface roughness (Ra), b) Inlet deformation factors, c) Outlet deformation factors.

When the effects of the factors on the cutting parameters are examined one by one, it can be thought that a factor affects only one parameter. According to the F and P values given on Table 12, feed rate has no effect on results except the Ra. On the other hand, it seems that the drill bits' material has an effect only

deformation factors. But cutting speed are not statistically enough significant. The statistical weakness of the parameters does not negate the fact that they must be selected for workability. However, it is an inevitable fact that machinability can be done efficiently by bringing together the independent variables in an optimum level. For this reason, it is important to research and find the most effective parameters on results such as deformation and Ra and to work on formulas that will be brought together at an optimum level. In addition, the weakness of the effect of a parameter can be turned into an advantage as flexibility in production processes for manufacturers. According to the statistical results, choice of the feed rate and drill bit material should be emphasized in the efficient drilling of MWCNT reinforced PA6 composites.

	Table 12. Analysis of variance (ANOVA) for PA6+0.2MWCNT sample S/N ratio.												
Courses	D-F	SS SS				MS			F P				
Source	Dor	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF	SR	IDF	ODF
Cutting													
Speed	3	40.93	0.012565	0.05562	13.644	0.004188	0.01854	2.09	1.36	1.14	0.203	0.342	0.406
(m/min)													
Feed Rate	2	08.88	0.002133	0.07482	32 960	0.000711	0.02494	5.05	0.23	1 53	0.044	0.872	0.300
(mm/rev)	5	90.00	0.002133	0.07402	52.900	0.000711	0.02494	5.05	0.23	1.55	0.044	0.072	0.300
Drill bit	3	29.21	0 02/957	0 11134	9 736	0 008319	0.03711	1 /9	2 69	2.28	0 309	0 139	0 180
Material	5	27.21	0.024757	0.11154	2.750	0.000517	0.05711	1.47	2.07	2.20	0.507	0.157	0.100
Residual	6	20.15	0.018522	0.09770	6 525	0.003087	0.01628						
Error	0	39.13	0.010522	0.09770	0.525	0.005007	0.01020						
Sum	15	208.17	0.058177	0.33948									

DoF: Degree of Freedom, SS: Sequential sum of squares, MS: Mean sum of squares, F: F-Value, P: Probability, SR: Surface Roughness (Ra), IDF: Inlet Deformation Factor, ODF: Outlet Deformation Factor.

3.3. Confirmation Experiments

In the experimental study, optimal results of surface roughness, inlet, and outlet deformation factors according to the independent variables of cutting speed, feed rate and drill bit material were obtained by using the Taguchi optimization method. In addition, the validity of the statistically derived ideal parameters was tested with the confirmation experiments [9, 13]. Relation between the statistically prediction levels and confirmation experiment were given in Table 13. The suggested confirmation experiment for the Ra, inlet and outlet deformation factors were the A1B1C1 parameter test in our experimental design. The results obtained in the estimation analysis with Minitab 17 software was overlapped with the results obtained from the current experiment for PA6+20CF composite.

Tuble 19. Comparison of prediction revers and commutation experiments result.						
Taguchi Optimization	Prediction			Confirmation Experiment		
Level	A1	B1	C1	A1	B1	C1
Drilling parameters	40	0.1mm/rev	HSS	40	0.1 mm/rev	HSS
	m/min			m/min		
Surface Roughness (Ra)		0.3606062			0.42267	
Inlet Deformation Factor		1.018912			1.01975	
Outlet Deformation Factor		1.022462			1.02008	
Taguchi Optimization		Prediction		Confir	mation Experim	ent
Taguchi Optimization Level	A1	Prediction B1	C1	Confir A1	mation Experim B1	ent C1
Taguchi Optimization Level Drilling parameters	A1 40	Prediction B1 0.1mm/rev	C1 HSS	Confir A1 40	mation Experim B1 0.1 mm/rev	ent C1 HSS
Taguchi Optimization Level Drilling parameters	A1 40 m/min	Prediction B1 0.1mm/rev	C1 HSS	Confir A1 40 m/min	mation Experim B1 0.1 mm/rev	C1 HSS
Taguchi OptimizationLevelDrilling parametersSurface Roughness (Ra)	A1 40 m/min	Prediction B1 0.1mm/rev 1.6085	C1 HSS	Confir A1 40 m/min	mation Experim B1 0.1 mm/rev 1.65433	c1 HSS
Taguchi OptimizationLevelDrilling parametersSurface Roughness (Ra)Inlet Deformation Factor	A1 40 m/min	Prediction B1 0.1mm/rev 1.6085 1.02975	C1 HSS	Confir A1 40 m/min	mation Experim B1 0.1 mm/rev 1.65433 1.03096	c1 HSS

Table 13. Comparison of	prediction levels a	nd confirmation ex	periments result.
-------------------------	---------------------	--------------------	-------------------

According to the obtained prediction levels with Minitab 17 software, suggested confirmation experiment for the Ra, inlet and outlet deformation factors was the A1B1C1 parameter. The performed test results confirm the levels of optimum control factors determined based on Taguchi optimization method for Ra, inlet, and outlet deformation factors in our experimental design.

4. CONCLUSIONS

An experimental study was carried out to examine the machinability properties of PA6 thermoplastic composite materials produced by adding carbon fiber and multi-walled carbon nanotubes at different rates. In the study, feed rate and cutting speed were used as cutting parameters, and 4 different drill bit materials were used as cutters. To examine the effects of Ra, inlet deformation, and outlet deformation factors on the material, Taguchi analysis was used. Based on the analysis, the following conclusions were obtained within the selected parameters.

According to the Ra, inlet deformation, and outlet deformation results, 20% ratios for CF reinforced composites and 0.2% ratios for MWCNT reinforced composites generally gave better results.

MWCNT has more positive effect on both reducing Ra and reducing inlet-outlet deformations compared to the CF. The CF reinforcement increased the Ra while reduced the inlet and outlet deformation factors.

Lowest Ra value was obtained at A1B3C1, lowest inlet deformation obtained at A1B1C3, and the lowest outlet deformation obtained at A3B1C3 parameters for the PA6+20CF composite. Drill bit material was found to be the most effective parameter for Ra and outlet deformation factor, while cutting speed was the most effective parameter for inlet deformation factor for drilling of PA6+20CF composite material.

The lowest Ra was obtained at A2B2C2, lowest inlet deformation A2B1C3, and the lowest outlet deformation A3B1C1 parameters are required for the PA6+0.2MWCNT composite. While the feed rate has great effect on the Ra, the drill bit material for both inlet deformation and outlet deformation factors are the effective parameter for drilling of PA6+0.2MWCNT composite material.

It is observed that the outlet deformation factor for both carbon fiber and carbon nanotube reinforced materials is greater than the inlet deformation factors.

According to the confirmation experiments, Multi-response Taguchi optimization shows successful approach to obtaining minimum Ra, inlet, and outlet deformation.

When all variables are optimized, the A1B1C1 are the ideal parameters for drilling both PA6+20 CF and PA6+0.2MWCNT composite.

As further research, the effects of lubricating additives and different fiber types can also be examined. In addition, possible damage mechanism can be analyzed by simulating usage processes by performing fractured sample tests.

Declaration of Ethical Standards

The authors declare that all ethical guidelines including authorship, citation, data reporting, and publishing original research are followed.

Credit Authorship Contribution Statement

Abdurrahman Genc: Investigation, Resources, Writing, Original Ferhat Yildirim: Conceptualization, Methodology, Supervision, Editing, Draft, Validation. Murat Koyunbakan: Writing – Review & Editing, Visualization. Volkan Eskizeybek: Investigation, Resources, Visualization Gozde Kus: Investigation, Resources.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding / Acknowledgements

This work was supported by Kütahya Dumlupınar University Scientific Research Coordination Unit, Project number: 2016-90.

Data Availability

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

REFERENCES

- [1] Ş. Bayraktar, Y. Siyambaş, ve Y. Turgut, "Delik Delme Prosesi: Bir Araştırma", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt. 21, ss. 120-130, 2016.
- [2] P. S. İçli, "Polimerik Kompozitler: Geleceğin Teknolojileri", I. Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Sergisi, 2006, ss. 43-46,
- [3] T. Grilo, R. Paulo, C. Silva, and J. Davim, "Experimental Delamination Analyses of CFRPs Using Different Drill Geometries", *Composites: Part-B*, Vol. 45, pp. 1344-1350, 2013.
- [4] G. Kuş, M. Koyunbakan, S. H. Yetgin, F. Yıldırım, V. Eskizeybek, ve A. Genç, "Çok duvarlı karbon nanotüp katkılı poliamit 6 polimerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt. 11, No. 2, ss. 543-551, 2020.
- [5] G. Kuş, S. H. Yetgin, M. Koyunbakan, F. Yıldırım, V. Eskizeybek, ve A. Genç, "Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Katkılı Poliamit 6 Polimerinin Termal, Termo-Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", Erzincan University Journal of Science and Technology, Cilt. 13, No. 3, pp. 1389-1402, 2020.
- [6] L. Huimin, X. Xiangmin, L. Xiaohong, and Z. Zhijun, "Morphology, crystallization and dynamic mechanical properties of PA66/nano SiO2 composites", *Bulletion Materials Science*, Vol. 29, No. 5, pp. 485–490, 2006.
- [7] P. Renê Anisio da, L. Amanda Melissa Damião, A. Edcleide Maria, M. Vanessa da Nóbrega, M. Tomás Jeferson Alves de, and P. Luiz Antônio, "Mechanical and thermomechanical properties of polyamide 6/ Brazilian organoclay nanocomposites", *Polímeros*, Vol. 26, No.1, pp. 52-60, 2016.

- [8] S. S. Kumar, and G. Kanagaraj, "Investigation on Mechanical and Tribological Behaviors of PA6 and Graphite-Reinforced PA6 Polymer Composites", *Arabian Journal of Science Engineering*, Vol. 41, pp. 4347–4357, 2016.
- [9] G. Meral, M. Sarıkaya, and H. Dilipak, "The optimization of cutting of parameters in drilling processes by Taguchi method", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt. 27, No. 4, pp. 332-338, 2011.
- [10] U. Khashaba, I. El-Sonbaty, A. Selmy, A. Megahed, "Machinability Analysis in Drilling Woven GFR/Epoxy Composites: Part I-Effect of Machining Parameters", *Composites: Part-A*, Vol. 41, pp. 391-400, 2010.
- [11] A. Alberdi, T. Artaza, A. Suárez, A., Rivero, F. Girot, "An experimental study on abrasive waterjet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp. 1-14, 2015.
- [12] U. Köklü, Y. Kaynak, O. Demir, A. Avcı, ve A., Etyemez, "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozit Malzemelerin Talaşlı İşlenebilme Performansı", 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 2015, ss. 198-206.
- [13] M. Özsoy, and N. Özsoy, "Experimental And Statistical Investigation of Drilling of AISI 1040 Steel At Dry And Wet Conditions", *Konya Journal of Engineering Sciences*, Cilt. 8, No. 2, pp. 384-391, 2020.
- [14] H. B. Kaybal, A. Ünüvar, M. Koyunbakan, and A. Avcı, "A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, pp. 2995–3012, 2019.
- [15] M. A. Karataş, "Evaluation Of The Effect Of Machining Parameters On Delamination Damage In Drilling Of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite With Different Drill Bits", *Dicle University Journal of Engineering (DUJE)*, Vol. 13, pp. 19-25, 2022.
- [16] F. Kahraman, G. Başar, Z. Koçoğlu, ve E. Yeniyıl, "Delik Büyütme Işleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı Kullanılarak Optimizasyonu", *Politeknik Dergisi*, Vol. 21, No. 2, pp. 283-290, 2018.
- [17] A. Maslavi, H. Ünal, ve S. H. Yetgin, "Karbon Fiber Takviyeli Grafit Ve Ptfe Katkili Poli-Eter-Eter-Keton (Peek) Polimer Kompozitin Tribolojik Performanslarina Kayma Hizinin Etkisinin Belirlenmesi", Konya Journal of Engineering Sciences, Cilt. 10, No. 2, pp. 457-467, 2022.
- [18] T. Panneerselvam, and S. Raghuraman, "Optimization of Drilling Parameters For Delamination Associated with Pre-Drill in Chopped Strand Mat Glass Fibre Reinforced Polymeric Material", *Pertanika Journal Science and Technology*, Vol. 23, pp. 61-72, 2015.
- [19] T. Rajamurugan, K. Shanmugam, K. Palanikumar, "Analysis of Delamination in Drilling Glass Fiber Reinforced Polyester Composites", *Materials and Design*, Vol. 45, pp. 80-87, 2013.
- B. Işık, and E. Ekici, "Experimental Investigations of Damage Analysis in Drilling of Woven Glass Fiber-Reinforced Plastic Composites", *International Journal Advanced Manufacture Technology*, Vol. 49, pp. 861-869, 2010.
- [21] M. Ramesh, K. Palanikumar, and K. Reddy, "Experimental Investigation and Analysis of Machining Characteristics in Drilling Hybrid Glass-Sisal-Jute Fiber Reinforced Polymer Composites", 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, Vol. 461, pp.1-6, 2014
- [22] K. Palanikumar, "Experimental Investigation and Optimization in Drilling of GFRP Composites", *Measurement*, Vol. 44, pp. 2138-2148., 2011.
- [23] U. S. Rao, and L. Rodrigues, "Controlling Process Factors to Optimize Surface Quality in Drilling of GFPR Composites by Integrating DOE, Anova, and RSM Techniques", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8, pp. 1-9, 2015.
- [24] J. C. Rubio, L. Silva, W. Leite, T. Panzera, S. Filho, and J. Davim, "Investigations on the Drilling Process of Unreinforced and Reinforced Polyamides Using Taguchi Method", *Composites:Part-B*, Vol. 55, pp. 338-344, 2013.

- [25] E. Kuram, "Micro-Machinability of Injection Molded Polyamide 6 Polymer and Glass-Fiber Reinforced Polyamide 6 Composite", *Composites:Part-B*, Vol. 88, pp. 85-100, 2016.
- [26] R. F. Zinati, and M. Razfar, "Experimental and Modeling Investigation Of Surface Roughness in End-Milling Of Polyamide 6/Multi-Walled Carbon Nano-Tube Composite", International Journal Advanced Manufacture Technology, Vol. 75, pp. 979-989, 2014.
- [27] F. Fıçıcı, ve Z. Ayparçası, "%30 Cam Fiber Takviyeli Polipitilamit (PPA) Matriksli Kompozit Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi", 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTIS 2014), 2014, ss. 473-481.
- [28] V. Gaitonde, S. Karnik, SJ. C. C. Rubio, A. Abrão, A. E. Correia, and J. P. Davim, "Surface roughness analysis in high-speed drilling of unreinforced and reinforced polyamides", *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 21, pp. 2659-2673, 2012.
- [29] V. Gaitonde, S. Karnik, J. C. C. Rubio, W. de Oliveira Leite, and J. Davim, "Experimental studies on hole quality and machinability characteristics in drilling of unreinforced and reinforced polyamides", *Journal of Composite Materials*, Vol. 48, No. 1, pp. 21-36, 2014.
- [30] A. Uysal, "Relation Between Drill Bit Temperature and Chip Forms in Drilling of Carbon Black Reinforced Polyamide", *Journal of Thermal Engineering Yildiz Technical University Press*, Vol. 1, pp. 655-658, 2015.
- [31] Detsan Kimya A.Ş., "Technical properties of Polyamide 6" Technical datasheet, October 2017.
- [32] Dowaksa A.Ş., "Technical data sheet of Carbon fiber", November 2017.
- [33] Detsan Kimya A.Ş., "Technical properties of Multi Walled Carbon Nanotube" Technical datasheet, January 2018.
- [34] S. Korucu, G. Samtaş, "The effect of cutting parameters on wear, surface roughness and chip formation in drilling of Vanadis 4E steel with uncoated drill bits", *Dokuz Eylül University Faculty of EngineeringJournal of Science and Engineering (DEÜ FMD)*, Vol. 23, No. 69, 961-971, 2021.
- [35] H. Gökçe, İ. Çiftçi, "Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure Molybdenum", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 40, pp. 360, 2018.
- [36] T. N. Valarmathi, K. Palanikumar and B. Latha, "Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels", *Measurement*, Vol. 46, pp. 1220–1230, 2013.
- [37] A. Uysal, and E. Altan, "Karbon Siyahı Takviyeli Elektriği İleten Polipropilen Kompozite Delik Delinmesinde İşlem Parametrelerinin İncelenmesi", *Politeknik Dergisi*, Cilt. 18, ss. 241-249, 2015.
- [38] E. Kılıçkap, "CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi," 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, 2010, pp. 77.



MİKROKRİSTALİN SELÜLOZ VE ELMA KABUĞU KATKILI POLİLAKTİK ASİT ESASLI FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

¹*Pınar TERZİOĞLU^(D), ²Kemal Can TOHUMCU^(D)

^{1,2} Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
¹pinar.terzioglu@btu.edu.tr, ²kemaltohumcu@outlook.com

Önemli katkılar (Highlights)

- Gıda endüstrisi atığı olan elma kabuğu polimer katkısı olarak değerlendirildi.
- Elma kabuğu ve/veya mikrokristalin selüloz katkılı filmler geliştirildi.
- PLA esaslı biyokompozitler çevre dostu paketleme uygulamaları için adaylardır.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



PLA esaslı biyokompozit film üretimi şeması (PLA-based biocomposite film production scheme)



MİKROKRİSTALİN SELÜLOZ VE ELMA KABUĞU KATKILI POLİLAKTİK ASİT ESASLI FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

^{1*}Pınar TERZİOĞLU^(D), ²Kemal Can TOHUMCU^(D)

^{1,2} Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bursa, TÜRKİYE
¹pinar.terzioglu@btu.edu.tr, ²kemaltohumcu@outlook.com

(Geliş/Received: 23.09.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.12.2022)

ÖZ: PLA esaslı biyokompozit filmlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu çalışmada çözelti döküm yöntemi ile elma kabuğu (%0,5 w/w) ve/veya mikrokristalin selüloz (%0,5 w/w) katkılı polilaktik asit esaslı filmler üretilmiştir. Katkıların tek tek ve birlikte kullanımının filmlerin, yapısal, mekanik, termal ve optik özelliklerine etkisi sırasıyla FT-IR spektrofotometresi, mekanik test cihazı, termogravimetrik analizör (TGA) ve UV spektrofotometresi kullanılarak karakterize edilmiştir. Katkı maddelerinin polimer matriste iyi dağılım göstermiştir. Katkı maddelerinin eklenmesi, saf PLA filmlerin çekme dayanımı ve esnekliğini arttırırken, şeffaflığını biraz azaltmıştır. En yüksek çekme dayanımına (41,36 ± 0,7 MPa) sahip olan filmin elma kabuğu katkılı PLA filmi olduğu belirlenmiştir. Tüm filmler iyi termal kararlılığa sahiptir. Elma kabuğu ve/veya mikrokristalin selüloz katkılı filmler ile saf PLA esaslı film karşılaştırıldığında filmlerin termal bozunma davranışlarının değişmediği belirlenmiştir. PLA biyokompozit filmlerinin başarılı üretimi, çevre dostu ambalaj malzemeleri olarak kullanılma potansiyeline sahip olduklarını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Polilaktik Asit, Mikrokristalin Selüloz, PolimerKompozit, Tarımsal Atık

Investigation of Properties of Microcrystalline Cellulose and Apple Peel Incorporated Polylactic Acid Based Films

ABSTRACT: Studies on the development of PLA-based biocomposite films have gained momentum in recent years. In this study, apple peel (%0,5 w/w) and/or microcrystalline cellulose (%0,5 w/w) loaded polylactic acid based films were produced via solvent casting method. The effects of using the additives individually and together on the structural, mechanical and optical properties of the films were characterized by using FT-IR spectrophotometer, mechanical tester, thermogravimetric analyzer (TGA) and UV-3600 spectrophotometer, respectively. Additives showed good dispersion in the polymer matrix. The addition of additives increased the tensile strength and the flexibility of the neat PLA films, while slightly decreased the transparency. It was determined that the film with the highest tensile strength (41.36 \pm 0.7 MPa) was the apple peel loaded PLA film. All the films had good thermal stability. When the apple peel and/or microcrystalline cellulose loaded films were compared with the pure PLA film, it was determined that there was no change on thermal degradation behavior of the films. The successful production of PLA biocomposite films indicated that they have potential to be used as environmental-friendly packaging materials.

Keywords: Agricultural Waste, Microcrystalline Cellulose, Polylactic Acid, Polymer Composite

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polilaktik asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan (örneğin mısır, nişasta, şeker kamışı vb.) elde edilebilen, petrol türevi polimerlerin yerini alma ve sürdürülebilirliği ile ilgili sorunları çözme potansiyeline sahip biyoesaslı termoplastik bir polimerdir [1]. Çevre dostu bir polimer olan PLA, biyouyumluluk, biyolojik parçalanabilirlik ve UV kararlılığı gibi önemli özelliklere sahiptir [2-3]. Tüm biyoesaslı polimerler arasında PLA, geleneksel sentetik polimerlere kıyasla kolay işlenebilirliği ve karşılaştırılabilir mekanik ve termal özellikleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir [1]. PLA çatal, bıçak, bardak, kapak, pipet, çanta ve film ambalajları gibi birçok tek kullanımlık ürünlerin üretiminin yanısıra esnek ve sert gıda paketleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Fakat PLA'nın fiziksel yaşlanmasının hızlı oluşu [5], kırılgan yapısı, düşük bariyer özellikleri ve yük altında eğilme sıcaklığı (~55 °C) emtia ürünlerinin imalatındaki uygulamasını sınırlandırmaktadır [1]. PLA'nın özellikleri kristallik oranının ayarlanması, ilave fonksiyonel monomerin kopolimerizasyonu, diğer polimerlerle harmanlama ve mikro/nano-dolgu malzemeleri ile güçlendirilmesi gibi farklı modifikasyon stratejileri ile iyileştirilebilir [3].

PLA'nın özelliklerini iyileştirmekle birlikte maliyet performans dengesini optimize edebileceği için dolgu malzemesi olarak doğal liflerin kullanımı son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Doğal lifler düşük maliyetleri, düşük yoğunlukları, yenilenebilirlikleri, kolay bulunabilirlikleri ve biyolojik olarak parçalanabilmeleri nedeniyle inorganik malzemeler veya diğer sentetik lif takviyeleri yerine ikame olarak kullanılmak için büyük bir potansiyele sahiptir [3]. Doğal lif olarak selüloz ve türevleri [6], kenevir [7], şeker kamışı [5], sisal [8], muz [8], ananas [9] ve hindistan cevizi [10] lifi gibi malzemeler PLA esaslı kompozitlerin üretiminde değerlendirilmiştir.

Mikrokristalin selüloz (MCC), beyaz, kokusuz, tatsız, kristal toz halde olan saflaştırılmış kısmen depolimerize edilmiş selülozdur [11]. MCC kolay bulunabilirlik, nispeten düşük maliyet, düşük yoğunluk ve yüksek mekanik dayanım özelliklerinden dolayı organik esaslı dolgu malzemeleri arasında giderek daha fazla ilgi görmektedir [12]. MCC biyouyumlu olduğu, toksik ve alerjik olmadığı için gıda ürünlerinde kullanılmak üzere onaylanmıştır [13]. MCC katkılı PLA esaslı filmlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur [6, 14]. Fakat, katkı oranına bağlı olarak PLA esaslı filmlerin mekanik özelliklerinin iyileşmediği belirtilmiştir [6]. MCC'nin nihai malzemenin özelliklerini iyileştirme potansiyelinin, matris/selüloz sistemi ve proses koşulları gibi faktörlerle ilişkilendirilebileceği vurgulanmıştır [6].

Benzer şekilde, tarımsal ve gıda endüstrisi atıkları da polimerler için sentetik dolgu maddelerinin potansiyel ikamesi olarak araştırılmaktadır [15]. Elma (Malus pumila Mill.), dünyada en yaygın olarak yetiştirilen meyvelerden biridir [16]. Elma püresi, elma suyu veya konserve elma üretiminde yan ürün olarak büyük miktarlarda elma kabuğu açığa çıkmaktadır [16-17]. Fakat genellikle elma kabukları etkili bir şekilde değerlendirilememektedir. Literatürde elma kabuğu katkılı karboksimetil selüloz [16] ve kitosan/jelatin [18] esaslı biyokompozit filmlerin geliştirildiği çalışmalar vardır.

Bu çalışmanın amacı, PLA'nın performansını iyileştirmek için sürdürülebilir ve biyobozunur katkıların kullanımı ile PLA esaslı biyokompozitlerin üretilmesi için öncülük etmektir. Bu çalışmada, PLA matris, mikrokristalin selüloz ve elma kabuğu katkı maddesi olarak kullanılarak filmler hazırlanmıştır. PLA esaslı dört farklı film çözelti döküm yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu katkıların tek tek ve bir arada kullanımının filmlerin mekanik, optik, termal ve yapısal özelliklerine olan etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Mikrokistalin selüloz (MCC, beyaz toz, yoğunluk 0,27-0,34 g/mL, <100 µm), Tito firmasından (Türkiye) satın alınmıştır. PLA (ortalama moleküler ağırlık 80 g/mol, kalınlık 1.77 mm) ABG Filament firmasından (Türkiye) satın alınmıştır. Kloroform Isolab firmasından (Almanya) satın alınmıştır. Elma marketten satın alınarak kabukları soyulduktan sonra etüvde 65°C'de 72 saat boyunca kurutulmuştur.

Kurutulan elma kabukları elektrikli öğütücü ile öğütülerek toz haline getirilmiştir. Toz haldeki elma kabukları elenerek (<100 µm) deneylerde kullanılmıştır.

2.2. Filmlerin Hazırlanması (Preparation of Films)

Bu çalışmada dört farklı biyokompozit film hazırlanmıştır. Filmlerin kompozisyonu Çizelge 1'de gösterilmektedir. Kontrol filmi çözeltisi, PLA (2 g)'nın kloroform (20 ml) içerisinde ısıtmalı manyetik karıştırıcıda 150 rpm karıştırma hızı ile 50°C'de 2 saat karıştırılması ile hazırlanmıştır. Çözelti cam petri camına (çapı 11 cm) dökülerek 24 saat boyunca oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Sonrasında ağzı kilitli poşetlerde saklanmıştır.

Katkılı filmlerin hazırlanması için PLA kloroform içerisinde 1 saat karıştırıldıktan sonra ayrı ayrı PLA'nın ağırlığınca %0,5 oranında selüloz, elma kabuğu ve iki katkı bir arada eklenerek üretim gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu filmler sırasıyla PLA/MCC, PLA/EK ve PLA/MCC/EK şeklinde isimlendirilmiştir.

Çizelge 1. Filmlerin kompozisyonları				
Table 1.Composition of the films				
Film	PLA Miktarı (gram)	Selüloz	Elma Kabuğu Miktarı	Kloroform Miktarı
	Ū.	Miktarı	(% w/w PLA)	(ml)
		(% w/w PLA)		
PLA (kontrol)	2	-	-	20
PLA/MCC	2	0,5	-	20
PLA/EK	2	-	0,5	20
PLA/MCC/EK	2	0,5	0,5	20
	PLA Granül PLA Granül PLA/Klorofom Çözeltisi	→ elti Döküm mi	PLA Esaslı Biyoambalaj	
	PLA Granül	Selüloz / El	ma Kabuğu	

Şekil 1. Filmlerin hazırlanışının şematik gösterimi a)PLA kontrol filminin b) PLA/MCC/EK filminin hazırlanışı

Çözelti Döküm

İşlemi

PLA Esash Biyoambalaj

PLA/Selüloz

Karışımı

PLA/Elma Kabuğu

Figure 1. Schematic representation of the preparation of the films a) PLA control film b) Preparation of the PLA/MCC/EK film

2.3. Filmlerin Karakterizasyonu (Characterization of the Films)

PLA/Klorofom

Cözeltisi

2.3.1. FTIR analizi (FTIR analysis)

Kompozit filmlerin kimyasal yapıları ve etkileşimleri FT-IR spektroskopisi (Thermo Nicolet iS50 FT-IR, ABD) ile incelenmiştir. Filmlerin spektral bilgileri, % geçirgenlik modu kullanılarak 4 cm⁻¹ çözünürlükte ve 500- 4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında kaydedilmiştir [19].

2.3.2. Film kalınlığı (Film thickness)

Film kalınlığı, her numune için beş rastgele konum seçilerek bir dijital kumpas (ABS ASIMETO, Türkiye) ile ölçülmüştür. Sonuçlar, ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması olarak verilmiştir.

2.3.3. Mekanik özellikler (Mechanical properties)

Kompozit filmlerin çekme dayanımı (TS), kopma uzaması (ε) ve Elastisite (Young) modülü (E), ASTM D882 standart test metoduna göre 1 KN yük ve 25 mm/dk çekme hızında AGS-X Serisi Universal test cihazı (Shimadzu, Japonya) kullanılarak incelenmiştir. Her numunenin üç ayrı ölçümünden mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuçlar, ortalama veriler ± standart sapma olarak verilmiştir.

2.3.4. Film transparanlığı (Transparency of the films)

Film transparanlığının belirlenmesi için her numunenin yüzde transparanlık değeri 200-800 nm dalga boyu aralığında Shimadzu UV-3600 spektrofotometresi (Shimadzu, Japonya) kullanılarak kaydedilmiştir. Filmlerin transparanlığı Denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır [19].

$$Transparanlık = \frac{\log(\% T_{600})}{x}$$
(1)

%T₆₀₀ = geçirgenlik yüzdesi ve x = film kalınlığı (mm).

2.3.5. Filmlerin termogravimetrik analizi (TGA) (Thermogravimetric analysis of films)

Filmlerin termal bozunması termogravimetrik diferansiyel termal analiz (TG/DTA) tekniği ile TA/SDT650 (TA Instruments, Inc., New Castle, ABD) cihazı kullanılarak belirlendi. Analizler filmlerin sırasıyla nitrojen atmosferi ve oksijen atmosferi altında 25 °C'den 600 °C'ye ve 600 °C'den 900 °C'ye çıkılması ile gerçekleştirilmiştir [20]. Isıtma hızı 20 °C/dk olarak çalışılmıştır.

3. BULGULAR ve SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

3.1. Filmlerin Mekanik Özellikleri (Mechanical Properties of Films)

Farklı katkıların PLA esaslı filmlerin çekme dayanımı, kopma uzaması ve Young modülü üzerindeki etkisi Çizelge 2'de sunulmaktadır. Çekme dayanımı, bir filmin dayanabileceği maksimum kuvveti temsil ederken kopma uzaması, bir filmin esneme yeteneğinin ölçümüdür. Filmlerin mikro yapısı ve moleküller arası kuvvetler mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynamaktadır [21]. PLA filminin çekme dayanımı ve Young modülü sırasıyla 15,12 MPa ve 478,07 MPa iken kopma uzaması % 26,98 olarak bulunmuştur. PLA esaslı filmlere eklenen tüm katkılar filmlerin çekme dayanımıı (~31-41 MPa) arttırmıştır. Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde elma kabuğu katkılı PLA esaslı filmin en yüksek mukavemet değerini sağladığı görülmektedir. PLA/MCC/EK filminin de saf PLA filmine göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Katkıların mekanik özellik üzerindeki olumlu etkisinin katkıların PLA matrisi içerisinde iyi dağılım göstermesi ile ilişkilendirilebilir [22-23]. Yaptığımız çalışmada katkı miktarının az olması nedeniyle katkıların matriste iyi bir dağılım gösterdiği ve bir araya gelme eğilimi göstermediği düşünülmektedir. [6] çalışmasında çözelti döküm yöntemi ile MCC dolgu malzemesi olarak %3-7 oranlarında PLA matrisine eklenmiştir. MCC eklenen PLA esaslı filmlerin elastik modülünün %18-28 azaldığı belirlendi. Bu durum fazlar arasındaki zayıf etkileşim nedeniyle PLA matrisindeki MCC agregalarının neden olduğu zayıf dağılım ile ilişkilendirilmiştir.

Kopma uzaması sonuçlarına bakıldığında, katkılı filmlerin tümünde PLA filmine göre düşüş gösterirken Young Modülü değerlerinde saf PLA filmine göre artış gözlemlenmiştir. En fazla artışı PLA/EK filminde gerçekleşmiştir. Young modülündeki artış hidrojen bağlarındaki artış ve katkı maddesinin sertleştirme etkisinden kaynaklanmaktadır [24]. Kopma uzamasında meydana gelen düşüş

ise çekme testi sırasında PLA'nın segmental zincir hareketini katkıların kısıtlaması ile açıklanabilir [24]. Benzer sonuçlar literatürde de mevcuttur [23, 25]. [25] çalışmasında selüloz nanolifi katkılı PLA esaslı filmlerin çekme dayanımının saf PLA filminden daha yüksek olduğu fakat kopma uzamasının düştüğü belirlenmiştir. Bir diğer çalışmada ise selüloz nanokristal katkısı ile PLA esaslı filmin Young modülünün arttığı ortaya konulmuştur [26].

Numune	Kalınlık (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Young Modülü (MPa)
PLA	0,15	15,12 ± 4,1	26,98 ± 6,2	478,07 ± 136,5
PLA/EK	0,15	$41,36 \pm 0,7$	$23,38 \pm 1,0$	1313,27 ± 42,5
PLA/MCC	0,15	$34,29 \pm 4,1$	$20,55 \pm 2,4$	$1108,73 \pm 126,0$
PLA/MCC/EK	0,15	$31,54 \pm 2,6$	$17,63 \pm 1,3$	1004,91 ± 92,9

Çizelge 2. Filmlerin mekanik özellikleri

3.2. Filmlerin FT-IR analizi (FT-IR analysis of films)

Filmlerin FTIR spektrumu Şekil 2'de verilmektedir. Ayrıca, karakteristik piklere ait fonksiyonel gruplar Çizelge 3'de sunulmaktadır. Filmlerin spektrumları karşılaştırıldığında saf PLA filminde belirlenen 753, 867, 964, 1081, 1273, 1450, 1750, 2933, 2945, 3005 cm⁻¹'deki pik pozisyonlarında katkı ilavesi sonrasında küçük kaymalar meydana geldiği belirlenmiştir. PLA ait spektrum incelendiğinde 753 cm⁻¹'deki pik kristal fazı ve 867 cm⁻¹'deki pik amorf fazı göstermektedir [27]. 1273 ve 1265 cm⁻¹ aralığında bulunan pikler C-O eter gerilmesinden kaynaklanırken, 964 ve 956 cm⁻¹ aralığında bulunan pikler alken C-H bükülmesinden kaynaklanımaktadır [27]. 1080 cm⁻¹ 'de bulunan pik kompleks C-O-C grubunun asimetrik gerilmesi ile ilişkilidir [27]. 1451 cm⁻¹ 'deki pik -CH₃ grubuna aittir. Tüm numuneler, karbonil grubunun (-C=O) laktit tarafından asimetrik gerilmesini gösteren 1750 cm⁻¹ 'deki tipik pike sahiptir [28]. 2945 cm⁻¹'deki pik, PLA ana zincirindeki -CH- gruplarına aittir [29]. 3002 cm⁻¹' deki pik L-laktik asidin terminal -OH'sini gösterir [29].

MCC, geniş spesifik yüzey alanına sahip küçük parçacıklardan oluştuğu için hidroksil grupları arasında moleküller arası hidrojen bağlarının oluşumuna yol açmaktadır. Elma kabuğunda bulunan polifenollerin –OH grupları arasındaki hidrojen bağları da matris ile etkileşime katkıda bulunmaktadır [21]. Özellikle PLA/EK ve PLA/MCC/EK filmlerinde 921 cm⁻¹'deki pikin yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir. Pik pozisyonları ve yoğunluklarındaki değişimler dolgu malzemelerinin, polimer esaslı kompozitlerde artan hidrojen bağına yol açtığını ve böylece PLA esaslı kompozit filmlerin mekanik mukavemetini geliştirmek için faydalı olabileceğini göstermektedir [30].



	Dalga Sayısı (cm ⁻¹)				
PLA	PLA/EK	PLA/MCC	PLA/MCC/EK	Karşılaştırma	Fonksiyonel Gruplar
756	753	753	756	PLA/EK ve PLA/MCC'de sağ	PLA kristal fazı [27]
				tarafa kayma oldu.	
871	874	868	871	PLA/EK'de sol tarafa ve	PLA amorf fazı [27]
				PLA/MCC'de sağ tarafa	
				kayma oldu.	
921	921	924	921	PLA/MCC'de sol tarafa kayma	-CH3 helisel iskelet titreşimleri
				oldu.	[31]
956	956	956	956	-	Alken C-H bükülmesi [27]
1083	1080	1083	1080	PLA/EK ve PLA/MCC/EK'de	C-O-C grubu asimetrik
				sağ tarafa kayma oldu.	gerilmesi [27]
1133	1130	1127	1130	PLA/EK, PLA/MCC ve	PLA yapısındaki ester grupları
				PLA/MCC/EK'de sağ tarafa	[32]
				kayma oldu.	
1181	1080	1080	1081		-CH-O grubundaki –C-O- bağ
					gerilmesi [28]
1271	1268	1265	1268	PLA/EK, PLA/MCC ve	C-O eter gerilmesi [27]
				PLA/MCC/EK'de sağ tarafa	
				kayma oldu.	
1306	1306	1306	1304		-CH bükülmesi [27]
1359	1359	1356	1359	PLA/MCC'de sağ tarafa	-CH ₃ gruplarının simetrik
				kayma oldu.	deformasyonu [27]
1386	1383	1383	1383		-CH deformasyonu [31]
1451	1454	1454	1454	PLA/EK, PLA/MCC ve	-CH ₃ gruplarının asimetrik
				PLA/MCC/EK'de sol tarafa	deformasyonu [27-28]
				kayma oldu	
1748	1748	1748	1745	PLA/MCC/EK'de sağ tarafa	Karbonil grubunun (-C=O)
				kayma oldu	laktik asit tarafından asimetrik
					gerilmesi [28]
2016	20.42	2016	2016		
2946	2943	2946	2946	PLA/EK'de sağ tarafa kayma	PLA'nın ana zıncırındeki -CH-
2002	2007	2007	2007	oldu	grupiari [29]
3002	2996	2996	2996	PLA/EK, PLA/MCC ve	Yan zincirlerdeki -CH ₃
				PLA/MCC/EK de sag tarafa	gruplarinin C-H asimetrik ve
				kayma oldu.	sımetrik titreşimi [29]

Çizelge 3. Filmlerin karakteristik pikleri ve fonksiyonel grupları *Table 3.* Characteristic peaks and functional groups of films

3.3. Filmlerin Fiziksel Görünümü ve Optik Özellikleri (Physical Appearance and Optical Properties of Films)

Renk ve transparanlık gibi optik özellikler, filmin dış görünümünü etkileyen önemli özellikleridir. Gıda ambalajı uygulamalarında malzemelerin transparanlığı çok önemlidir çünkü tüketicilerin bir ürünü satın almadan önce incelemesini sağlar ve çekici bir görünüme sahip ürünler satıcılar tarafından daha iyi sunulabilir [33]. Filmlerin görsel görünümleri Şekil 3'te verilmektedir. Genel olarak, filmlerin transparanlığı iyi görünmektedir. Saf PLA esaslı filme göre filmlerin transparanlık değerlerinde katkıların ilave edilmesi ile birlikte az bir miktar azalış belirlense de görsel incelemede şeffaflıklarını koruduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, PLA kompozit filmlerin gıda ambalajlama uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir.

Diğer bir açıdan bazı gıda veya UV'ye duyarlı ürünler için ambalaj malzemelerinin, malzeme bozulmasına ve kimyasal reaksiyonlara neden olabilecek UV radyasyonundan korunması beklenmektedir [23]. Filmlerin UV ışık bariyer özelliği, ışığın gıda bozulması üzerindeki etkilerini azaltan koruyucu bir ajan olarak gıda ve içecek uygulamaları için ambalajın etkinliği hakkında fikir vermektedir. PLA esaslı filmlerin UV bariyer özellikleri, UVA (360 nm), UVB (300 nm) ve UVC (240 nm) bölgelerinde numunelerin ışık geçirgenliği ile değerlendirilmiştir (Çizelge 4). Filmlerin UVC bölgesinde geçirdiği ışığının yüzdesi (%7,10-9,90) düşüktür. Saf PLA esaslı film tüm numunelere göre tüm dalga boyu aralığında en yüksek geçirgenlik yüzdesine sahiptir. Bu da filmin yüksek şeffaflığını göstermektedir. PLA matrisine elma kabuğu ve mikrokristalin selüloz ilavesi sonucunda filmin transparanlık değerlerinde az miktarda düşüş meydana gelmiştir. Bu azalma, polimer içerisinde katkı maddesinin ışık penetrasyonu ve UV koruması için bariyer şeklinde davranmasına atfedilebilir [26].



PLA PLA/EK PLA/MCC PLA/MCC/EK

Şekil 3. Filmlerin görsel görünümleri *Figure 3.* Visual appereance of the films

Numune	UVC	UVB	UVA	Transparanlık
	(240 nm)	(300 nm)	(360 nm)	
	(T%)	(T%)	(T%)	
PLA Kontrol	9,90	90,09	96,56	13,34
PLA/EK	8,35	88,56	95,68	13,33
PLA/MCC	7,10	87,00	94,88	13,31
PLA/MCC/EK	7,47	84,54	93,32	13,31

Çizelge 4. Filmlerin UV ışık geçirgenliği yüzdesi (T%) ve transparanlık değerler
Table 4. Percentage of UV light transmittance (T%) and transparency values of films

3.4. Filmlerin Termal Kararlılığı (Thermal Stability of Films)

PLA esaslı filmlerin termal kararlılığı, TG-DTA analizi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen termogram Şekil 4'de verilirken %10 (Td₁₀),% 50 (Td₅₀) ve % 90 (Td₉₀) kalan ağırlıkta bozunma sıcaklığı değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur. Sonuçlara bakıldığında tüm filmlerin azot atmosferinde iki aşamalı bozunma gösterdikleri tespit edilmiştir. Filmlerin Td₁₀ ve Td₅₀ sıcaklıklarının birbirlerine yakın değerler olduğu belirlenmiştir. Td₉₀ değerleri incelendiğindeyse saf PLA filmine mikrokristalin selüloz ilavesi ile bu değerin az da olsa arttığı, elma kabuğu ve elma kabuğu ile mikrokristalin selüloz birlikte katıldığındaysa bu değerin görece azaldığı belirlenmiştir. PLA esaslı filmlerde öncelikle 100°C-230°C arasında hızlı bir kütle kaybı (yaklaşık % 7) gerçekleşmiştir. İkinci bozunma aşaması ise 330°C-395°C aralığında gerçekleşmiştir. İlk aşamada moleküller arası ve molekül içi hidrojen bağları, yavaş yavaş su kaybıyla birlikte parçalanmaktadır. İkinci ağırlık kaybı ise tüm filmlerin depolimerizasyon ve pirolitik ayrışma ile termal bozulmalarından kaynaklanmaktadır. Tüm bu değerlendirmeler ışığında saf PLA'ya

elma kabuğu ve mikrokristalin selülozun tek tek ya da birlikte dâhil edilmesinin filmlerin termal bozunma davranışlarını değiştirmediği sonucuna varılmıştır.



Figure 4. TGA termograms of films

Çizelge 5. Filmlerin %10 (Td₁₀),% 50 (Td₅₀) ve % 90 (Td₉₀) kalan ağırlıkta bozunma sıcaklıkları *Table 5.* Decomposition temperatures of biocomposite films at 10 % (Td₁₀), 50 % (Td₅₀) and 90 % (Td₉₀) residual weight

Numune	Td 10	Td 50	Td 90	
	(°C)	(°C)	(°C)	
PLA Kontrol	386,7	371,6	340,5	
PLA/ EK	385,1	370,5	338,0	
PLA/MCC	386,6	371,8	342,6	
PLA/MCC/ EK	383,9	368,7	336,6	

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Biyokompozit filmler PLA matrisine mikrokristalin selüloz ve elma kabuğu eklenerek çözelti döküm yöntemi ile başarılı bir şekilde hazırlanmıştır. Filmlerin mekanik, optik ve yapısal özelliklerinin katkı maddelerinin ilavesi ile değiştiği gözlemlenmiştir. Filmlerin çekme dayanımı ve esneklik değerleri katkıların ilavesiyle artarak pozitif bir davranış göstermiştir. Katkılı filmlerin termal bozunma davranışının saf PLA filmininkine benzer olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, PLA gibi biyopolimerler esaslı malzemelerde elma kabuğu tozu ve mikrokristalin selülozun düşük maliyetli dolgu maddesi olarak değerlendirilebileceğini desteklemektedir. Değerlendirilen özellikler göz önüne alındığında, biyokatkı içeren filmlerin, sentetik muadillerine kısmi bir alternatif olarak ambalaj endüstrisinde potansiyel uygulamalar bulabileceği düşünülmektedir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Çalışma etik standartlara uygun olarak yürütülmüştür.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Pınar TERZİOĞLU: Kavramsallaştırma, Veri iyileştirme, Biçimsel analiz, Araştırma, Doğrulama, Yazma - orijinal taslak, Yazma - gözden geçirme ve düzenleme. Kemal Can TOHUMCU: Veri toplama, Araştırma, Analizler

_

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Tüm yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler istek üzerine sunulacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Dhar, D. Tarafder, A. Kumar, and V. Katiyar, "Thermally recyclable polylactic acid/cellulose nanocrystal films through reactive extrusion process," *Polymer*, vol. 87, pp. 268-282, 2016.
- [2] C. G. Li, W. G. Peng, Y. X. Li, P. F. Xu, W. Tian, and R. Zhang, "Thermal and mechanical properties of bagasse microcrystalline cellulose reinforced PLA composites," *Advanced Materials Research*, vol. 284, pp. 1786-1789.
- [3] R. D. Kale, V. G. Gorade, N. Madye, B. Chaudhary, P. S. Bangde, and P. P. Dandekar, "Preparation and characterization of biocomposite packaging film from poly(lactic acid) and acylated microcrystalline cellulose using rice bran oil," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 118, no. Part A, pp. 1090-1102, 2018.
- [4] M. P. Arrieta, J. López, S. Ferrándiz, and M. A. Peltzer, "Characterization of PLA-limonene blends for food packaging applications," *Polymer Testing*, vol. 32, no. 4, pp. 760-768, 2013.
- [5] A. Bartos, K. Nagy, J. Anggono, A. H. Purwaningsih, J. Móczó, and B. Pukánszky, "Biobased PLA/sugarcane bagasse fiber composites: Effect of fiber characteristics and interfacial adhesion on properties," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 143, pp. 106273,2021.
- [6] F.A.D. Santos, G.C.V. Iulianelli, and M. I.B. Tavares, "Effect of microcrystalline and nanocrystals cellulose fillers in materials based on PLA matrix," *Polymer Testing*, vol. 61, pp. 280-288,2017.
- [7] M.T. Zafar, S.N. Maiti, and A.K. Ghosh, "Effect of surface treatments of jute fibers on the microstructural and mechanical responses of poly(lactic acid)/jute fiber biocomposites," *RSC Advances*, vol. 6, pp. 73373-73382, 2016.
- [8] B. Asaithambi, G. Ganesan, and S. Ananda Kumar, "Bio-composites: Development and mechanical characterization of banana/sisal fibre reinforced poly lactic acid (PLA) hybrid composites," *Fibers and Polymers*, vol. 15, pp. 847–854, 2014.
- [9] U. K. Komal, M. K. Lila, and I. Singh, "Processing of PLA/pineapple fiber based next generation composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, no. 14, pp.1677-1692, 2021.
- [10] J. Y. Jang, T. K. Jeong, H. J. Oh, J. R. Youn, and Y. S. Song, "Thermal stability and flammability of coconut fiber reinforced poly(lactic acid) composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 5, pp. 2434-2438, 2012.
- [11] H.P.S. Abdul-Khalil, T.K. Lai, Y.Y. Tye, M. T. Paridah, M. R. Nurul Fazita, A. A. Azniwati, R. Dungani, and S. Rizal, "Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Sacred Bali Bamboo as Reinforcing Filler in Seaweed-based Composite Film," *Fibers and Polymers*, vol. 19, pp. 423–434, 2018.
- [12] X. Huang, F. Xie, and X. Xiong, "Surface-modified microcrystalline cellulose for reinforcement of chitosan film," *Carbohydrate Polymers*, vol. 201, pp. 367-373,2018.
- [13] M. A. Hamdan, N.A. Ramli, N. A. Othman, K.N.M. Amin, and F. Adam, "Characterization and property investigation of microcrystalline cellulose (MCC) and carboxymethyl cellulose (CMC) filler on the carrageenan-based biocomposite film," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, no. 1, pp. 56-62, 2021.
- [14] U. C. Paul, D. Fragouli, I. S. Bayer, A. Zych, and A. Athanassiou, "Effect of Green Plasticizer on the Performance of Microcrystalline Cellulose/Polylactic Acid Biocomposites," ACS Applied Polymer Materials, vol. 3, no. 6, pp. 3071–3081, 2021.
- [15] C.C. Daniel-Mkpume, R.C. Ahaiwe, C.L. Ifenatuorah, I. C. E. Ike-Eze, V. S. Aigbodion, S.V. Egoigwe, and E.G. Okonkwo, "Potential end of life application of African star apple shell and waste toner powder as composite filler materials," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 24, pp. 680–691, 2022.

- [16] S.H. Shin, S.J. Kim, S.H. Lee, K. M. Park, and J. Han, "Apple Peel and Carboxymethylcellulose-Based Nanocomposite Films Containing Different Nanoclays," *Journal of Food Science*, vol. 79, no. 3, pp. E342-E353, 2014.
- [17] M.S. Akter, M. Ahmed, and J.B. Eun, "Effect of blanching and drying temperatures on the physicochemical characteristics, dietary fiber composition and antioxidant-related parameters of dried persimmons peel powder," *International Journal of Food Science and Nutrution*, vol. 61, pp. 702–712,2010.
- [18] A. Riaz, C. Lagnika, M. Abdin, M.M. Hashim, and W. Ahmed, "Preparation and Characterization of Chitosan/Gelatin-Based Active Food Packaging Films Containing Apple Peel Nanoparticles," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 411–420, 2020.
- [19] P. Terzioğlu, F. Güney, F. N. Parın, İ. Şen, and S. Tuna, "Biowaste orange peel incorporated chitosan/polyvinyl alcohol composite films for food packaging applications," *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 30, no. 100742, 2021.
- [20] P. Terzioglu, and Y. Sıcak, "Citrus Limon L. Peel Powder Incorporated Polyvinyl Alcohol/Corn Starch Antioxidant Active Films," *Journal of the Institute of Science and Technology*, vol. 11: 2,pp. 1311-1320, 2021.
- [21] A. Riaz, S. Lei, H.M.S. Akhtar, P. Wan, D. Chen, S. Jabbar, M. Abid, M.M. Hashim, and X. Zeng, "Preparation and characterization of chitosan-based antimicrobial active food packaging film incorporated with apple peel polyphenols," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 114, pp. 547-555, 2018.
- [22] M. Okur, "Borik asit, sitrik asit, askorbik asit içeren polikaprolakton/halloysit filmlerin ambalaj malzemesi olarak değerlendirilmesi," *Politeknik Dergisi*, vol. 24, no. 1, pp. 315-321, 2021.
- [23] E.F. Sucinda, M.S.A. Majid, M.J.M. Ridzuan, E.M. Cheng, H.A. Alshahrani, and N. Mamat, " Development and characterisation of packaging film from Napier cellulose nanowhisker reinforced polylactic acid (PLA) bionanocomposites," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 187, pp. 43-53, 2021.
- [24] M.K.M. Haafiz, A. Hassan, Z. Zakaria, I.M. Inuwa, M.S. Islam, and M. Jawaid, "Properties of polylactic acid composites reinforced with oil palm biomass microcrystalline cellulose," *Carbohydrate Polymers*, vol. 98, no. 1, pp. 139-145, 2013.
- [25] D. Y. Liu, X. W. Yuan, D. Bhattacharyya, and A. J. Easteal, "Characterisation of solution cast cellulose nanofibre – reinforced poly(lactic acid)," *eXPRESS Polymer Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 26-31, 2010.
- [26] R. Z. Khoo, W.S. Chow, and H. Ismail, "Tensile, thermal and ultra-violet shielding enhancement of poly(lactic acid) bionanocomposite film using cellulose nanocrystals extracted from sugarcane bagasse," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2022.
- [27] S. Roy, and J. W. Rhım, "Preparation of bioactive functional poly (lactic acid)/curcumin composite film for food packaging application," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 162, pp. 1780-1789, 2020.
- [28] M.P. Arrieta, J. López, E. Rayón, and A. Jiménez, "Disintegrability under composting conditions of plasticized PLA–PHB blends," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 108, pp. 307-318, 2014.
- [29] R. Nasrin, S. Biswas, T. U. Rashid, S. Afrin, R.A. Jahan, P. Haque, and M.M. Rahman, "Preparation of Chitin-PLA laminated composite for implantable application," *Bioactive Materials*, vol. 2, no. 4,pp. 199-207, 2017.
- [30] L. Jiang, F. Wang, X. Xie, C. Xie, A. Li, N. Xia, X. Gong, and H. Zhang, "Development and characterization of chitosan/guar gum active packaging containing walnut green husk extract and its application on fresh-cut apple preservation," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 209, no. Part A, pp. 1307-1318, 2022.
- [31] N. Gürler, S. Paşa, M. H. Alma, and H. Temel, "The fabrication of bilayer polylactic acid films from cross-linked starch as eco-friendly biodegradable materials: Synthesis, characterization, mechanical and physical properties," *European Polymer Journal*, vol. 127, pp. 109588, 2020.

- [32] J. Xu, J. Zhang, W. Gao, H. Liang, H. Wang, and J. Li, "Preparation of chitosan/PLA blend micro/nanofibers by electrospinning," *Materials Letters*, vol. 63, no. 8, pp. 658-660,2009.
- [33] Y. Wang, Y. Qin, Y. Zhang, M. Yuan, H. Li, and M. Yuan, "Effects of N-octyl lactate as plasticizer on the thermal and functional properties of extruded PLA-based films," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 67, pp. 58-63, 2014.



EVALUATION OF THE HISTORICAL IPLİKÇİ MOSQUE ACCORDING TO DBYBHY 2007 AND TBDY 2018 REGULATIONS

^{1*}Elifnur ŞAKALAK¹, ²Mahmud Sami DÖNDÜREN

 ¹Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, TÜRKİYE
 ² Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Konya, TÜRKİYE
 ¹elifnursakalak@isparta.edu.tr, ²msdonduren@ktun.edu.tr

Highlights

- It is necessary to carry out the necessary controls and maintenance in order to protect and maintain the historical structures that have existed from the past to the present.
- While there is only unreinforced masonry building type in the 2007 earthquake regulation regarding the design rules of masonry buildings, 3 new masonry building types have been added in addition to the unreinforced masonry building type in the 2018 earthquake regulation.
- In 2007 earthquake regulation, the calculation method of safety stresses is used while making the investigations. With 2018 earthquake regulation, the calculation method of safety stresses was abandoned and the method of calculation of bearing capacity began to be used.
- The calculation methods for masonry buildings with the 2018 earthquake regulation are more detailed and comprehensive than the 2007 earthquake regulation.
- Earthquake parameters can be obtained directly from AFAD by entering the coordinates where the building is located in the earthquake hazard map of Turkey in the 2018 earthquake regulation.
- There is no separate section in our 2018 earthquake regulation for studies on historical buildings.
- It is necessary to create an additional section to our earthquake regulation regarding the calculation methods of historical buildings.



EVALUATION OF THE HISTORICAL İPLİKÇİ MOSQUE ACCORDING TO DBYBHY 2007 AND TBDY 2018 REGULATIONS



 ¹Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, TÜRKİYE
 ² Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, Konya, TÜRKİYE
 ¹elifnursakalak@isparta.edu.tr, ²msdonduren@ktun.edu.tr

(Received: 14.09.2022; Accepted in Revised Form: 19.12.2022)

ABSTRACT: Preservation of historical structures that have survived from the past to the present and their sustainability; It is possible with education, knowledge and ongoing care. Historical buildings have been damaged over time due to natural and artificial reasons. However, thanks to the craftsmanship of the period in which they were built, they have managed to reach the present day. It is very important to examine the current conditions of these structures, to determine the damage, to choose the most appropriate technique for repair and strengthening, and to make the necessary intervention in a timely manner.

In this study, the Historical İplikçi Mosque in Konya was modeled with the finite element model in the SAP 2000 program. On the model, earthquake resistant design rules and calculation methods were compared according to the Regulation on Buildings to be Constructed in Earthquake Zones (06/03/2007) and Turkey Building Earthquake Regulation (18/03/2018). As a result of the study, it was seen that the calculation methods used with TBDY 2018 and the rules to be followed have changed and new building types were added. As a result of the analyzes obtained from the examined structure, it was seen that the structure did not meet the DBYBHY 2007 principles, but the TBDY 2018 principles.

Keywords: Code, Comparison, Earthquake, Historical Buildings, Masonry

1. INTRODUCTION

Historical buildings; are the structures that human beings have built for different purposes from past to present, that we need to protect today and that we are responsible for transferring to other generations. To such structures; mosques, madrasas, churches, synagogues, palaces, schools, hospitals, administrative buildings, water structures, military barracks, fortifications and towers can be given as examples [1].

Historical buildings are artifacts that have been built from the natural materials of the region they are located in, have different functional properties, and have survived from the time they were built to the present day. Investigations should be carried out in the buildings in order to maintain and protect the historical buildings. According to the damage assessments obtained as a result of the examinations, it is necessary to select the appropriate repair and strengthening techniques.

Different studies have been carried out in the literature on issues such as the repair and strengthening of historical buildings and their behavior under the influence of earthquakes. In his study on the bearing systems of masonry structures, the types of materials used, the examination of earthquake safety, the repair and strengthening of historical buildings, Kara [2] conducted a study on the examples of the practices made on these issues and the repair and strengthening methods that can be applied currently. Aköz [3] worked on the repair and strengthening of historical masonry structures and modeled a historical masonry structure in three dimensions and made static and dynamic analyses on the model. He focused

on the need to determine the earthquake safety of the structure and strengthen it and the strengthening methods. Döndüren et al. [4] in their studies, they discussed in detail the types of damage seen in historical buildings and argued that static problems and new methods should be developed by adhering to the original, except for the cleaning and repair works of historical buildings. Tetik [5] created the finite element model of the Seyh Süleyman Masjid in the Historical Peninsula of Istanbul. By examining the condition of the structure under its own weight, vertical loads and earthquake loads; static, dynamic and time history load analyzes were performed. Similarly, in her study, Chamaky [6] created models of the historical Çinili Police Station, Fatih Primary School and Sirkeci Kredi Han buildings in Istanbul using the finite element method and analyzed them with linear methods. In a different study, Türker [7] examined the Istanbul University Faculty of Pharmacy building to investigate the causes of damage to historical buildings. He set up an Excel-based program for the earthquake analysis of the building. Firat et al. [8] interpreted the damages in the Hacı Yusuf Taş Mosque, which was affected by an earthquake in 2020, near the Sivrice District of Elazığ. The current state of the building and the solution proposals were modeled with the finite element model and analyzed. Isik and Halefoğlu [9] carried out a structural analysis of Hoca Ahmet Mosque in Diyarbakır. As a result of the examination, they offered suggestions that could be useful for repair and strengthening works for the existing structural problems they identified. Firat and Kayabaşı [10] investigated the effect of the tie-rod system on the behavior of the stone arch in their study. They tested the repaired belt with one reference without tie-rod system and six tie-rod systems under vertical loading. They also analyzed the samples in a computer program called LUSAS [11]. They compared the experimental results with the results obtained from the program. In a different study, Nuhoğlu et al. [12] examined the structural problems in the eastern fortifications of the Ayasuluk Castle in Izmir, determined the repair and strengthening methods and implemented them. Doğan [13] determined the structural problems of Beyzade Efendi Mansion in Elazığ and suggested solutions. Fırat et al. [14] examined the method of strengthening damaged dome building forms with clamping. In their study, they compared the experimental results of the reference dome and the reinforced dome. They concluded that the clamping method, which is widely used in dome reinforcement, did not increase the bearing capacity of the dome.

With the change of earthquake regulations in our country, new and old earthquake regulations have started to be considered together. Keskin et al. [15] studies, they examined the 2007 Regulation on Buildings to be Constructed in Earthquake Zones (DBYBHY) [16] and the Turkish Building Earthquake Regulation (TBDY) [17] which entered into force on 18 March 2018 for the province of Kırklareli. Using the Elastic Design Spectra in the 2007 earthquake regulation and the 2018 earthquake regulation, they obtained and compared the Horizontal Elastic Design Spectra for two different soil classes. According to the 2007 and 2018 earthquake regulations, they calculated the earthquake analysis of a 4-storey building in different ground classes using the ETABS [18] program and compared the results. Similarly, Başaran [19] calculated and evaluated the equivalent earthquake loads on 5 and 10 storey reinforced concrete frame models for Afyonkarahisar Center. In another study, Nemutlu [20] compared the 2007 and 2018 Turkish earthquake regulations and examined the innovations introduced and analyzed 3 different reinforced concrete structures and showed the differences between the regulations on the calculation. In their study, Özmen and Sayın [21] analyzed a five-storey reinforced concrete building using the SAP2000 [22] package program according to the 2007 and 2018 earthquake regulations using the Equivalent Earthquake Load Method. They concluded that the results obtained from the 2018 earthquake regulation were more reliable and realistic. Baran et al. [23] analyzed a 2-storey masonry building in StatiCAD-Masonry [24] and SAP2000 package programs. They used the 2007 and 2018 Turkey Building Earthquake regulations in the analysis. They compared the base cutting forces obtained as a result of the analysis for both regulations. They also compared the results they obtained from the two different package programs they used. In a different study, Çetinkaya [25] examined the reinforced concrete school building in Bilecik according to the 2007 and 2018 earthquake regulations. He proposed reinforcement for the structure and concluded that the reinforcement and the structure met the criteria for the life safety performance level.

In this study; The Historical Iplikçi Mosque in Konya was modeled in the SAP2000 V20.2.0 program. The sections of the DBYBHY 2007 regulation and the TBDY 2018 regulation on the design rules and calculation methods of masonry buildings were compared on the building model.

2. MATERIAL AND METHODS

In the study, the Iplikçi Mosque, which was built in Konya province at the beginning of the 13th century, was examined. The survey and restoration information of the building was obtained from the Konya Regional Directorate of the General Directorate of Foundations. The mosque examined was modeled in three dimensions with the help of SAP2000 V20.2.0 finite element program. On the model, analyzes were made according to the Regulation on Buildings to be Constructed in Earthquake Zones (06/03/2007) and the Turkish Building Earthquake Regulation (18/03/2018). In this section, information about Iplikçi Mosque is given. The model of the structure in SAP2000 V20.2.0 program and the 2007 and 2018 Turkish earthquake regulations were explained.

2.1. Iplikçi Mosque

There is no certainty about the construction date of the Historical Iplikçi Mosque in Konya. According to the researches, the first construction date of the Iplikçi Mosque, known as Ebu'l-Fazl Masjid and later also known as Ahmet Bey Mosque, dates back to the beginning of the 13th century. According to the repair inscription found in the mosque, the structure was repaired and renovated in H733/M1332 by Samurcu Mesud Zade Hacı Ebubekir, who is also claimed to be a descendant of Iplikçi, during the Karamanoğulları period (26).

Mosque; it consists of 32 column, 44 arches, 4 domes and 32 strut elements. The external appearance of the mosque, which has been renovated and taken its current form, is misleading compared to its former form. In Figure 1 and Figure 2, external images of the old and new state of the building are given. In Figure 3, there are images of its current state.



Figure 1. North side of Iplikçi Mosque



Figure 2. South side of Iplikçi Mosque



Figure 3. Images from the current state of Iplikçi Mosque

2.2. Modeling in SAP2000 program

Considering the survey of the building given in Figure 4, the wall thickness was taken as 1.07 m in the modeling. The dome of the heating room on the south side of the mosque, which has 4 domes in total, has a thickness of 76 cm. The thickness of the remaining 3 domes is 50 cm. While the building was being repaired in the 1940s, the domes were surrounded by walls. The top of the mosque is filled with a prism 8 meters wide and 4 meters high. Since the domes are in a rectangular prism, they are not visible when looking at the structure.

Brick material is defined for walls and domes, stone material for column and arches, and wood material for braces. The properties of the materials are given in Table 1. In the model (Figure 5), column and arches from the bearing elements of the structure are defined as frames, and other bearing elements are defined as shells. 17332 nodes were used in the modeled structure. A total of 15057 shells were created. In the model, 359 fixed bearings are defined at the points transferred to the ground.

Table 1. Properties of materials used in building					
Eleman Tipi	Elastisite Modülü E (kN/m³)	Özgül ağırlık(kN/m³)	Kütle(t/m³)	Poisson Oranı	
Taş (harç ile)	3500000(3500 MPa)	24	2,45	0,2	
Tuğla	3000000(3000 MPa)	0,0177	0,0018	0,2	
Ahşap	12500000(12500 MPa)	6	0,6	0,001	
Kaplama	13000000(1300000 MPa)	2,2	0,22	0,16	



Figure 4. İplikçi mosque survey



Figure 5. Structural modeling of the Iplikçi Mosque

On the prepared structure model, two separate loads with fixed loads and earthquake loads are defined. Earthquake loads were applied in both directions, x and y (EQx and EQy). Calculations in earthquake strength were made according to the mode superposition method.

In order to easily evaluate the results, G, G±Ex and G±Ey load combinations were prepared by taking into account G (constant loads), EQx and EQy (Earthquake loads).
Finite element analysis method was used to determine the structural performance of the Iplikçi Mosque. After the analysis, the tensile or compressive stresses and shear stresses generated for the DBYBHY 2007 regulation according to the local axis of each Shell element provide information about the strength of the structure. The tensile or compressive forces and shear forces that occur for the TBDY 2018 regulation provide information about the strength of the structure.

According to the format of the SAP 2000 program, in the analysis made according to the DBYBHY 2007 regulation, tensile or pressure stresses are defined as S11 for x direction and S22 for y direction, and shear stresses are defined as S12.

In the analysis made according to the TBDY 2018 regulation, the tensile or pressure forces are defined as F11 for the x direction and F22 for the y direction, and the shear forces are defined as F12.

Interpreting the results obtained from structural analyzes made using the finite element method in historical buildings is different from interpreting the calculation results of the structures produced today. It is quite complicated to determine the material properties and bearing capacities of building elements, especially since it is very difficult to take samples from historical buildings and test them in our country.

The properties of the materials used for the calculations in the Iplikçi Mosque were determined by using both the correlations proposed in the international literature and the studies of previously built structures similar to the work examined.

2.3. Turkish Earthquake Code (DBYBHY - 2007)

Parameters used in the calculation of earthquake forces that will affect the structures:

- A0 (Earthquake Zone Coefficient) = 0,1 (4th Zone)
- If the soil class is not foreseen, S(T) = 2.5 is taken in accordance with DBYBHY.
- I (Building Importance Coefficient) = 1,0
- R (Carrier System Behavior Coefficient) = 2
- Local Soil Class = Z3

Stress calculation was made for the structure. Tensile, pressure and shear safety tensile values were found.

2.4. Turkish Earthquake Code (TBDY – 2018)

The parameters used in the calculation of earthquake forces that will affect the structures according to TBDY 2018 are:

- I (Building Importance Coefficient) = 1,2
- BKS (Building Use Class) = 2
- R (Carrier System Behavior Coefficient) = 2,5
- D (Strength Excess Coefficient) = 1,5
- BYS (Building Height Class) = 8
- DTS (Earthquake Design Class) = 3
- Earthquake Ground Motion Level = DD2
- Local Soil Class = ZD

Map spectral acceleration coefficients, local ground effect coefficients and periods to be used in the calculations (Table 2); For the x = 37.871906, y = 32.496726 coordinates where the structure is located, it was obtained from the Earthquake Hazard Maps at <u>https://tdth.afad.gov.tr</u>.

able 2. Map spectral acceleration coefficients, local ground effect coefficients and	u perioù miorn
Short period map spectral acceleration coefficient (Ss)	0.306
Map spectral acceleration coefficient for a 1.0 second period (S1)	0.073
Short period design spectral acceleration coefficient (SDS)	0.476
Design spectral acceleration coefficient for a 1.0 second period (S_{D1})	0.175
Transition period to the constant displacement region in the horizontal	6
elastic design spectrum (TL)	
Local ground effect coefficient for 1.0 second period (F1)	2.400
Local ground effect coefficient for the short period region (Fs)	1.555
Spectrum corner period (TB)	0.368

Table 2. Map spectral acceleration coefficients, local ground effect coefficients and period information

The calculation was made according to the Bearing Power Method for the structure. With the calculation of the vertical load design strength of the wall, the design shearing force strength of the wall was calculated.

3. RESULTS and DISCUSSIONS

In this study, a structure with a masonry carrier system used as a historical mosque in Konya province at the coordinates x = 37.871906, y = 32.496726 was analyzed according to DBYBHY 2007 and TBDY 2018. The differences between the calculation results and the regulations are explained.

3.1. Calculation Results According to 2007 Earthquake Code

As a result of the calculations made according to DBYBHY 2007, the pressure safety stress, tensile safety stress and shear safety stress values of the Historical Yarn Mosque were obtained (Table 3).

Table 5. Safety stresses of brick wall				
Malzeme Tipi	Basınç Emniyet Gerilmesi (MPa)	Çekme Emniyet Gerilmesi (MPa)	Kayma Emniyet Gerilmesi (MPa)	
Tuğla	1.0	0.9	0.373	

High stresses were obtained in the finite element model created using the SAP2000 program of the structure (Figure 6). These stresses exceeded the safety stresses calculated in the regulation. The 2007 earthquake regulation did not meet the boundary requirements.

Although high stresses were obtained as a result of the structural analysis, large and risky cracks were not found when the door and window gaps and wall junction zones, which are critical areas for masonry structures, were examined. In this case, it can be said that the structure retains its stability.



Figure 6. Stress distributions in load combinations for DBYBHY 2007

3.2. Calculation Results According to 2018 Earthquake Code

From the calculations made according to TBDY 2018, the vertical load design strengths and design shear force strengths of the Historical Iplikçi Mosque were obtained. As stated in the regulation, these calculated design strengths are above the design force and design shear force values (Table 4). This suggests that the accounts meet the principles of TBDY 2018. It was also observed that the forces obtained in the finite element model created using the SAP2000 program of the structure (Figure 7) did not exceed the forces calculated in the regulation.

Malzeme Tipi	Düşey Yük Tasarım Dayanımı (Nrd)(ton)	Düşey I Etkiye Kuvvet	Doğrultuda n Tasarım i (Ned)(ton)	Kesme K Dayanım V _{Rdy}) ((ton)	Tasarım Kuvvet V _{Edy})	i Kesme i (V _{Edx} - (ton)	
Tuğla	48608	3	229.4	631.6	350	73.9	79.4	
F11 G+EX Grafiği		720. 660. 540. 480. 300. 240. 180. 120. 60. 0. -60.	F11 G+EY Graf	igi vite				900. 825. 750. 675. 525. 450. 375. 300. 225. 150. 75. 0. -75.
max=718.4 ton			max=945 ton	1	1			
F22 G+EX Grafiği max=887 ton		935, 850, 765, 595, 510, 425, 340, 255, 170, 85, 0, -85, -170,	F22 G+EY Gra max=1101.35 to	figi fin	·		7	1,21 1,1 0,99 0,88 0,77 0,66 0,55 0,44 0,33 0,22 0,11 0, -0,11 -0,22
		440. 400. 360. 280. 240. 200. 160. 120. 80. 40. -40.						440, 400, 360, 320, 280, 240, 200, 160, 120, 80, 40, 0, -40, -80
F12 G+EX Grafiği max=440.45 ton	en.	-80.	F12 G+EY Gr max=452 ton	afiği				-60,

Table 4. Design strength and design forces of the brick wall

Figure 7. Force distributions in load combinations for TBDY 2018

3.3. Results of Mod Combination Method

The sum of the effective masses calculated for the mode superposition method applied according to DBYBHY 2007 within the framework of earthquake-resistant building design should not be less than 90% of the total mass of the building. In TBDY 2018, it was updated that the sum of the calculated effective masses should not be less than 95% of the total mass of the building.

As a result of the modal analysis of İplikçi Mosque in the SAP2000 program, 60 modes were defined

and free vibration periods were obtained. The mass participation rates for DBYBHY 2007 and TBDY 2018 and the ratios of effective masses to the total mass of buildings for x and y directions are given in Table 5 and Table 6, respectively.

Table 5. Mass participation rates for DBYBHY 2007 and TBDY 2018 regulations					
К	KÜTLE KATILIM ORANLARI				
	X YÖNÜ	Y YÖNÜ			
DBYBHY 2007	0,71 (MODE 5)	0,76 (MODE 3)			
TBDY 2018	0,64 (MODE 8)	0,74 (MODE 3)			

Table 6. The ratio of the sum of the effective masses to the total mass of the building	for the DBYBHY
2007 and TBDY 2018 regulations (%)	

ETKİN KÜTLELERİN TOPLAMININ BİNA TOPLAM KÜTLESİNE ORANI (%)				
	X YÖNÜ	Y YÖNÜ		
DBYBHY 2007	%86	%85		
TBDY 2018	%74	%83		

When Table 6 is examined; In the values taken from TBDY 2018, it was seen that the ratio of the sum of the effective masses to the total mass of the building was below the 95% value given in the regulation and came very close to this value which was 90% in DBYBHY 2007.

3.4. Displacement Results

In both regulations, both in the control of constant load (Figure 8) and in the displacement control according to combinations (Figure 9), the most displacement occurred in the upper floor (roof).



Figure 8. Maximum displacement under G loading (mm) for DBYBHY 2007 and TBDY 2018



Figure 9. Maximum displacement under G+EX G+EY loading (mm) for DBYBHY 2007 and TBDY 2018

3.5. Differences Between DBYBHY 2007 and TBDY 2018 Regulations and Discussion

As a result of the studies, it was seen that there were significant changes between DBYBHY 2007 and TBDY 2018 regulations. The changes concerning the section related to the design rules of masonry buildings and the results obtained from the study are briefly summarized below.

- While there was only one type of masonry building without reinforcement in the 2007 earthquake regulation, 3 new masonry building types were added in addition to the unreinforced masonry building type in the 2018 earthquake regulation. These; reinforced masonry building, surrounded masonry building and reinforced panel system building. In TBDY 2018, calculation methods and boundary conditions of new masonry building types were added. With TBDY 2018, it is possible to construct masonry buildings with more floors than in previous years.
- In DBYBHY 2007, the calculation method of safety stresses is used while making the investigations. With TBDY 2018, the calculation method of safety stresses was abandoned and the method of calculation of bearing capacity began to be used.
- For the mode coupling method applied according to DBYBHY 2007, the ratio of the sum of the effective masses to the total mass of the building should not be less than 90%, while this value was changed to 95% in TBDY 2018.

- In TBDY 2018, the coordinates of the structure are entered on the earthquake hazard map of Turkey and the earthquake parameters are determined. In DBYBHY 2007, earthquake parameters were calculated manually from the relevant section.
- While the carrier system behavior coefficient is taken as 2 in masonry structures for DBYBHY 2007, the carrier system behavior coefficient is taken as 2.5 in TBDY 2018.
- According to DBYBHY 2007, the modulus of elasticity was calculated as 200*fd (fd: masonry wall design compressive strength). In TBDY 2018, it is calculated as 750 * fk (fk: masonry wall characteristic compressive strength).
- According to DBYBHY 2007, the investigations made using the safety stresses calculation method and the stresses obtained from the finite element model created using the SAP2000 program of the structure were compared. These stresses exceeded the safety stresses calculated in the regulation and did not meet the principles of DBYBHY 2007.
- According to TBDY 2018, the investigations made using the bearing power calculation method and the forces obtained from the finite element model created using the SAP2000 program of the structure were compared. It was observed that these forces did not exceed the strengths calculated in the regulation and met the principles of TBDY 2018.
- As a result of the analysis, it was seen that the ratio of the sum of the effective masses to the total mass of the building was very close to the value given in DBYBHY 2007 (90%), but it was below the value given in TBDY 2018 (95%).
- In both regulations, it was seen that the most displacement occurred in the upper floor (roof) in both constant load control and displacement control according to combinations.

It has become clear that the new calculation methods for masonry buildings are more detailed and comprehensive. However, there is no separate section in our 2018 earthquake regulation on the studies on historical buildings. While conducting studies on the subject, it is necessary to make some acceptances. An additional section should be established in our earthquake regulation on the calculation methods of historical buildings.

Ackowledgement

We would like to thank the Konya Regional Directorate of the General Directorate of Foundations of the Republic of Turkey for their contributions in reaching the survey and restoration information of the historical work examined in the study.

REFERENCES

- [1] A. Bayraktar, *Analytical Investigation of Historical Buildings and Seismic Strengthening Methods*, Beta Publishing Distribution, İstanbul, 2006.
- [2] H. G. Kara, "Structural systems, safety investigation, repair and strengthening of historical masonry buildings", Master Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 2009.
- [3] A. H. Aköz, "Repair and strengthening of historical masonry buildings under the effect of earthquake", Master Thesis, Istanbul Technical University, İstanbul, 2008.
- [4] M. S. Döndüren, Ö. Şişik, and A. Demiröz, "Types of damage in historical buildings", *Selcuk University Journal of Social and Technical Research*, vol. 13, pp. 45-58, 2017.
- [5] T. Tetik, Earthquake performance and reinforcement techniques of historical masonry buildings, Master Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, 2015.
- [6] R. Y. Chamaky, "Earthquake analysis of historical masonry buildings and appropriate strengthening techniques", Master Thesis, Yıldız Technical University, Istanbul, 2014.
- [7] B. Türker, "Investigation of structural behavior of historical masonry buildings", Master Thesis, Istanbul University Istanbul, 2010.

- [8] F. K. Fırat, A. Ural, and M. E. Kara, "January 24, 2020 sivrice earthquake and the response of the masonry Haci Yusuf Tas (New) Mosque", *Earthquakes and Structures*, vol. 22, no. 42, pp. 331-343, 2022a.
- [9] N. Işık, and F. M. Halefoğlu, "Detection of structural problems in historical buildings with nondestructive methods; Georadar (GPR) measurements and evaluation in Diyarbakir Hodja Ahmet (Ayn Minaret) Mosque", Dicle University Engineering Faculty Journal of Engineering, vol. 12, no. 5, pp. 829-840, 2021.
- [10] F. K. Fırat, and M. S. Kayabaşı, "Investigation of tie-rod connection types on stone masonry arches", *Structures*, vol. 45, pp. 2185-2197, 2022.
- [11] LUSAS, Infrastructure Design Software, UK.
- [12] A. Nuhoğlu, E. Ercan, and F. Baranaydın, "Structural behavioral analysis and repair/ strengthening studies of ayasuluk castle fortification walls", *Turkish Academy of Sciences Journal of Cultural Inventory*, pp. 37-61, 2021.
- [13] E. Doğan, "A study on the structural problems of Elazig Beyzade Efendi Mansion", *Journal of Harput Studies*, vol. 18, no. 9, pp. 1-14, Sep., 2022.
- [14] F. K. Fırat, Ş. Tanrıverdi, A. Ural, and M. E. Kara, "Strengthening of dome type structures with clamps", Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, vol. 11, no. 2, pp. 326-334, 2022b.
- [15] E. Keskin, and K. B. Bozdoğan, "Evaluation of 2007 and 2018 turkish earthquake code for the province of Kirklareli", *Kirklareli University Journal of Engineering and Science*, vol. 4, no. 1, pp. 74-90, 2018.
- [16] DBYBHY, 2007, Regulation on Buildings to be Constructed in Earthquake Zones, Ministry of Environment and Urbanization, Ankara.
- [17] TBDY 2018, Turkey Building Earthquake Regulation, Disaster and Emergency Management Presidency-Earthquake Department, Ankara.
- [18] ETABS, Building Analysis And Design, CA.
- [19] V. Başaran, "Evaluation of seismic loads for Afyonkarahisar according to Turkish Seismic Code TSC2019)", Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 1028-1035, 2018.
- [20] Ö. F. Nemutlu, "Comparison of 2007-2018 Turkish Earthquake Codes and American Earthquake Codes in Terms of Earthquake Calculations", Master Thesis, Istanbul Technical University, İstanbul, 2019.
- [21] A. Özmen, and E. Sayın, "Comparison of equivalent earthquake loads according to TDY-2007 and TBDY-2018 earthquake regulations of a multi-storey reinforced concrete building under earthquake effect", Osmaniye Korkut Ata University Journal of Natural and Applied Sciences, vol. 4, no. 2, pp. 124-133, 2021.
- [22] SAP2000 V20.2.0, Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures. Computers and Structures, Inc, Berkeley, CA, 2017.
- [23] B. Baran, K. B. Bozdoğan, and İ. İ. Atabey, "Comparison of masonry building constructed from different wall materials according to 2007 and 2018 Turkish Earthquake Codes", Journal of Engineering Sciences and Design, vol. 10, no. 3, pp. 1066-1075, 2022.
- [24] Staticad-Masonry, Structural Analys, Turkey.
- [25] Ö. Çetinkaya, "Retrofit of a school building according to 2007-2018 Turkish Earthquake Regulations", Master Thesis, Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik, 2022.
- [26] Republic Of Turkey General Directorate Of Foundations Konya Regional Directorate, Konya.
- [27] AFAD, "Turkey Building Earthquake Regulation", [Online]. Available: <u>https://www.afad.gov.tr/turkiye-bina-deprem-yonetmeligi</u>, [Accessed: Dec. 29, 2020].



PREDICTION OF CERVICAL DISC HERNIATION DISEASE UTILIZING TRAPEZIUS SEMG SIGNALS WITH MACHINE LEARNING TECHNIQUES BASED ON FREQUENCY DOMAIN FEATURE EXTRACTION

¹Burak YILMAZ^(D), ^{2*}Güzin ÖZMEN^(D), ³Ahmet Hakan EKMEKÇİ

¹ KTO Karatay University, Electrical-Electronics Engineering Department, Konya, TÜRKİYE
 ²Selcuk University, Technology Faculty, Biomedical Engineering Department, Konya, TÜRKİYE
 ³ Selcuk University, Medicine Faculty, Neurology Department, Konya, TÜRKİYE
 ¹burak.yilmaz@karatay.edu.tr, ²gozmen@selcuk.edu.tr, ³hakanekmekci@selcuk.edu.tr

Highlights

- We proposed a method using machine learning to investigate the classification and prediction of CDH disease with resting-state trapezius sEMG.
- We used Savitsky-Golay and Butterworth filters for denoising and then obtained PSD-based features using the Burg method.
- The best classification accuracy of 91.6% was achieved with 10-fold cross-validation using the Tree classifier, moreover, Neural Networks and CN2 rule inducer provided 87.5% classification accuracy for the prediction of CDH disease.



PREDICTION OF CERVICAL DISC HERNIATION DISEASE UTILIZING TRAPEZIUS sEMG SIGNALS WITH MACHINE LEARNING TECHNIQUES BASED ON FREQUENCY DOMAIN FEATURE EXTRACTION

¹Burak YILMAZ^(D), ^{2*}Güzin ÖZMEN^(D), ³Ahmet Hakan EKMEKÇI^(D)

¹ KTO Karatay University, Electrical-Electronics Engineering Department, Konya, TÜRKİYE
 ²Selcuk University, Technology Faculty, Biomedical Engineering Department, Konya, TÜRKİYE
 ³ Selcuk University, Medicine Faculty, Neurology Department, Konya, TÜRKİYE
 ¹burak.yilmaz@karatay.edu.tr, ²gozmen@selcuk.edu.tr, ³hakanekmekci@selcuk.edu.tr

(Received: 07.10.2022; Accepted in Revised Form: 19.12.2022)

ABSTRACT: Cervical disk herniation (CDH) is a disease that affects the quality of life of many people due to the neck pain it causes. The aim of this study was to develop an automatic prediction system to aid in diagnosis by evaluating the change in the surface electrical activity of the trapezius muscle in SDH disease in order to find an answer to the question: 'Can the surface electromyogram (sEMG) recorded from the trapezius muscle be an effective indicator for the diagnosis of SDH disease?'. To this end, a dataset will be created using preprocessing and feature extraction methods from sEMG signals from CDH patients and healthy individuals. In the first step, the Savitsky-Golay filter is used to denoise the sEMG signals and the dominant frequency signals between 20 and 150 Hz are included in the study using the Butterworth filter design. Twenty PSD-based features in the frequency domain were then obtained from the signals to which we applied the Burg method. Eleven of the most significant features based on the information gain, gain ratio, and Gini values are selected to be submitted to the classifiers. 80% of all new feature areas are used for classification and the rest for prediction. The best classification accuracy of 91.6% was obtained with the Tree classifier using 10-fold cross-validation for classification. In addition, neural networks and CN2 rule inducer provided 87.5% classification accuracy for prediction using 20% of the remaining data that the classifiers had not seen before. The experimental results demonstrate that the trapezius muscle has different surface electrical activity in CDH patients and healthy subjects and that the frequency domain characteristics of this activity are important for disease prediction.

Keywords: EMG, Machine Learning, Classification, Prediction, Frequency Domain

1. INTRODUCTION

Cervical disk herniation (CDH) is a condition that causes compression of the spinal cord or nerve roots between the C5-C6 and C6-C7 vertebrae. CDH usually causes pain radiating to the upper extremities and paresthesias felt on the skin [1-3]. CDH is usually characterized by arm and neck pain, and neurologists make the diagnosis through physical examination, imaging, and electrodiagnostic tests such as electromyography (EMG). MRI is the main diagnostic method that guides physicians in diagnosing CDH, but it is a time-consuming and expensive procedure. On the other hand, the needle EMG method is also used, which provides a faster solution in clinical evaluation. However, needle EMG is invasive and may cause various complications. The alternative to needle EMG is surface EMG (sEMG), which allows the measurement of total muscle action potentials on the surface. It is not preferred in clinical assessments because it involves superficial muscles. In this study, we aimed to investigate the usability of sEMG in diagnosing CDH patients for clinical and biomedical applications. Based on extensive anatomical preparations, [4] have described more than twenty muscles involved in head and neck movements. Unfortunately, few of them are superficial enough to be reached with surface electrodes [5]. Following the physical model developed for the neck muscles, Bernhardt et al. [6] identified four muscles in the cervical spine that can be reached by superficial EMG: Semispinalis Capitis, Splenius Capitis, Sternocleidomastoid (SCM), and Trapezius. The trapezius muscle is the most painful muscle due to acute trauma and occupational myalgias. Many studies have emphasized that the trapezius muscle does not contribute to head and neck movements, but when the arms are actively used, this muscle should be examined to monitor the electrical activity of the adjacent muscles [7].

The electromyogram is defined as the graphical representation of the electrical activity that occurs in resting and contracted muscles and provides important information for the diagnosis of abnormalities in both muscles and the motor system [8]. The sEMG is a complex, unstable, and noisy signal. The amplitude of the sEMG signal is arbitrary and can usually be expressed as a Gaussian distribution. The amplitude range of the signal is 0-10 mV (peak-to-peak) or 0-1.5 mV (RMS). The useful energy of the sEMG is in the frequency range of 0-500 Hz, but the dominant energy is in the range of 50-150 Hz [9].

In the literature, some studies classify neuromuscular diseases [10-12], detect muscle activity [13-14], muscle fatigue [15-16], and classification of low back pain [17-18] and neck pain [19-21] using sEMG. To our knowledge, no study classifies CDH patients using surface EMG, except [22]. In addition, some studies draw attention to the upper trapezius muscle during semi-static activities that require repetitive movements of the upper extremity. This is the most common area for muscle pain. This pain sometimes indicates chronic trapezius myalgia or tension neck syndrome [7].

In studies of sEMG or EMG signals, there are several approaches to generating features from the signals. Generally, three approaches are preferred for feature generation, namely time domain, frequency domain, and time-frequency representation [23-24]. Phinyomark et al. evaluated 37 different features based on both time-domain and frequency-domain, and found that the frequency-domain features of sEMG signals are not more redundant than those of the time-domain [23]. However, in the experimental setup of this study, a specific movement was not repeated, but the corresponding muscle performed the task of maintaining a specific weight at a constant height. Therefore, using the frequency domain approach, it was easier to detect the presence of a pain signal associated with the frequency of the signal generated in the muscle in the frequency domain.

This study attempted to develop a predictive model for the detection of CDH disease by analyzing trapezius muscle sEMG data. For this purpose, the study focused on frequency domain features of trapezius muscle signals. The features were tested using classification algorithms. After the designed experimental study, it was found that a clear classification can be made between healthy subjects and subjects suffered from cervical hernia, and it is also possible to develop predictive models for the disease using these models.

There are many current studies in the literature for feature extraction and classification from EMG signals. These methods differ according to experiment design and selected muscle group and, high classification accuracy is obtained. EMG classifications are used in the automated diagnostic system for neuromuscular diseases or used for prosthetic device control. Although needle electrodes are preferred in neuromuscular disorders, there are also few studies using surface EMG. Some of them are presented in Table 1.

		Authors	EMG	Feature Extraction	Machine	Best Accuracy
			sample		Learning Method	
		Katsis et al. [25]	Normal,	Raw EMG signals	SVM	93%
			Neuropathic			95%
			Myopathic			92%
		Rasheed et al. [26]		Time domain	Adaptive fuzzy k-	93.5%
	Û			Wavelet domain	NN	92.6%
	Ň	Gokgoz and Subasi	Normal,	Music	k-NN, SVM, ANN	82.11%
	(iE	[27]	ALS,			92.55%
	4G		Myopathic			90.02%
ers	EN	Kamali et al. [28]	Normal,	Time domain	SVM	97%
rd	ılar		Neuropathic	Time-Frequency		
isc	scu		Myopathic	domain		
μ	nm	Artameeyanant et	Healthy,	Statistical feature	MLPNN, SVM, k-	98.36%
ula	ıtra	al.[29]	Myopathic,	extraction	NN	99.17%
nsc	In		Amyotrophi			
uno			с			
eur		Hazarika et al. [30]	Normal,	Discrete Wavelet	k-NN	98.8%
Ž			ALS,	Transform-Canonical		
			Myopathic	correlation analysis		
		Istenič et al. [31]	Muscular	Multiscale entropy	SVM	81.5%
	G		Neuronal			
	G EM		Disorder			
	J M	Barmpakos et al.	Neuropathy	Discrete Wavelet	Random Forest,	88.8%
	urfa (sł	[32]	Myopathy	Transform,	K-NN	
	Su			Power spectral		
				density		
Isc	Ð	Ozmen and	Normal	Short Time Fourier	ANN	99%
Ð.	EM G)	Ekmekci [22]	CDH	Transform		
ical	J. M		(Fatigue-	Discrete Wavelet		
ervi-	ırfa (sł		state)	Transform		
Ŭ	Su			AR model		

Table 1. Similar studies in the literature

2. DATA SET AND DATA PREPARATION

The experimental design used in this study focused on the trapezius muscle and the relationship between the muscle and CDH disease. The trapezius muscle is defined by Moore et al. [33] as a "broad, apartment, superficial muscle extending from the cervical to the thoracic region on the posterior aspect of the neck and trunk" Because the trapezius muscle is superficial and directly connected to the cervical region, this study focused on the basic question: "Can the presence of CDH be detected from the sEMG signals of the upper trapezius muscle?" To answer this question, an experimental study was performed. Detailed information about the experimental study can be found in [22], but the present study only addresses the resting state data recorded from the trapezius muscle. In this prospective study, sEMG data were collected by a physician and a technician in the neurology department of Selcuk College Faculty of Medicine using surface electrodes and a Neoropack Nihon Kohden EMG device in 10 CDH patients (8 males and 2 females, aged 17 to 67 years) and 10 healthy volunteers (4 males and 6 females, aged 19 to 48 years). Participants were selected among right-handed individuals. This study was approved by the local ethics committee (decision no: 2010/33). Each participant completed the informed consent form. For the rest condition, participants were asked to wait 20 seconds without moving the right arm in an upright sitting position. The aim is to investigate the electrical activity of the trapezius muscle while standing in its natural position and to determine the difference in CDH patients.

In this study the raw data were recorded as unsigned 16-bit integers with a sampling frequency of 10 kHz. Thus, each data packet contained 200,000 samples per subject. The data were then segmented into 20 equal parts each. The goal of this division is to take samples of each signal with a duration of 1 second. Figure 1 presents the general flowchart of the entire process. According to the Figure 1 some preprocessing steps are applied to the segmented EMG data. Then the features used for ranking were extracted from the frequency domain features of the pre-processed data. After the ranking test, the most informative features are selected. Finally, the classification algorithms are trained and tested with the cross-validation test and the results are compared. The tested classifiers are Random Forest, Naive Bayes, CN2 rule inducer, Tree, Support Vector Machine (SVM), Neural Networks.



Figure 1. General flowchart of the entire process

Figure 2 presents the pre-processing steps. The first step of preprocessing is to normalize the data in the range of [-1,1]. In general, normalization is not necessary when power spectrum analysis is applied to the sEMG signals [34], but in this study, the experiment consists of no motion, so the signal contains low-frequency components with a high DC basis. The DC base signal was different for each subject. Therefore, to make each signal comparable, it was appropriate to normalize each signal. To separate valuable information from the signal noise, the second step was to apply the Savitsky-Golay (S-G) filter to the signal to smooth the data. Due to the nature of the Savitsky-Golay filter [35], the informative components of the data are preserved while the strong noise is suppressed. In this study, an 8th-order S-G filter with a width of 1023 frames is used.



Figure 2. Flowchart of the preprocessing

The next step of preprocessing was bandpass filtering. The structure of the signal was a regular sEMG signal, so the current value of the signal depended on previous values. For this reason, a recursive filtering technique was preferred. In this case, a Butterworth-type filter was the filter of choice (Pauk 2008). Since the data used in this study did not include motion and very low and high frequencies were not meaningful, the passband of the filter was chosen to be in the range of (20 - 150) Hz

The final step of preprocessing is feature extraction from the signal. To extract the features from the signal, Power Spectrum Density (PSD) analysis was applied to the signal using Burg's method [36], so that the features are based on the frequency domain characteristics. In this study, the data length was shortened by dividing the 20-second data into 1-second epochs. Since the FFT is not suitable for determining the PSD in non-stationary signals such as EMG and non-parametric methods such as the periodogram-based Welch method are not preferred because they provide high resolution at long data lengths. Parametric

spectral analysis methods such as the AR method are the most effective methods in analyzing PSD for short-time signals, and one of them, the Burg method, gives more stable results than the Yule-Walker and Cov methods [37]. Figure 3 shows the original and preprocessed EMG signal in each control's time and frequency domain.



Figure 3. (A) Original and preprocessed EMG in the time domain (B) Original and preprocessed EMG in the frequency domain

3. FEATURE EXTRACTION

The PSD approach provides detailed information about the power distributions of each frequency in the analyzed frequency window. Figure 4 shows the boxplot of the peak frequency values of the sEMG signal for both normal and patient subjects.



Figure 4. Box plot of the peak frequency distribution of the dataset

In Figure 4, class number 1 represents the subjects with CDH disease and 2 represents the normal subjects.

From the box plot data, it can be seen that there is a shift in peak frequency between healthy and CDH patients, while the PSD data provides more information. In this study, 19 different features were analyzed and selected as features for classification [38-39]. These features are listed in Table 2; the last, 20.

Feature	Description	Feature	Description
AF1	The frequency at which the PSD of	W1	Width of the dominant
	the sEMG signal is maximum		frequency.
AF2	The frequency at which the PSD of	W2	Width of second dominant
	the sEMG signal is the second		frequency
	maximum		
P1	The magnitude of Dominant	iqrF	The difference between the third
	Frequency F1		quartile and the first quartile
			range of PSD
P2	The magnitude of the Second	fF1	Number of peaks under
	Dominant Frequency F2		dominant frequency
QF1	Quality factor of F1 (QF=F1/wF2)	fF2	Number of peaks under the
			second dominant frequency
QF2	Quality factor of F2 (QF=F2/wF2)	varF	The variance of PSD of sEMG
			signal.
meaF	Mean of all peak values of PSD.	kurtF	Kurtosis of PSD
	Manage (all as a large large large large	-1 F	
mealf	Mean of all peak values under	SKEWF	Skewness of PSD
ат	dominant frequency.	15	
mea2F	Mean of all peak values under	medF	Median of all peak values of PSD
	second dominant frequency.		
Diag	Diagnosis feature (target)		

Table 2. Frequency Domain features used in this study.

The ranking values of the PSD-based features of the sEMG signal and the top 10 features are determined based on the information gain, gain ratio, and Gini values calculated previously. Table 3 shows the main features selected for classification. The most important features are highlighted in the table with a darker background. Information gain was chosen as the main ranking method in selecting the characteristics, and 0.25 was used as the threshold. The features that are below the threshold of 0.25 are rejected.

lable 3. Selected features					
	#	Info. gain	Gain ratio	Gini	
medF	1	0.5210	0.2605	0.2644	
iqrF	2	0.4521	0.2261	0.2425	
Mean	3	0.4505	0.2253	0.2459	
mea1F	4	0.4370	0.2185	0.2369	
meaF	5	0.4370	0.2185	0.2369	
varyF	6	0.4249	0.2124	0.2321	
P1	7	0.4197	0.2098	0.2300	
AF1	8	0.4197	0.2098	0.2300	
mea2F	9	0.4051	0.2025	0.2238	
fF1	10	0.2853	0.1561	0.1752	
QF1	11	0.1604	0.0802	0.1046	
P2	12	0.1266	0.0633	0.0826	
skewF	13	0.1220	0.0610	0.0815	
AF2	14	0.1097	0.0548	0.0729	
kurtF	15	0.1066	0.0533	0.0717	
W2	16	0.1058	0.0529	0.0701	
QF2	17	0.0863	0.0432	0.0572	
W1	18	0.0832	0.0416	0.0556	
fF2	19	0.0499	0.0250	0.0337	

Table ? Salastad fast

Statistical information of the most significant features is also represented in Table 4. The entire dataset has no missing values.

Table 4. Statistica	l information	of the features
---------------------	---------------	-----------------

Name	Center	Dispersion	Min	Max
fF1	-0.535	-0.816883	-1	1
mea2F	-1.17e-16	∞	-2.806e-16	2.806e-16
AF1	-0.61347	-0.720118	-1	1
P1	-0.671574	-0.592841	-1	1
varyF	-0.738759	-0.529157	-1	1
meaF	-0.475416	-1.17414	-1	1
mea1F	-0.475416	-1.17414	-1	1
Mean	-0.721069	-0.517747	-1	1
iqrF	-0.177202	-3.29478	-1	1
medF	-0.450080	-1.292014	-1	1

4. CLASSIFICATION AND PREDICTION

After turning the raw signals into a dataset, the dataset is separated into two parts. The first part consists of 80% of the entire data and is used to train the classifier algorithms. The second part which consists of 20% of the entire data is used for testing the classifiers after training. The classifiers which the dataset represented to are listed as Random Forest, Naive Bayes, CN2 rule inducer, Decision Tree, Support Vector Machine (SVM), and neural network algorithms [40-41]. During training, 10-fold cross-validation was applied to the classifiers. Classification algorithms require some predetermined parameters for the training process. Therefore, each classifier is developed with a specific architecture with its characteristics. Decision trees also called C4.5, use a divide-and-conquer algorithm to generate an initial tree. It requires a certain set S of cases. The dataset can be discrete or continuous [40]. Naïve Bayes is a supervised learning method that is very easy to construct. The method does not require complex parameters or schemes. It can be easily used with huge datasets [40]. Due to the nature of the algorithm, the Naive Bayes algorithm did not require extra parameters in this study. CN2 algorithm based on ID3 algorithm like the Decision Trees. According to the definition algorithm, "CN2 produces an ordered list of if-then rules" [41]. Random forest is a tree-based algorithm. The algorithm uses several tree predictors. Each tree is represented with a random vector which is independently taken from the same distribution in the forest. The algorithm has a generalization error limit. Equal tree affects the generalization error. Hence when the trees in the forest reach a result, they are voted for the most possible class [42]. SVM works on hyperplanes which are highor infinite-dimensional space [43]. It requires fewer samples to train, is sensitive to dimensionality, and is considered a very robust algorithm for classification tasks [40]. Neural networks or Artificial Neural Networks (ANN) algorithms are based on interconnected nodes of computation units that mimic real-life neurons. In the architectural design, layers are created by nodes and each node is connected to the previous and next layers with weight coefficients. Training the ANN means finding the proper weight value for each node that performs the classification tasks. The design parameters of each algorithm are explained in Table 5.

Table 5. Classifiers' Design parameters				
Decision Tree:	CN2 Rule Inducer:	Random Forest:		
Tree size: 7 nodes, 4 leaves	Rule ordering: unordered	Number of trees: 14		
Edge widths: Relative to parent	Covering algorithm: exclusive	Maximal number of		
Target class: None	Gamma: 0.7	considered		
Pruning: at least two instances in	Evaluation measure: Laplace	features: unlimited		
leaves, at least five instances in	Beam width: 6	Replicable training: No		
internal nodes, maximum depth 100	Minimum rule coverage: 2	Maximal tree		
Splitting: Stop splitting when the	Maximum rule length: 5	depth: unlimited		
majority reaches 100% (classification	Default alpha: 1.0	Stop splitting nodes with		
only)	Parent alpha: 1.0	maximum instances: 5		
Support Vector Machine	Neural Network	Naïve Bayes:		
SVM type: SVM, C=0.8, ε=0.1	Hidden layers: 20, 20 (2 hidden	The naive Bayes algorithm		
Kernel: Polynomial, (auto $x \cdot y + 0.0$) ^{3.5}	layers with 20 nodes each)	did not require extra		
Numerical tolerance: 0.001	Activation: tanh	parameters in this study		
Iteration limit: 100	Solver: Adam			
	Alpha: 0.0001			
	Max iterations: 200			
	Replicable training: True			

5. RESULTS and DISCUSSION

The classification algorithms are trained and tested with the Stratified 10-fold Cross validation test, the average over classes results is shown in Table 6. The metrics used to evaluate the models are listed as Area Under Curve (AUC), Classification Accuracy (CA), F1, Precision, and Recall [44].

Model	AUC	CA	F1	Precision	Recall
Random Forest	0,9643	0,9333	0,9334	0,9344	0,9333
Tree	0,9266	0,9333	0,9332	0,9340	0,9333
Neural Network	0,9568	0,9222	0,9223	0,9225	0,9222
AdaBoost	0,9107	0,9111	0,9111	0,9111	0,9111
SVM	0,9464	0,8889	0,8890	0,8926	0,8889
CN2 rule inducer	0,9501	0,8667	0,8655	0,8722	0,8667
Naive Bayes	0,9375	0,8667	0,8667	0,8667	0,8667

Table 6. Testing results of algorithms via 10-Fold cross-validation.

During the cross-validation, only 80% of the entire data set is used for both training and testing. The rest of the data was never represented to the classifiers until the training of the models finished. After the training, the rest of the data is presented to the trained classifiers, and predicted results are compared with the actual results. The prediction results of the classifiers are shown in Table 7.

Table 7. Frediction results of the classifiers					
Model	AUC	CA	F1	Precision	Recall
Neural Network	0.972	0.875	0.878	0.891	0.875
CN2 rule inducer	0.875	0.875	0.876	0.878	0.875
Naive Bayes	0.903	0.825	0.830	0.861	0.825
Tree	0.850	0.800	0.805	0.827	0.800
Random Forest	0.893	0.775	0.782	0.836	0.775
SVM	0.937	0.650	0.655	0.786	0.650

Table 7. Prediction results of the classifiers

Given Tables 6 and 7, the following can be said: the determined frequency characteristics are suitable for an unambiguous classification. Considerable success has been achieved. Considering that the signals are obtained while the studied muscle maintains a certain position and does not move, although the signal is stationary, it can be said that it contains classifiable frequency components. The most obvious reason for this result is that the peak frequency of the signals obtained from CDH patients is slightly shifted towards high frequencies.

When examining Table 6, the top 3 algorithms are Random Forest, Tree (decision tree), and Neural Network algorithms by classification accuracy. However, when examining Table 7, the top 3 algorithms are Neural Network, CN2 rule inducer, and Naive Bayes algorithms. This situation can be interpreted as follows: Random Forest and Tree algorithms are very similar; they are based on the same methods that include pruning steps. The neural network algorithm, on the other hand, is suitable for continuous data and no pruning is applied. Since the prediction data set has not yet participated in the training, tree-based algorithms can prune the branches that will process this data during modeling. In contrast, since artificial neural networks are more immune to this situation, they were more successful in the prediction experiment. However, the CN2 algorithm, whose basic logic is similar to tree-based algorithms, was also successful because it focuses on creating rules rather than branches. To understand the effects of feature selection, an additional experiment was also applied to the entire dataset without feature ranking. In this final experiment, all the features in Table 3 were used in the training and testing process. Table 8 shows the test results of the classifiers with all features.

Model	AUC	CA	F1	Precision	Recall
Tree	0,9289	0,9167	0,9142	0,9266	0,9167
Neural Network	0,9424	0,8833	0,8828	0,8828	0,8833
AdaBoost	0,8643	0,8833	0,8815	0,8846	0,8833
Random Forest	0,9360	0,8500	0,8456	0,8546	0,8500
Naive Bayes	0,9248	0,8500	0,8519	0,8656	0,8500
CN2 rule inducer	0,8314	0,8333	0,8239	0,8511	0,8333
SVM	0,6769	0,8167	0,8043	0,8386	0,8167

Table 8. Classification results with no feature selection

Classification using all features has shown a lower success rate than classification using selected features Although it is thought that a more detailed classification will be made when more features are used in classification, it seems that considering the features with low information gain negatively affects the success of the classification. When the overall results are evaluated, the most successful algorithms are tree-based algorithms. Two classification results can be given as examples. Figure 5 represents the decision tree result for the experiments and



Figure 5. Decision Tree result with the selected features

Table 9 represents the rules generated by the CN2 Rule Inducer algorithm.

	IF conditions	THEN class	Distribution	Probabilities [%]	Quality	Length
1	QF2≥-0.8524 AND ort2F≥-2.1015e-16	1	[13, 0]	93:7	0.933	2
2	iqrF≥-0.7337 AND skewF≥-0.7148 AND ort2F≥-1.7791-16	1	[22, 0]	96:4	0.958	3
3	ort2F≥-2.1031e-16 AND iqrF≤-0.9476 AND QF2≥- 0.9892 AND medF≥-0.9936	1	[5, 0]	86:14	0.857	4
4	medF≥-0.9937 AND medF≤-0.9925 AND iqrF≥-0.9638	1	[2, 0]	75:25	0.750	3
5	ort2F≤-2.1031e-16 AND pksW2≥-0.9865	2	[0, 25]	4:96	0.963	2
6	skewF≥0.4860 AND pksW1≥-0.97145	2	[0, 4]	17:83	0.833	2
7	pksW2≤-0.9732 AND medF≥-0.9363	2	[0, 4]	17:83	0.833	2
8	skewF≤-0.7148 AND pksW2≥-0.6413	2	[0, 2]	25:75	0.750	2
9	QF2≥-0.9894 AND QF2≤-0.9653 AND pksW1≥-0.5121	2	[0, 2]	25:75	0.750	3
	TRUE	1	[42, 38]	52:48	0.524	

Table 9. Induced rules for the selected features.

6. CONCLUSION

This study focused on two questions, first question is "Could sEMG signal recorded from the trapezius muscle be an effective method in the diagnosis of CDH disease" and the second question is "what kind of classifiers are suitable for this task?". For this purpose, PSD-based features were preferred, because, in the experiment, muscles remained at a certain position, so a time series approach was not suitable for this task. Feature extraction was not enough precursor for the classification task, so feature selection was also very important. During the analysis of the features, it has been obvious that the peak frequency value plays an important role in the features. So, when the feature selection metrics were applied to the features, the top 10 of them were based on peak frequency values.

The final step was evaluating the performance of different classifier algorithms. There are many methods used for the classification of sEMG data [45-49]. In this study, tree-based algorithms and hyperplane-based algorithms were used. In comparison, an interesting situation has occurred. After the training and cross-validation process, the most successful algorithms were tree-based algorithms, depending on the results it can be said that the frequency features obtained from sEMG signals are more suitable to be classified with the tree-based algorithms like Decision Tree or Random Forest. Hence the success rates of all algorithms were good enough to classify the subjects accurately.

There are many current studies in the literature for feature extraction and classification from EMG signals. These methods differ according to experiment design and selected muscle group and generally, high classification accuracy is obtained. EMG classifications are generally used in the automated diagnostic system for neuromuscular diseases or used for prosthetic device control.

In conclusion, according to the results, this study claims that Cervical Disc Herniation affects the electrical activity of the trapezius muscle utilizing resting-state sEMG signals. Our findings are compatible with the literature and provide higher classification accuracy than studies using surface EMG in muscle disorders [31-32].

The main contribution of this study is high classification and prediction values that will be beneficial with non-invasive sEMG in the clinical assessment before MRI in the diagnosis of Cervical Hernia patients. It is considered that this study is an important step in determining the source of muscle pain occurring in the neck region.

The main limitation of this study is the small number of subjects. When the number of subjects is increased, the results will become more reliable, and an automated diagnosis system could be designed.

Declaration of Ethical Standards

The authors of this manuscript declare that they comply with all ethical standards.

Credit Authorship Contribution Statement

Burak Yılmaz: Software, Visualization, Investigation. Writing- Reviewing and Editing, **Güzin Özmen:** Conceptualization, Methodology, Data curation, Writing- Original draft preparation. **Hakan Ekmekçi:** Supervision, Data Curation.

Declaration of Competing Interest

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

Funding / Acknowledgements

This work was not supported by any funding sources.

Data Availability

The data set in this study has not shared in any kind of media yet.

REFERENCES

- [1] Mochida, Kiyoshi, Hiromichi Komori, Atsushi Okawa, Takeshi Muneta, Hirotaka Haro, and Kenichi Shinomiya. "Regression of Cervical Disc Herniation Observed on Magnetic Resonance Images." Spine 23 (9): 990–95. https://doi.org/10.1097/00007632-199805010-00005, 1998.
- [2] Yeung, Jacky T., John I. Johnson, and Aftab S. Karim. "Cervical Disc Herniation Presenting with Neck Pain and Contralateral Symptoms: A Case Report." *Journal of Medical Case Reports* 6 (1): 166. https://doi.org/10.1186/1752-1947-6-166, 2012.
- [3] Sharrak, Samir, and Yasir Al Khalili. "Cervical Disc Herniation." StatPearls [Internet], 2020.
- [4] Kamibayashi, Lynne K, and Frances J.R. Richmond. "Morphometry of Human Neck Muscles." *Spine* 23 (12): 1314–23. https://doi.org/10.1097/00007632-199806150-00005, 1998.
- [5] Takebe, Kyoichi, Mathias Vitti, and John V Basmajian. "The Functions of Semispinalis Capitis and Splenius Capitis Muscles: An Electromyographic Study." *The Anatomical Record* 179 (4): 477–80. https://doi.org/10.1002/ar.1091790407, 1974.
- [6] Bernhardt, P, H-J. Wilke, K.H. Wenger, B Jungkunz, A Böhm, and L.E. Claes. "Multiple Muscle Force Simulation in Axial Rotation of the Cervical Spine." *Clinical Biomechanics* 14 (1): 32–40. https://doi.org/10.1016/S0268-0033(98)00031-X, 1999.
- [7] Sommerich, Carolyn M., Sharon M.B. Joines, Veerle Hermans, and Samuel D. Moon. "Use of Surface Electromyography to Estimate Neck Muscle Activity." *Journal of Electromyography and Kinesiology* 10 (6): 377–98. https://doi.org/10.1016/S1050-6411(00)00033-X, 2000.
- [8] Bronzino, Joseph D. *Biomedical Engineering Handbook* 2. Vol. 2. Springer Science & Business Media, 2000.
- [9] Luca, Carlo J De. "The Use of Surface Electromyography in Biomechanics." *Journal of Applied Biomechanics* 13 (2): 135–63. https://doi.org/10.1123/jab.13.2.135, 1997.

- [10] Subasi, Abdulhamit. "Classification of EMG Signals Using PSO Optimized SVM for Diagnosis of Neuromuscular Disorders." Computers in Biology and Medicine 43 (5): 576–86. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2013.01.020, 2013.
- [11] Subasi, Abdulhamit, Emine Yaman, Yara Somaily, Halah A. Alynabawi, Fatemah Alobaidi, and Sumaiah Altheibani. "Automated EMG Signal Classification for Diagnosis of Neuromuscular Disorders Using DWT and Bagging." *Procedia Computer Science* 140: 230–37. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.333, 2018.
- [12] Jose, Shobha, S Thomas George, M S P Subathra, Vikram Shenoy Handiru, Poornaselvan Kittu Jeevanandam, Umberto Amato, and Easter Selvan Suviseshamuthu. "Robust Classification of Intramuscular EMG Signals to Aid the Diagnosis of Neuromuscular Disorders." *IEEE Open Journal* of Engineering in Medicine and Biology 1: 235–42. https://doi.org/10.1109/OJEMB.2020.3017130, 2020.
- [13] Akef Khowailed, Iman, and Ahmed Abotabl. "Neural Muscle Activation Detection: A Deep Learning Approach Using Surface Electromyography." *Journal of Biomechanics* 95 (October): 109322. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109322, 2019.
- [14] Azzerboni, Bruno, Giovanni Finocchio, Maurizio Ipsale, Fabio La Foresta, and Francesco Carlo Morabito. "A New Approach to Detection of Muscle Activation by Independent Component Analysis and Wavelet Transform." In *Italian Workshop on Neural Nets*, 109–16. Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45808-5_11, 2002.
- [15] Karthick, P.A., Diptasree Maitra Ghosh, and S Ramakrishnan. "Surface Electromyography Based Muscle Fatigue Detection Using High-Resolution Time-Frequency Methods and Machine Learning Algorithms." Computer Methods and Programs in Biomedicine 154 (February): 45–56. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.10.024, 2018.
- [16] Subasi, Abdulhamit, and M Kemal Kiymik. "Muscle Fatigue Detection in EMG Using Time-Frequency Methods, ICA and Neural Networks." *Journal of Medical Systems* 34 (4): 777–85. https://doi.org/10.1007/s10916-009-9292-7, 2010.
- [17] Silva, Luís, João Rocha Vaz, Maria António Castro, Pedro Serranho, Jan Cabri, and Pedro Pezarat-Correia. "Recurrence Quantification Analysis and Support Vector Machines for Golf Handicap and Low Back Pain EMG Classification." *Journal of Electromyography and Kinesiology* 25 (4): 637–47. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.04.008, 2015.
- [18] Ostojić, Saša, Stanislav Peharec, Vedran Srhoj-Egekher, and Mario Cifrek. "Differentiating Patients with Radiculopathy from Chronic Low Back Pain Patients by Single Surface EMG Parameter." Automatika 59 (3–4): 400–407. https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1553669, 2018.
- [19] Jiménez-Grande, David, S. Farokh Atashzar, Eduardo Martinez-Valdes, Alessandro Marco De Nunzio, and Deborah Falla. "Kinematic Biomarkers of Chronic Neck Pain Measured during Gait: A Data-Driven Classification Approach." *Journal of Biomechanics* 118 (March): 110190. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.110190, 2021.
- [20] Walsh, Kevin A, Sean P Sanford, Brian D Collins, Noam Y Harel, and Raviraj Nataraj. "Performance Potential of Classical Machine Learning and Deep Learning Classifiers for Isometric Upper-Body Myoelectric Control of Direction in Virtual Reality with Reduced Muscle Inputs." *Biomedical Signal Processing and Control* 66 (April): 102487. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102487, 2021.
- [21] Kumar, Shrawan, and Narasimha Prasad. "Cervical EMG Profile Differences between Patients of Neck Pain and Control." *Disability and Rehabilitation* 32 (25): 2078–87. https://doi.org/10.3109/09638288.2010.481029, 2010.
- [22] Ozmen, Guzin, and Ahmet Hakan Ekmekci. "Classification of Cervical Disc Herniation Disease Using Muscle Fatigue Based Surface EMG Signals by Artificial Neural Networks." International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering 4 (5): 256–62. https://doi.org/10.18201/ijisae.2017533901, 2017.

- [23] Phinyomark, Angkoon, Pornchai Phukpattaranont, and Chusak Limsakul. "Feature Reduction and Selection for EMG Signal Classification." *Expert Systems with Applications* 39 (8): 7420–31. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.102, 2012.
- [24] Qin, Pengjie, and Xin Shi. "Evaluation of Feature Extraction and Classification for Lower Limb Motion Based on SEMG Signal." *Entropy* 22 (8). https://doi.org/10.3390/E22080852, 2020.
- [25] Katsis, C.D., Y. Goletsis, A. Likas, D.I. Fotiadis, and I. Sarmas. "A Novel Method for Automated EMG Decomposition and MUAP Classification." *Artificial Intelligence in Medicine* 37 (1): 55–64. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2005.09.002, 2006.
- [26] Rasheed, Sarbast, Daniel Stashuk, and Mohamed Kamel. "A Software Package for Interactive Motor Unit Potential Classification Using Fuzzy K-NN Classifier." *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 89 (1): 56–71. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2007.10.006, 2008.
- [27] Gokgoz, E., & Subasi. "Comparison of Decision Tree Algorithms for EMG Signal Classification Using DWT." *Biomedical Signal Processing and Control* 18: 138–44. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2014.12.005, 2015.
- [28] Kamali, Tahereh, Reza Boostani, and Hossein Parsaei. "A Multi-Classifier Approach to MUAP Classification for Diagnosis of Neuromuscular Disorders." *IEEE Transactions on Neural Systems* and Rehabilitation Engineering 22 (1): 191–200. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2291322, 2014.
- [29] Artameeyanant, Patcharin, Sivarit Sultornsanee, and Kosin Chamnongthai. "An EMG-Based Feature Extraction Method Using a Normalized Weight Vertical Visibility Algorithm for Myopathy and Neuropathy Detection." SpringerPlus 5 (1): 2101. https://doi.org/10.1186/s40064-016-3772-2., 2016
- [30] Hazarika, Anil, Lachit Dutta, Meenakshi Boro, Mausumi Barthakur, and Manabendra Bhuyan. "An Automatic Feature Extraction and Fusion Model: Application to Electromyogram (EMG) Signal Classification." International Journal of Multimedia Information Retrieval 7 (3): 173–86. https://doi.org/10.1007/s13735-018-0149-z, 2018.
- [31] Istenič, Rok, Prodromos A. Kaplanis, Constantinos S. Pattichis, and Damjan Zazula. "Multiscale Entropy-Based Approach to Automated Surface EMG Classification of Neuromuscular Disorders." Medical & Biological Engineering & Computing 48 (8): 773–81. https://doi.org/10.1007/s11517-010-0629-7, 2010.
- [32] Barmpakos, Dimitrios, Prodormos Kaplanis, Stavros A. Karkanis, and Constantinos Pattichis. "Classification of Neuromuscular Disorders Using Features Extracted in the Wavelet Domain of SEMG Signals: A Case Study." *Health and Technology* 7 (1): 33–39. https://doi.org/10.1007/s12553-016-0153-3, 2017.
- [33] Moore, Keith L, A M R Agur, and Arthur F Dalley. *Essential Clinical Anatomy*. Baltimore, MD: Lippincott Williams & Wilkins, 2011.
- [34] Halaki, Mark. "Normalization of EMG Signals: To Normalize or Not to Normalize and What to Normalize To?" In , edited by Karen Ginn ED1 - Ganesh R Naik, Ch. 7. Rijeka: IntechOpen. https://doi.org/10.5772/49957, 2012.
- [35] Awal, Abdul, Sheikh Shanawaz Mostafa, and Mohiuddin Ahmad. "Performance Analysis of Savitzky-Golay Smoothing Filter Using ECG Signal." *International Journal of Computer and Information Technology* 01 (02): 24–29, 2011.
- [36] Bucy, R S. "Burg Technique." In Lectures on Discrete Time Filtering, 47–54. New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8392-5_5, 1994.
- [37] Subasi, A. Practical guide for biomedical signals analysis using machine learning techniques: A MATLAB based approach. Academic Press, 2019
- [38] Altunkaya, Sabri, Sadık Kara, Niyazi Görmüş, and Saadetdin Herdem. "Comparison of First and Second Heart Sounds after Mechanical Heart Valve Replacement." *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 16 (4): 368–80. https://doi.org/10.1080/10255842.2011.623672, 2013.

- [39] Altunkaya, Sabri. "Yaşlılarda Düşme Riskini Değerlendirmek Için İvmelenme Sinyalinin Frekans Domeni Özellikleri." *European Journal of Science and Technology*, no. August: 150–55. https://doi.org/10.31590/ejosat.779590, 2020.
- [40] Wu, Xindong, Vipin Kumar, Quinlan J. Ross, Joydeep Ghosh, Qiang Yang, Hiroshi Motoda, Geoffrey J. McLachlan, et al. *Top 10 Algorithms in Data Mining. Knowledge and Information Systems*. Vol. 14. https://doi.org/10.1007/s10115-007-0114-2, 2008.
- [41] Clark, Peter, and Tim Niblett. "The CN2 Induction Algorithm." *Machine Learning* 3 (4): 261–83. https://doi.org/10.1023/A:1022641700528, 1989.
- [42] Breiman, Leo. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (1): 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324, 2001.
- [43] Balamareeswaran, M., and D. Ebenezer. "Denoising of EEG Signals Using Discrete Wavelet Transform Based Scalar Quantization." *Biomedical and Pharmacology Journal* 8 (1): 399–406. https://doi.org/10.13005/bpj/627, 2015.
- [44] Powers, David M. W. "Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness and Correlation," no. January 2011. https://doi.org/10.9735/2229-3981, 2020.
- [45] Chowdhury, Suman Kanti. "Discrete Wavelet Transform Analysis of Surface Electromyography for the Objective Assessment of Neck and Shoulder Muscle Fatigue Discrete Wavelet Transform Analysis of Surface Electromyography for the Objective Assessment of Neck and Shoulder Muscle Fatigue", Statler College of Engineering and Mineral Resources, Master Thesis, https://doi.org/10.33915/etd.4841, 2012.
- [46] Gokgoz, Ercan, and Abdulhamit Subasi. "Effect of Multiscale PCA De-Noising on EMG Signal Classification for Diagnosis of Neuromuscular Disorders." *Journal of Medical Systems* 38 (4): 31. https://doi.org/10.1007/s10916-014-0031-3., 2014.
- [47] Pauk, J. "Different Techniques for EMG Signal Processing." *Journal of Vibroengineering* 10 (4): 571–76, 2008.
- [48] Akhundov, Riad, David J. Saxby, Suzi Edwards, Suzanne Snodgrass, Phil Clausen, and Laura E. Diamond. "Development of a Deep Neural Network for Automated Electromyographic Pattern Classification." *Journal of Experimental Biology* 222 (5): 1–5. https://doi.org/10.1242/jeb.198101, 2019.
- [49] Siqueira, Ailton Luiz Dias, and Alcimar Barbosa Soares. "A Novel Method for EMG Decomposition Based on Matched Filters." *Revista Brasileira de Engenharia Biomedica* 31 (1): 44–55. https://doi.org/10.1590/2446-4740.0643, 2015.



SİLAH GERİ TEPME VE ŞAHLANMA TEST MAKİNASI TASARIMI VE SİMULASYONU (Design and Simulation of Gun Rebound and Rampancy Test Machine)



¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Konya, TÜRKİYE ²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE ¹orhankocmak1806@gmail.com, ²mtinkir@erbakan.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

Silah tepme ve şahlanma testi (Gun rebound and rampancy test)

- Test makinası tasarımı ve yapısal analizi (Design and structural analysis of test machine)
- Simülasyon (Simulation)

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



Çalışmada kullanılan yöntemler (The methods used in the study)



SİLAH GERİ TEPME VE ŞAHLANMA TEST MAKİNASI TASARIMI VE SİMULASYONU



¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Konya, TÜRKİYE ²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹orhankocmak1806@gmail.com, ²mtinkir@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 05.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.12.2022)

ÖZ: Ateşli silahların tasarımında mekanizma parçalarının ve tahrik sistemlerinin enerji ve kuvvet hesaplamaları, silahın konforu ve etkinliği açısından hayati önem arz etmektedir. Silah uzuvlarında oluşan kuvvetlerin bilinmesi, uzun ömürlü parçaların tasarımına olanak sağlar. Otomatik silahlarda patlamadan sonra açığa çıkan enerjinin bilinmesi ise gaz deliği çapının ve konumunun optimum hesaplanmasını mümkün kılar. Bu hesapların sonucunda daha konforlu ve performansı yüksek silahlar tasarlanabilir. Bu çalışma kapsamında; silah ateşlenmesinde oluşan tepme kuvvetini ve şahlanma momentini ölçebilen, iki serbestlik dereceli, gelen kuvvetleri sönümleyebilen rijit bir test makinasının Ansys/Workbench programı kullanarak yapısal analizleri, özgün tasarımı ve MATLAB/Simulink ile PID konum kontrol simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test makinasının prototip imalatı için oldukça önemli teknik bulgular elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silah Tepme Kuvveti, Şahlanma Momenti, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Test Makinası, Simülasyon

Design and Simulation of Gun Rebound and Rampancy Test Machine

ABSTRACT: In the design of firearms, the energy and force calculations of the mechanism parts and actuation systems are vital for the comfort and effectiveness of the gun. Knowing the forces formed on the gun limbs enables the design of long-lasting parts. Knowing the energy released after the explosion in automatic guns enables optimum calculation of the gas hole diameter and position. As a result of these calculations, more comfortable and high performance guns can be designed. In this study; the novel design and simulation of a rigid test machine is realized using a finite element method which is two degrees of freedom and can measure the rebound force and rampancy moment formed on gun firing and absorbs incoming forces. In addition, very important technical findings are obtained for the prototype manufacturing of the testing machine.

Keywords: Gun Rebound Force, Rampancy Moment, Finite Element Method, Test Machine, Simulation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji, sahip olduğu önem nedeniyle üzerinde durulan konulardan biridir. Bilindiği gibi enerjinin korunumu kanununa göre enerji yoktan var edilmez, var olan enerji de yok edilemez, sadece bir şekilden diğerine dönüşür [1]. Silahlarda kullanılan enerji kimyasaldır. Barutun yanması sonucu anlık olarak ortaya çıkan sıcak gazlar hacimde çok hızlı bir büyümeye sebep olur ve genleşme sonucu basınca maruz kalan namlu içerisindeki mermi, yüksek hızlara ulaşır. Tüm ateşli silahlar bu mantık çerçevesinde çalışır. Bu durumda kimyasal enerji sonucu açığa çıkan basınç, merminin fırlatılmasında kullanıldıktan sonra otomatik tüfeklerde silahın yeniden doldurulması içinde kullanılır. Namluda bulunan küçük bir delik vasıtasıyla içerideki yüksek basınçlı gaz, gaz-piston mekanizmasına dolarak mekanizmanın hareket

etmesini sağlar. Mekanizmanın kinetik enerjisi sayesinde boş kovan tahliye edilerek dolu fişek atım yatağına sürülür [2].

Mekanizma hareketi mekanizmayı taşıyan gövdenin geometrisi gereği sınırlıdır. Bu sınır boyunca hareket eden mekanizma tepe noktasına ulaştığında teorik olarak hızı sıfır olmalıdır. Sahada yapılan gözlemler sonucunda mekanizma hareketi strok sonunda sıfır olamamaktadır. Enerji, strok boyunca icra yayına aktarıldıktan sonra, hız sıfıra düşmediği için mekanizmanın strok sonundaki hızının, sahip olduğu kinetik enerji çarpma vasıtasıyla kullanıcıya aktarılmaktadır. Bir diğer ger tepme kuvvetini oluşturan unsur ise ilk patlamadır. Patlama gerçekleştikten sonra atış eksenin mermi çekirdeği '+' yönde hareket edildiği varsayılırsa silah gövdesi patlamadan dolayı '-' yönde hareket etmektedir. Mermi çekirdeğini namlu boyunca iten sıcak basınçlı gaz namlu bitiminde yüksek hızla namluyu terk ettiği için namlu çıkışında omza doğru bir geri tepme kuvveti gerçekleştirmektedir. Silah ateşlenme esnasında oluşan kuvvetler Şekil 1'de gösterilmiştir.





Ayrıca geri tepme kuvvetlerinden dolayı kullanıcı omzuna göre silah da şahlanma momenti meydana gelmektedir. Tüm bunların ölçülmesiyle silah geometrisinde yapılacak iyileştirmeler sayesinde silah üzerindeki kuvvetler azaltılabilir. Bu iyileştirmeler ile silahın daha konforlu hale gelmesi aynı zamanda performansının da artması sağlanabilir. Bu nedenlerden dolayı prototip silahların geri tepme kuvvetlerinin ve şahlanma momentlerinin ölçülmesi ve elde edilen sonuçlara göre silah üzerinde tasarımsal değişikliklerin yapılması gerekmektedir [3-5].

Singh ve arkadaşları manyetoreolojik amortisörler kullanılarak top geri tepmesinin optimum kontrolünü gerçekleştirmişler ve oldukça önemli teknik bulgular elde etmişlerdir [6]. Yine Singh ve arkadaşları, bu sefer doğrudan ateşte topun geri tepmesinin manyetoreolojik sönümleyiciler kullanılarak optimum kontrolünü incelemişlerdir [7]. Ouyang ve arkadaşları sahra silahının geri tepmesini azaltmak için yeni bir manyetoreolojik sönümleyicinin kontrol edilebilirlik analizini ve testini gerçekleştirmişlerdir [8]. Liu ve arkadaşları ., 2021) hedefe giren deniz silahı test mermisi için bir tasarım planı ve analizi üzerine çalışmışlardır [9]. Noh ve arkadaşları otomatik tabanca için geri tepme sistemi analiz modeli geliştirmesini incelemişlerdir [10]. Hong ve arkadaşları karma mod manyetoreolojik sönümleyiciler için boyutsuz bir Bingham modelinin analitik ve deneysel doğrulamasını yapmışlardır [11]. Hongsheng ve arkadaşları bir manyetolojik silah geri tepme amortisörünün kontrol edilebilirliği üzerine incelemede bulunmuşlardır [12]. Li ve arkadaşları, manyetolojik sıvı damperi kullanan bir tabanca geri tepme sistemi üzerinde araştırmalar yapmışlardır [13]. Mao ve arkadaşları bir manyetoreolojik enerji soğurucu tasarım analizinin deneysel doğrulaması üzerinde çalışmışlardır [14].

Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan tamamen farklı, silah ateşlenmesinde oluşan tepme kuvvetlerini ve şahlanma momentini ölçebilen, iki serbestlik dereceli bir test makinasının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak özgün tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test makinasının prototip imalatı için oldukça önemli teknik bulgular elde edilmiştir.

2. TEST MAKİNASININ MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU (MODELING AND SIMULATION OF THE TEST MACHINE)

Yapılan çalışmada ilk olarak test makinasının üç boyutlu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle atış sırasında oluşan kuvvetlerin ölçülmesi için silahın doğru şekilde test makinasına bağlanması gerektiği dikkate alınmıştır. Bu bağlantıdan kasıt, oluşan kuvvetlerin hiçbir uzva etki etmeden doğrudan makine üzerindeki algılayıcılara iletilmesidir. Atış sırasında oluşan kuvvetler ise silahtan silaha değişmektedir. Yüksek kalibreli tüfeklerde tepme kuvvetleri de yüksek olacağı için ölçümlerin ve test makinası gövde şasesinin rijit bir yapıda olması gerekmektedir. Bu nedenle makine üzerinde sönüm sistemi tasarlanmıştır. Silahın testini gerçekleştirirken hedef almak için silah tablasına iki hareket ekseni sağlanmıştır. Böylece tablanın yatayla açısı ve yönü kontrol edilebilmektedir. Test makinası sahada kullanılacağından dolayı hem atışın sağlığı için hem de sevkiyatın kolaylığı için makine üzerinde dört adet katlanır tekerden oluşan taşıyıcı ayak sistemi tasarlanmıştır. Atış anında ölçüm yapabilmek için kuvvetlerin yönünün anlaşılması gerekir. Bu ölçümler sırasında şase üzerinde yük çekebilen tek mesnet makine üzerine yerleştirilecek sensör (Load Cell) olmalıdır. Bu durumda ancak doğru ölçüm yapılabilir. Ayrıca silahın hareket yönüne doğru silahın bağlanıldığı şase serbest hareket edebilmeli fakat bu hareketi de Load Cell engellemelidir. Böylece silahtan gelen tüm kuvvetler sadece Load Cell üzerinden geçtikten sonra şaseye dağılacaktır. Bu araştırmalara göre yapılan tasarımda oluşan kuvvetlerin hassa bir şekilde ölçülmesi sağlanmıştır. Silahta omza doğru geri tepme kuvvetlerinin ölçümünü yapabilmek için kullanıcının omzu simüle edilerek omzun dayanacağı konuma yani dipçik bölümüne göre bir şase tasarlanmıştır. Dipçik bölümünde ölçüm yapacak sistem Şekil 2 de gösterilmiştir.



Sekil 2. Silah etkilerinin şase ile ilişkisi **Figure 2.** The relationship of the gun effects with the chassis

Namlu bölümü her türden silahı bağlamak için boyu ayarlanabilir şekilde adaptif yapıda tasarlanmıştır. Geriye doğru oluşan kuvvetler omzun üstünden geçtiğinden, silahta omza göre moment oluşmaktadır. Şahlanma momentinin hesaplanmasında ise ölçüm noktası ile omuz arasındaki mesafe ile Load Cell den okunan kuvvet değerinin çarpılması esas alınmıştır.



Şekil 3. Dipcik bölümü Figure 3. The stock part

Oluşan kuvvetlerin büyük bölümü dilcikten kullanıcı omzuna etki etmektedir. Bu durumda ölçüm yapılacak noktalardan birisi dipçik bölümüdür. Silahın omuz ile temas ettiği bölüm belirli derecede büyük tasarlanmıştır. Bunun nedeni her ebatta dipçiğin bağlanmasına olanak sağlamaktadır.

Silah dipçiği şaseye dayanıp yerleştirildikten sonra iki yönden sıkma somunları ile sıkılarak sabitlenir. Sabitlenen bölümün arkasında silahın omza göre dönüşünü simüle edecek bir mesnet bulunur. Bunun sebebi daha öncede bahsedildiği gibi silahı hareket açısından serbest bırakmaktır. Bağlantı hali Şekil 3' de gösterilmiştir. Dipçik bölümündeki tüm parçaların 10 mm St37 malzemeden yapılması düşünülmüştür.

Çizelge1. St37 malzeme özellikleri				
Table 1. St37 material properties				
Özellik	Değer	Birim		
Elastikiyet Modülü	210000.0031	N/mm ²		
Poisson Oranı	0.28			
Yırtılma Modülü	79000	N/mm ²		
Kütle Yoğunluğu	7800	kg/m³		
Gerilme Mukavemeti	360	N/mm ²		
Akma Mukavemeti	235	N/mm ²		
Termal Genişleme Katsayısı	1.1e-005	$1/^{0}K$		
Termal İletkenlik	14	W/(m.K)		
Özgül Isı	440	J/ (kg.K)		

Dipçik bölümünde yükleme durumu Solidworks programında simüle edilerek güvenli olduğu anlaşıldıktan sonra dipçik şasesinin tasarımı tamamlanmıştır. Bu statik analiz çerçevesinde, dipçik dayama bölümüne 50 kgF yük uygulanmıştır. Kullanılan malzeme olan St37 özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Statik yükleme durumu için elde edilen gerilme ve yer değiştirme sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Dipçik bölümü statik analiz sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları Figure 4. Stock section static analysis results a. Stress results b. Displacement results

Ölçüm noktalarından bir diğeri de namlu bölümündedir. Bu ölçüm noktasında silahın dönmesi serbest bırakılmakta ve dönme sadece Load Cell tarafından engellenmektedir. Bu durumda oluşan moment, mesnet kuvveti ile yük kolu çarpımı şeklinde hesaplanmaktadır. Burada yük olarak bahsedilen uzunluk ölçüm noktası ile dönme noktası arasındaki mesafedir. Bu durumu Şekil 5'te gösterilmiştir.



Namlu bölümünü oluşturan kısımlar Şekil 6'da verilmiştir. Bu bölümde Load Cell' e gelen kuvvet dipçik bölümünde olduğu gibi maksimum olarak belirlenen 50 kgF' dur. Bu kuvvet namlunun bu bölümle temas ettiği yüzeye verilerek Solidworks programında statik analize tabi tutulmuştur.



6 mm ve 10 mm kalınlıkla St37 malzemeden oluşturulan namlu bölümünün gerilme ve yer değiştirme sonuçları Şekil 7' de verilmiştir. Sonuçlardan yola çıkılarak ölçümü ve makine rijitliğini tehdit eden bir sorunla karşılaşılmamıştır.



Şekil 7. Namlu bölümü statik analiz sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları *Figure 7. Static analysis of the barrel part a. Stress results b. Displacement results*

Tablaya bağlanabilecek tüfeklerin ebatları değişiklik göstermektedir. Bu değişikliğe karşın ölçümün düzdün yapılabilmesi için silahın tabla ile paralel ateşlenmesi gerekmektedir. Burada doğacak bir yükseklik farkı söz konusudur. Bu farkın giderilmesi için namluyu sıkıştıran alt çene ve üst çenenin, saplamalarla ve bunlara ait sabitlenmiş, dönebilen somunlarla yüksekliği ayarlanabilecek şekilde tasarım yapılmıştır. Böylece silah testten önce tablaya paralel konuma getirilebilmektedir.



Şekil 8. Silah tablası tasarımı *Figure 8.* Design of the gun table

Tabla üzerinde iki kenarda bulunan millerin üzerinde hareket eden namlu bölümü silahın el kundağı ve namlu uzunluğuna göre 1077 mm' ye kadar açılabilmektedir. Silahın el kundağı-dipçik uzunluğu 1077 mm'yi geçmediği sürece tablaya bağlanabilmektedir. Bu aralık çoğu silahı kapsamakta ve bu şekilde silahın boyu ayarlanabilmektedir. Ayrıca test atışı sırasında silahtan tahliye edilen boş kovanların çevreye dağılmaması için bir tür set tasarlanmıştır. Kovan perdesi ismi verilen bu bölüm silah boyuna göre hareket etmektedir. Bunlara ilave olarak tasarımda, silahın bağlandığı bölüm olan silah tablasında aynı zamanda silahın otomatik ateşlenmesini sağlan bir sisteme alt yapı olan bir bölümde mevcuttur. Bu bölüm yüksekliği ayarlanabilir olacak şekilde servo motor ile kontrol edilecek şekilde tasarlanmıştır. Silah tablası sönüm bölümünde ise 4 adet lineer rulman ve sönüm yaylarını sıkıştıran bir adet de şase bulunmaktadır. Bu lineer rulman ve şase sayesinde atıştan sonra oluşan kuvvetler sönümlenebilmektedir. Tasarımda dikkate alınan bu unsurlar Şekil 8' de gösterilmiştir. Silah tablası daha önce belirtilen 50 kgF'lik kuvvete ve sönüm yay kulağından silah geri tepmesine ters yönde olacak şekilde 100N'luk bir kuvvete maruz bırakılarak gerilme ve yer değiştirme sonuçları elde edilmiştir. Şekil 9-10 da verilen sonuçlara göre silah tablasının emniyetli olarak tasarlandığı sonucuna varılmıştır.





Şekil 10. Silah tablası yer değiştirme sonuçları*Figure 10. Displacement results of the gun table*

Sönüm bölümü silah tablası ile yükseklik bölümü arasında yer alan bir bölümdür. Üzerinde lineer rulman kızakları mevcuttur. Silah tablası bu kızaklar üzerinde hareket etmektedir. Aynı zamanda bu bölüm üzerinde bulunan iki adet sönüm yayı vasıtası ile atıştan sonra oluşan kuvvetler sönümlenmektedir. Bu sönümlemenin nedeni alt şaseyi zorlamamak ve ölçümü sağlıklı gerçekleştirmektir. Sönüm bölümü tasarımı Şekil 11' de verilmiştir.



Şekil 11. Sönüm bölümü tasarımı *Figure 11. Damper part design*

Sönüm bölümü statik analize tabi tutulmuş, bu analiz çerçevesinde mafsal ve kızak bağlantısından sabitlenen CAD modele iki uçtan ve sönüm mil şasesinden 100kgF keyfi yük uygulanarak gerilme ve eğilme durumu araştırılmıştır. Sonuçlar Şekil 12' de gösterilmiştir.



Şekil 12. Sönüm bölümü statik analiz sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları *Figure 12.* Static analysis results of the damper part a. Stress results b. Displacement results

Silah tablası ile sönüm bölümü arasında lineer rulmanlı bağlantı vardır. Bu durum kuvvet sönüm sistemine iletilmektedir. Sönüm yay sabitin optimum düzeyde olması bu sistemin en iyi şekilde çalışması demektir. Yay sabitinin araştırılmasında Matlab/Simulink/SimMechanics programı kullanılmıştır. Sistemin üç boyutlu katı modeli Matlab/SimMechanics ortamına aktarılmış ve sistemin simülasyon modeli elde edilmiştir. Sistemin Matlab/Simulink/SimMechanics modeli Şekil 13'de verilmiştir.

Matlab ortamında sönüm sistemi ile silah tablası arasına 'Body Spring & Damper' özelliği kullanılarak yay tanımlanmıştır. Matematiksel olarak sistemde sönüm elemanı bulunmamaktadır. Bu durumda Matlab ortamında kuvvet girişlerinden sonra silah tablasının titreşim hareketi yapması doğaldır. Titreşim grafiklerinde önemli olan kısım ilk tepe noktasının numerik değeridir. Bu değer silah tablasının atıştan sonra ne kadar geri geleceğini söylemektedir. Test makinasında tasarım gereği geometrik olarak izin verilen strok boyunca hareket eden tabla, sönüm yayına enerjisini aktarır ve çarpışma önlenmektedir. Aynı şekilde bu durum geri dönüş içinde geçerlidir. Bu durumda silah tablası bir tam devir yaptığında hız sıfıra düşmektedir. Belirlenen strok ise 268 mm'dir. Katı model üzerinden simülasyonun gerçekleşmesi için silahın tabla ile temas ettiği noktalara kuvvet tanımlanmıştır.

Tanımlanan noktalar Şekil 14' de verilmiştir. Kuvvetler simülasyonun birinci saniyesinde etkimektedir ve 0.1s kadar sürmektedir. Bu kuvvetlerin grafikleri Şekil 15' de gösterilmiştir.



Şekil 13. Test makinası Matlab/Simulink/SimMechanics modeli ve blok diyagramı Figure 13. Matlab/SimMechanics model and block diagram of the test machine



Figure 14. Representative shot force display



Figure 15. Representative input forces.

Simülasyonlarda yay sabiti sırasıyla 7 N/m, 10 N/m ve 15 N/m olarak alınmıştır. Bu yay sabitlerine göre tablanın konum değişimi grafikleri Şekil 16'da verilmiştir.



Bu sonuçlara göre yay sabiti 7 N/m iken tablanın 242.2 mm, 10 N/m iken 200 mm ve 15 N/m iken 164,6 mm maksimum deplasmana ulaştığı görülmektedir. Yay sabiti 7 N/m ve 10 N/m olduğunda tablanın ulaştığı konum izin verilen strok içerisindedir. Fakat güçlü silahların verebileceği geri tepme
kuvvetlerinin verilen temsili değerlerin üstüne çıkabileceği düşünüldüğünde sönüm sisteminde çarpışma gerçekleşmesi söz konusudur. Bu nedenle tasarımda yay sabiti 15 N/m olarak alınmış ve Load Cell'in maksimum dayanabileceği kuvvet olan 50kgF a göre tablanın konum ve hız analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. 50kgF etkisindeki tablanın konum ve hız değişimleri *Figure 17. Position and velocity changes of the table under the influence of 50 kgF*

Şekil 17'deki sonuçlara göre tablanın hareketinde izin verilen stroğun dışına çıkmıştır. Atıştan sonra çarpışma anında yay şasesinin bu kuvvete karşı tepkisi araştırılması için çarpışma anı simule edilmiş ve çarpışmanın 1.38 saniye sonra gerçekleşeceği bulunmuştur. Ayrıca maksimum ivmenin 1.05 saniyede oluştuğu Şekil 18'de görülmektedir.



Şekil 18. Tablanın çarpma anı konum, hız ve ivme sonuçları *Figure 18. Position, velocity and acceleration results of the table at the moment of impact*



Simülasyon sonucunda elde edilen veriler ve çarpma anı Şekil 19'da gösterilmiştir. Oluşturulan çarpma senaryosuna göre çarpma kinetik enerjisi 9.483 Joule, çarpma kuvveti ise 486.272 N olarak bulunmuştur. Hesaplanan çarpma kuvvetine göre sönüm bölümünün gerilme ve şekil değiştirme analizleri gerçekleştirilmiş ve Şekil 20'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre maksimum oluşan gerilme 7.538 MPa ve maksimum şekil değişimi 0.032 mm'dir. Çarpışma sonucunda tasarımı yapılan şase üzerinde rijitlik bozulmamış ve çarpışma kuvveti sönümlenmiştir.



Şekil 20. Sönüm bölümü gerilme ve şekil değişimi sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 20. Damping section stress and strain results a. Stress results b. Displacement results

Silah tablasını ve sönüm bölümünü taşıyan yükseklik sisteminin tasarımı Şekil 21'de verilmiştir. Yükseklik bölümünün mekanizma pimlerinden ve sönüm bölümü bağlantısından düşey yünlü 100kgF uygulandıktan sonra elde edilen gerilme ve şekil değiştirme sonuçları Şekil 22'de verilmiştir.

a.





50.141

41.784

33.427 25.070

16.714

8.357

0.000

Şekil 22. Yükseklik bölümü gerilme ve yer değiştirme analizleri a. Gerilme sonuçları b. Yer
 Değiştirme Sonuçları
 Figure 22. Stress and displacement results of the height part a. Stress results b. Displacement results

0.170

0.146

0.121

0.097

0.049

0.024

b.



Şekil 23. Yükseklik mekanizması *Figure 23. Height mechanism*

Yükseklik mekanizmasının dayanımını ölçmek için mekanizma sabitlendikten sonra mekanizma ucundan aşağı yönlü 250kgF yük tanımlanarak statik analiz yapılmış ve sonuçlar Şekil 24'de verilmiştir. Şekil 24' de verilen gerilme ve yer değiştirme sonuçlarına göre maksimum gerilme 217,348 MPa ve maksimum yer değiştirme 0,556 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 24. Yükseklik mekanizması gerilme ve yer değiştirme analizleri a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 24. Stress and displacement results of the height mechanisma. Stress results b. Displacement results

Matlab/Simulink/SimMechanics programında vidalı mile dönüş hareketi verilerek sönüm bölümü ve tablanın açısal hızının zaman içindeki değişimi incelenmiştir. Bu hareketi incelemeden önce tablanın belirlenmiş olan ±10° yükseklik hareketinde oluşan vidalı mil somunun hareketi hesaplanmıştır. Bunun yapılma nedeni, belirlenen hareket kabiliyeti içerisinde, vidalı milin açısal hızına göre tablanın açısal hızının nasıl değiştiğini görmektir. Tablaya ±10° hareket verilerek somunun konum değişimi incelenmiş ve somunun sıfır konumundan +10° yapmak için 24.483 mm geri, -10° yapmak için 57.9705mm ileri hareket yapması sonucuna varılmıştır. Şekil 25'de vidalı milin konum değişimi verilmiştir.



Figure 25. Position change of the ball screw as a result of $\pm 10^{\circ}$ movement of the table

Yükseklik vidalı mili 90 derece/s açısal hız ile dönerek yükseklik vidalı mil somunua 1.25mm/s hız kazandırmaktadır. Vidalı milin, 46.3764 saniyede ileriye doğru attığı 11.59 turda somun 57.9705mm ileri gitmekte, vidalı milin 19.5864 saniyede geriye doğru attığı 4.89 turda somun 24.483mm geri hareket etmektedir. Bu hareketler sonucunda tablanın yatayla açısı sırasıyla -10° ve +10° olarak değişmektedir. Belirlenen vidalı mil somunu parametreleri Matlab/simulink programında modele tanımlanarak tablanın açısal hızı incelenmiştir. Tablanın bu parametreler etkisindeki ileri ve geri hız-zaman grafikleri Şekil 26'da verilmiştir.



Figure 26. Angular velocity variation of $\pm 10^{\circ}$ movement of the table with the horizontal

Tablanın -10° hareketi incelendiğinde hareketin sonuna doğru hızın 0.18 derece/s'ye yaklaştığı görülmektedir. Tablanın +10° hareketi incelendiğinde ise hareketin sonuna doğru hızın 0.11 derece/s ulaşmaktadır. Yükseklik vidalı mili için seçilen 90 derece/s hızı tablada herhangi bir hassasiyet problemi vermemektedir. Bu durumda uzun menzilli test hedefine hassas biçimde nişan alınması mümkündür. Tablanın +10° hareketin -10° hareketine göre daha yavaş olması iyidir. Çünkü +10° hareketinin daha çok kullanılacak bir hareket olmasından dolayı mekanizma kinematiği bu harekette nişan almak için daha avantajlıdır. Tanımlanan hareketler sonucunda tabla +10° ve -10° ' ye hareket ettirilmiş ve bu tasarım üzerinde bu durum Şekil 27′ de gösterilmiştir.



Figure 27. Positions of the table to $+10^{\circ}$ and -10°

Test makinesi taşınmayı kolaylaştırmak için parçalara ayrılır şekilde tasarlanmıştır. Kontrol bölümü ise geçmeli şekilde montajlanarak makine kullanıma hazır hale gelecek şekilde tasarlanmıştır. Sensörlere ve servo motorlara güç sağlayan akü ve elektrik sistemlerinin bulunduğu pano bu bölümde bulunaktadır. Yön ve kontrol bölümünün genel yapısı Şekil 28'de verilmiştir.



Şekil 28. Yön ve kontrol bölümü tasarımı *Figure 28.* Direction and control section design

Yön bölümünün yük dayanımını sınamak için ayak bölümü ile bağlantı deliklerinden sabitlenir. Kamalı millerden düşey yünlü 50kgF, yükseklik bölümü ile bağlantı yerinden 100kgF ve kontrol bölümü temas şasesinden 50kgF tanımlanarak yapılan gerilme ve yer değiştirme analiz sonuçları Şekil 29'da verilmiştir.



Şekil 29. Yön bölümü gerilme ve yer değiştirme sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 29. Direction section stress and displacement results a. Stress results b. Displacement results

Yön bölümüne belirtilen yüklemeler yapıldıktan sonra gerilme diyagramı incelendiğinde maksimum gerilmenin kamalı milleri taşıyan parçada 244.528 MPa olduğu görülmektedir. Bu yükleme durumunda ise kamalı millerde 1.859 mm eğilme meydana gelmiştir. Yönlendirme mekanizmasının gerilme ve yer değiştirme sonuçları ise Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 30. Yönlendirme mekanizması gerilme ve yer değiştirme sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 30. Steering mechanism stress and displacement results a. Stress results b. Displacement results

Matlab/Simulink/SimMechanics programında yön mekanizmasının hızı incelenmiş ve -10° ve +10° vidalı mil somunun konum değişimini Şekil 31'de verilmiştir. Yön Vidalı Mil Somunu Konum-Zaman (-10° +10° arası)



Vidalı mil somunu +88.16 mm yol aldığında yön bölümü sağa 10°, -88.16 mm yol aldığında ise yön bölümü sola 10° dönmektedir. Vidalı milin hızı hassasiyeti artırmak amaçlı öncelikli olarak saniyede yarım tur olarak belirlenir.

Bu durumda;

$$\omega = (0.5 \text{ dev})/(1 \text{ s}) \times \frac{1 \text{ s}}{(1/60)} \text{ dk} = 30 \text{ dev}/\text{ dk}$$
(1)

 $\omega = 0.5 \text{dev}/1 \text{sn x } 360 \text{derece}/1 \text{dev} = 180 \text{ derece/s}$ (2)

olarak bulunur.

Lineer Hız = Hatve x Açısal Hız ve Hatve = 5 mm (Devir başına ilerleme) ise;	(3)
Lineer Hız = (5mm/dev) x (30 dev/dk) = 150mm/dk =2.5mm/s(somun hızı)	(4)
(+)88.16 mm sola ve (-)88.16 mm sağa hareket.	
Sola Lineer Hareket = Hatve x Sağa Açısal Hareket	(5)
(88.16mm)= (5mm/dev) x (Sağa Açısal Hareket)	(6)
Sağa Açısal Hareket = 17.632dev olarak bulunur.	
Yol = Hız x Zaman	(7)
(88.16mm) = (2.5mm/s) x (tsağ veya tsol)	(8)

tsağ = tsol = 35.264 s olarak bulunur

Yön vidalı mili 180 derece/s açısal hız ile dönerek yön vidalı mil somununa 2.5 mm/s hız kazandırmaktadır. Vidalı milin, 35.264 saniyede sağa ve sola doğru attığı 17.632 turda somun 88.16 mm sağa ve sola gitmektedir. Bu hareketler sonucunda tablanın yön açısı -10° ve +10° olarak değişmektedir. Belirlenen vidalı mil somunu parametreleri Matlab/Simulink programında modele tanımlanarak tablanın açısal hızı incelenmiştir. Tablanın bu parametreler etkisindeki sağa ve sola hız-zaman grafikleri Şekil 32'de gösterilmiştir.



180 derece/s yön vidalı mil hızına göre yön bölümünün hız-zaman grafiği Şekil 32'de gösterilmiştir. Bu grafiğe göre yön dönüş hızı 0.2 derece/s olarak kabul edilebilir. Bu hız ise yön bölümünün hassasiyeti açısından uygundur. Tanımlanan hareketler sonucunda yön bölümü +10° ve -10° ' ye hareket ettirilmiş ve bu durumlar için pozisyonu Şekil 33'de verilmiştir. Kontrol bölümünün 50kgF yük altında statik analiz sonuçları Şekil 34'de verilmiştir.



Şekil 33. Yön bölümü +10° ve -10° pozisyonlarının görünümü *Figure 33.* Direction section +10° and -10° positions view



Şekil 34. Kontrol bölümü gerilme ve yer değiştirme sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 34. Control section stress and displacement results a. Stress results b. Displacement results

Kontrol bölümüne 50 kgF kuvvet uygulanması sonucunda gerilme değerinin sınırlar içinde kaldığı ancak 4.607 mm yer değiştirme sonucunun ortaya çıktığı görülmektedir. Ancak kullanım yükünün 50kgF'e ulaşmayacağından dolayı yer değiştirme sonucunun makul olduğunu söylemek mümkündür.



Figure 35. Foot section design

Ayak bölümü tüm sistemi taşıyan en alt bölümdür. Atış sırasında makinanın rijit olması önemlidir. Bu rijitliği sağlamak üzere makine atış sırasında 8 adet endüstriyel makine ayağı üzerinde çalışmaktadır. Ayak bölümü silah tablasını kullanıcının işini kolaylaştırmak için belli bir yükseklikte tutmakta ve aynı zamanda bu bölüm sayesinde kontrol bölümü de yerden yükselebilmektedir. Makinanın hareket ettirilmesini kolaylaştırmak için test bittikten sonra ayak bölümünde bulunan teker mekanizma basamağına basılarak katlanmakta ve dört adet teker açılmakta ve makine tekerler üzerinde hareket etmektedir. Gerektiğinde ise mandal yardımıyla kapatılarak ayaklar üzerine oturmaktadır. Ayak bölümü genel yapısı Şekil 35'de verilmiştir. Ayak bölümü tüm sistemleri taşıyan bölüm olduğundan yön bölümü ile her temas noktasından 100kgF ile tepme yönüne göre de 50kgF kuvvet ile statik analize tabii tutulmuştur. Elde edilen gerilme ve yer değiştirme sonuçları Şekil 36-37'de verilmiştir



Şekil 36. Ayak bölümü kullanım pozisyonunda statik analiz sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları

Figure 36. Static analysis results in foot section usage position a. Stress results b. Displacement results



Şekil 37. Ayak bölümü teker üzerindeyken statik analiz sonuçları a. Gerilme sonuçları b. Yer Değiştirme Sonuçları
 Figure 37. Static analysis results when the foot section is on the Wheel a. Stress results b. Displacement results

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Makine tablasına bağlanan test silahının ateşleme sonucunda vereceği geri tepme kuvveti 100 N ve şahlanma momentine sebep olan kuvvet ise 50 N olarak kabul edilmiştir. Silahın atışını simule etmek için her atış 0.1 s sürmektedir. Atışların zamanı simülasyon senaryosuna göre belirlenmiştir. Silahın ateşlenmesi test makinasının kontrolü açısından bozucu giriş olarak kabul edilmiştir. Bozucu girişler, makinanın maksimum açılarında daha etkili olacağından dolayı maksimum açılarda simülasyonlar yapılmıştır. Belirlenen senaryoya göre bozucu girişlerin yani tepme ve şahlanma kuvvetlerinin grafikleri Şekil 38-39'da verilmiştir.



Grafiklerden anlaşılacağı üzere test atışları yani bozucu girişler 6, 12.1, 18.2 ve 24.3'üncü saniyelerde gerçekleşmektedir. Huğlu marka HTB model 12 gauge bir av tüfeği silah tablasına bağlandıktan sonra makinanın izin verilen maksimum açılara getirilerek ateş edilmesiyle oluşan bir senaryoya göre otomatik kontrol yapılmıştır. Bu açılarda makinanın test edilmesinin sebebi geri tepme kuvvetinin makinaya tesirinin en fazla olduğu noktaların maksimum açılarda olmasıdır. Yani bozucu etki en fazla maksimum açılarda naşılarda otomatik kontrol yapılarak daha az açılarda oluşan

bozucu etkilere karşı tablanın kontrolü gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bu senaryo Şekil 40'da gösterilmiştir



Öncelikle tabla orijin doğrultusundan (OE) 1. atış doğrultusuna (OA) gidecektir. 1. atışı gerçekleştirip, sırasıyla 2. (OB) 3. (OC) 4. (OD) atış doğrultularına giderek atış yapacaktır. Atışları tamamladıktan sonra orijin doğrultusuna (OE) dönecektir. Bu senaryoda her atıştan sonra ve önce birer saniye bekleyecektir. Yükseklik ve yön mafsallarındaki hızlar 5 derece/s 'dir. Hızın daha önce belirtilen hızlardan kat ve kat fazla olmasının nedeni senaryoyu kısaltmak ve yüksek hızlarda kontrolü sağlamaktır. Belirlenen senaryoya göre yön mafsalının derece cinsinden referans konum değişimi Şekil 41'de verilmiştir.



Figure 41. Direction joint reference position change

Belirlenen senaryoya göre yükseklik mafsalının derece cinsinden referans konum değişimi Şekil 42'de verilmiştir. Sistemin Matlab/Simulink programında oluşturulan kontrol blok diyagramı Şekil 43'de verilmiştir. Makinanın yön ve yükseklik konum kontrolü aşağıda verilen diyagrama göre gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü olarak PID (oransal+integral+türev) kontrol kullanılmıştır. PID kontrol

kazanç parametreleri konum cevaplarına göre optimize edilmiş ve $K_P = 22$, $K_i = 8$, $K_d = 2,5$ olarak bulunmuştur.



Şekil 43. Test makinasının Matlab/Simulink kontrol blok diyagramı Figure 43. Matlab/Simulink control block diagram of the test machine

Yön mafsalı ve yükseklik mafsalının PID kontrollü konum cevapları Şekil 44 ve Şekil 45'de verilmiştir. Konum kontrolü sonuçlarına göre bazı noktalarda kalıcı durum hatası meydana geldiği görülmektedir. Fakat atış için durulan anlarda referans sinyali yakalanarak doğru pozisyonda atış yapılmakta bu durumda kontrol sağlıklı şekilde gerçekleşmektedir. Bozucu girişlerin grafiklerden okunacağı üzere hareketlere herhangi bir etkisi görülmemektedir. Bu durumda silah atışlarında oluşan kuvvetlerin vidalı mil tarafından sönümlendiği söylenebilir.



Bozucu giriş olarak tanımlanan dört adet test atışının sebep olduğu tabla hareketinin konum değişimi Şekil 46'da verilmiştir.



Figure 44. Position change of the gun table

4. YORUMLAR ve ÖNERİLER (COMMENTS AND SUGGESTIONS)

Bu çalışma kapsamında; silah ateşlenmesinde oluşan tepme kuvvetini ve şahlanma momentini ölçebilen, iki serbestlik dereceli, gelen kuvvetleri sönümleyebilen rijit bir test makinasının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak özgün tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen tasarımın literatürde yer alan test makinalarından tamamen farklı olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca test makinasının prototip imalatı için oldukça önemli teknik bulgular elde edilmiştir. Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifi desteği ile prototip imalatına başlanan test makinası sayesinde av tüfeği ve savunma sanayi sektöründe geliştirilen tüfeklerin testleri yapılarak elde edilecek mühendislik sonuçları ile daha konforlu ve performanslı silahların tasarlanması mümkün olacaktır.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Çalışmanın içeriği tüm etik standartlarına ve kurallarına uymaktadır.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Orhan KOÇ: Başlıca yazar Mustafa TINKIR: Makaleden sorumlu yazar

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Çalışmada her hangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Çalışmaya büyük katkılarından dolayı Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifine ve Mekatronik Mühendisi Kübra KÖSEMEN'e teşekkür ederiz.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Makalede kullanılan veriler yazarlar ve Huğlu Av Tüfekleri Kooperatifine ait olup paylaşıma açık değildir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Y.A. Çengel and M. A. Boles, Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. Yayıncı. Palme Yayıncılık, 1 Ağustos 2013 ; ISBN-10. 6053551627 ; ISBN-13. 978-6053551621.
- [2] M. Ahmadian and J. C. Poynor, "An evaluation of magneto rheological dampers for controlling gun recoil Dynamics", Shock and Vibration, vol. 8, pp. 147–155, 2001.
- [3] M. Craig, "Testin machine", U.S. Patent Office, Feb. 1, 1921.
- [4] N. Benson, "Process and apparatus for catching machine gun bullets", US Patent Office, Aug. 15, 1950.
- [5] G. E. McPherren, "Machine gun testing device", US Patent Office, May 29, 1951.
- [6] H. J. Singh and N. M. Wereley "Optimal control of gun recoil using magnetorheological dampers". In Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Vol.45103, pp. 441-450, 2012.
- [7] H. J. Singh and N. M. Wereley. "*Optimal control of gun recoil in direct fire using magnetorheological absorbers*", Smart materials and Structures, 23(5), pp.55-70, 2014.
- [8] Q. Ouyang, J. Zheng, Z. Li, M. Hu and J. Wang, "Controllability analysis and testing of a novel magnetorheological absorber for field gun recoil mitigation", Smart Materials and Structures, 25(11), 115041, 2015.
- X. Y. Liu, D. Wu, J. Hou, "Design and analysis of a scheme for the naval gun test shell entering the bore", Defence Technology, Volume 17, Issue 4, Pages 1374-1386, 2021.
- [10] D. K. Noh, Y. K. Kang, J. D. Ji, J. S. Park, J. S. Jang, "Case of Developing Analysis Model for Recoil System for Automatic Gun", Journal of the Korea Society for Simulation. Vol. 24, No. 4, pp. 35-41, 2015.
- [11] S. R. Hong, N. M. Wereley, Y. T. Choi and S. B. Choi, "Analytical and experimental validation of a nondimensional bingham model for mixed mode magnetorheological dampers". J. Sound Vib. Vol. 312, pp. 399–417, 2008.
- [12] H. Hongsheng, W. Jiong, Q. Suxiang, L. Yancheng and J. Xuezheng, "Investigation on controllability of a magnetorheological gun recoil damper", Int. Conf. on Information and Automation, pp 1044–1049, 2009.
- [13] Z. C. Li and J. Wang, "*A gun recoil system employing a magnetorheological fluid damper*", Smart Mater. Struct. Vol. 21,105003, 2012.
- [14] M. Mao, W. Hu, Y. T. Choi, N. M. Wereley, A. L. Browne and J. Ulicny, "Experimental validation of a magnetorheological energy absorber design analysis", J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 25, pp. 352– 63, 2014.



KEKİK YAĞI İLE HAZIRLANMIŞ BİYOPOLİMER KOMPOZİT FİLMLER VE BU FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

^{1*}Ülkü SOYDAL^(D), ²Fadim SÖYLEMEZ GÜNBATTI

Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Konya, TÜRKİYE ¹usoydal@selcuk.edu.tr, ²soylemezfadim@gmail.com

(Geliş/Received: 24.10.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.01.2023)

Önemli Katkılae (Highlights)

- Akrilatlanmış epoksitlenmiş soya yağı, kekik yağı ve nanokil ile nanokompozit filmler elde edilmiştir.
- Biyofilm ve nanokompozitlerin antibakteriyel aktiviteleri belirlenmiştir.
- Su buharı geçirgenlik özellikleri, pH, şişme-çözünürlük-su içeriği incelenmiştir.



KEKİK YAĞI İLE HAZIRLANMIŞ BİYOPOLİMER KOMPOZİT FİLMLER VE BU FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

^{1*}Ülkü SOYDAL⁰, ²Fadim SÖYLEMEZ GÜNBATTI

Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoteknoloji Bölümü, Konya, TÜRKİYE ¹usoydal@selcuk.edu.tr, ²soylemezfadim@gmail.com

(Geliş/Received: 24.10.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.01.2023)

ÖZ: Bu çalışmada, tamamen yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilen kompozit filmler üretmek için; akrilatlanmış epoksitlenmiş soya yağı (AESO) polimer matris olarak kullanılmıştır. Bu biyobazlı matris yapıya öncelikle antibakteriyel özelliği kanıtlanmış bir esansiyel yağ olan kekik yağı (KY), farklı oranlarda (kütlece %0, %1, %2, %3, %4, %5) ilave edilmiştir. Elde edilen filmlerin antibakteriyel özellikleri incelenmiş ve en uygun oran belirlenmiştir. Bu oran sabit tutularak çalışmanın ikinci aşamasında farklı oranlarda (kütlece %1, %2, %3, %4, %5) nanokil (NK) ilavesi ile nanokompozit filmler hazırlanmıştır. Elde edilen malzemelerin antibakteriyel aktivite testleri yapılmış, su buharı geçirgenlik özellikleri incelenmiş, ayrıca pH, şişme-çözünürlük-su içeriğine bakılmıştır. Su içerisinde şişme oranı ortalama %0,2437-2,1500 arasında belirlenirken, suda çözünürlük oranı %0,1550-0,3100 aralığında olmuştur. Su sorpsiyonu ise %0,6633-0,8917 aralığında değerler almıştır. 72 saat sonunda pH değerleri 7,23-7,29 aralıklarında ölçülmüş ve bu değer cilt pH'ı ile uyumlu bulunmuştur. Son olarak su buharı geçirgenliği testinde 1381,9- 2,1357x10⁻¹⁰ g.m/(m^{2*}Pa*s) aralığında kaydedilen değerler, filmlerin oldukça düşük bir su buharı geçirgenliğine sahip olduklarını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kekik Yağı, Antibakteriyel Aktiflik, Nanokil, Biyobazlı Film Kompozit

Investigation of the Properties of Biopolymer Composite Films Prepared with Thyme Oil

ABSTRACT: In this study, to produce fully renewable and biodegradable composite films; acrylate epoxidized soybean oil (AESO) was used as the polymer matrix. Thyme oil (TO), an essential oil with proven antibacterial properties, was added to this biobased matrix structure at different rates (0, 1, 2, 3, 4, and 5 wt%). The antibacterial properties of the films obtained were examined and the most suitable ratio was determined. The antibacterial properties of the films were investigated and the most suitable TO ratio was determined. In the second stage of the study, the amount of TO was kept constant and nanocomposite films were obtained by adding nanoclay (NC) at different weight ratios (1, 2, 3, 4, and 5 wt%). The antibacterial activity tests of the obtained materials were carried out, their water vapor permeability properties were examined, and also pH, swelling-solubility-water content were examined. While the swelling ratio in water is determined between 0,2437-2,1500%, the water solubility ratio is between 0,1550-0,3100%. In water content, values were in the range of 0,6633-0,8917%. After 72 hours, pH values were measured between 7,23-7,29 and this value is compatible with skin pH. Finally, the values recorded in the range of 1381,9-2,1357x10-10 g.m/(m²*Pa*s) in the water vapor permeability test showed that the films had a very low water vapor permeability.

Keywords: Thyme Oil, Antibacterial Activity, Nanoclay, Biobased Film Composite

*Corresponding Author: Ülkü SOYDAL, usoydal@selcuk.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel epoksi reçineler, otomobil, havacılık ve gemi yapımında, elektronik cihazlarda, paketleme ve diğer sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanokompozitlerde matris olarak tercih edilen yüksek düzeyde çapraz bağlı epoksi reçinelerin sahip oldukları yüksek sertlik ve mukavemete rağmen kırılganlık gibi plastik deformasyonu, birçok uygulama için önemli bir malzeme kusuru haline gelebilir [1]. Öte yandan, geleneksel epoksi reçinelerin doğada geri dönüştürülmesi zordur. Biyobozunur olmayan ısıyla sertleşen malzemeler olarak kategorize edildikleri için genellikle atık olma eğilimindedir [2]. Fosil yakıt stoğunun tükenmesi, plastik atıkların artması günümüzde çevresel açıdan sürdürülebilir olmayan sorunlar olarak ciddiye alındığında, petrol bazlı polimerleri mükemmel yenilenebilirlik ve maliyet etkinliğine sahip doğal biyopolimerlerle ikame etmek veya hatta değiştirmek için acil bir talep vardır [3].

Soya fasulyesi yağı (SO), yeni biyoplastikler için yüksek potansiyele sahip hammaddelerden biridir. Modifiye SO, plastik levha kalıplama bileşikleri, kaplamalar ve yapıştırıcılar dahil olmak üzere birçok uygulamada umut verici bir alternatiftir. Epoksitlenmiş soya yağı (ESO) ise düşük maliyetli bir epoksi bileşiğidir. Aynı zamanda dahil olduğu kompozitin biyobaz içeriğini artırırken epoksi reçinenin de dayanıklılığını artırmaktadır [4]. ESO'nın bir polimer kompozit yapı içerisinde kullanılması kompozitin fiziksel ve mekanik (çekme mukavemeti, darbe dayanımı, kopmada uzama gibi) özelliklerini iyileştirmektedir [5-7]. Ayrıca çapraz bağlama yoğunluğunun kilit faktörlerden biri olarak hareket etmekte, bu nedenle çok ince bir ESO tabakasıyla bile iyi bir su direnci elde edilebilmektedir [8]. Tanrattanakul ve Saithai'nin 2009'da yaptıkları bir çalışmada akrilatlanmış epoksitlenmiş soya yağı (AESO)'nın ESO'dan daha yüksek mekanik özellikler gösterdiğini kaydetmişlerdir [4]. Bundan başka; nihai kompozitin termal kararlılığının [5, 7, 9-12] ve korozyon direncinin arttığı [5, 13] ve son olarak yapının adezyon özelliğini artırdığı [12] kaydedilmiştir.

Kompozit filmlerin fizikokimyasal özelliklerini iyileştirmek veya değiştirmek için nano boyutlu kil, metal veya metalik oksitler gibi nanolifler, polimer, polimer kombinasyonları, antioksidan/antibakteriyel özellik kazandıran malzemelerin kullanımına yönelik parametreler denenmektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte temizlik konusuna olan bakış açımız ve beklentilerimiz de artmıştır. Özellikle kullanıma sunulan ambalaj gibi materyallerin antibakteriyel özelliği taşıması günümüzde giderek ilgi çekmeye başlamıştır. Tıbbi ve aromatik bitkilerin kök, gövde ve yaprak gibi çeşitli kısımlarından presleme ya da destilasyon gibi yöntemlerle elde edilen esansiyel yağlar (uçucu yağlar) belli oranlarda antibakteriyel özellik taşıyabilmektedir. Bu uçucu yağlar kullanılarak bazı yüzeylerde antibakteriyel yapı oluşturmak mümkündür. Antimikrobiyal etkisi belirlenmiş olan esansiyel yağlardan biri de kekik yağıdır [14].

Polimer nanokompozitler genellikle saf polimerlerden önemli ölçüde farklı olup daha iyi özellikler sergilerler. Polimer nanokompozitlerin özellikleri, dahil edilen nanoparçacıkların şekli, boyutu, konsantrasyonu ve polimer matrisi ile etkileşimleri tarafından yönetilir. Nano dolgu maddelerinin eklenmesi, bazen geleneksel dolgu maddeleri ile sinerji içinde, fiziksel, mekanik, optik, elektriksel ve termal özellikler dahil olmak üzere malzemelerin değişken özelliklerini önemli ölçüde iyileştirirler. Kil malzemeleri ticari olarak temin edilebilir, ucuzdur, aşındırıcı değildir ve doğası gereği geri dönüştürülebilir. Kompozitlerde kullanılan nanotakviye türlerinden en yaygın olanı ise nanokillerdir. Nanokiller genellikle yaklaşık 1 nm kalınlığında, bir boyutta yaklaşık 50-150 nm yüzeylerde bir fillosilikat veya tabaka yapısına sahip bir kil mineralidir [15-16].

Günümüzde nanokillerin en önemli uygulamalarından biri polimer-kil nanokompozitlerin üretimidir. Pek çok araştırmacı, kolay bulunabilirliği nedeniyle hibrit polimerik kompozitlerde ve bunların laminatlarında dolgu maddesi olarak montmorillonit (MMT) nanokil kullanmıştır [17-18]. MMT'nin küçük bir miktarının (kütlece %0.5-5.0) dahil edilmesi, polimeri modifiye ederek, geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında elde edilen kompozitin fiziksel, mekanik, kırılma, aşınma direnci, termal stabilite, alev geciktirici, biyouyumluluk ve kimyasal özelliklerinde kayda değer bir iyileşme olmuştur [19-21]. Nanokiller ayrıca plastik endüstrisi ürünlerinin yangın güvenliğini artırmak için onlarda alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Nanokilleri plastiğe entegre etmek, yanmayı önleyen

koruyucu bir tabaka aracılığıyla yanıcı malzeme miktarını ve yangının yayılmasını büyük ölçüde azaltır [9].

Yapılan çalışmada, ilk kez elde edilen AESO bazlı kompozit filmlerine belli oranlarda ilave edilen NK, biyobazlı matriste takviye malzemesi olarak kullanılırken, KY ile de antibakteriyel özellik kazandırılması amaçlanmıştır. Tamamen yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilen yeni kompozit filmler üretmek için; polimerik matris ve takviye malzemesi, yenilenebilir kaynaktan elde edilmiştir. Sonuç olarak katı atık oluşturmayan, doğada çözünürken çevreye zarar vermemesi beklenen bir malzeme olması planlanmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyaller (Materials)

Çalışmada matris olarak akrilatlanmış epoksitlenmiş soya yağı (AESO) (yoğunluk: 1.04 g/cm³; vizkozite: 18,000–32,000 cps) (Sigma-Aldrich) (Şekil 1a) kullanılmıştır. Kekik yağı (KY) olarak Gaziantep ve Hatay çevresinde yetişen bir kekik türü olan Zahter kekik yağı kullanılmıştır (Hatay ili Semir Eraslan Baharat). Çalışmada kullanılan mikroorganizma suşları Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoteknoloji bölümünden temin edilmiştir. Kürleştirici olarak iki tür ajan kullanılmıştır. Birincisi IPOX EH 2041(TAD 305-335 mgKOH/g) bir poliamin türü kürleme ajanıdır (Sar Chemical Co.'dan (Türkiye)). İkinci ise UV kürleştiricidir: Irgacure 184 bir radikalik fotobaşlatıcıdır)(Sigma-Aldrich) (Şekil 1b). Hızlandırıcı olarak 2,4,6-tris(dimetil amino metil) fenol (C15H27N3O⁻ yoğunluk: 25°C'de 0,969 g/cm³) kullanılmıştır.



Şekil 1a. Akrilatlanmış epoksitlenmiş soya yağı (AESO) Figure 1a. Acrylated epoxidized soybean oil (AESO)



Şekil 1b. UV kürleştirici : Irgacure 184 Figure 1b. UV curing agent: Irgacure 184

Montmorillonit yapıya sahip nanokil (NK) (saflık: %99,9; boyut: 800 nm), Nanografi Co. Ltd. (Türkiye) tarafından geliştirilmiştir. Tetrametilamonyum klorür (TMAC) Merck (Darmstadt, Almanya) tarafından sağlanmıştır.

2.2. Yöntem (Method):

2.2.1. Nanokilin (NK) Hazırlanması (Preparation of nanoclay)

NK modifikasyonu için tetrametil amonyum klorür (TMAC) kullanılmıştır. NK ilk olarak saf su içinde 30 dakika mekanik karıştırma ile safsızlıklardan uzaklaştırılmıştır. Daha sonra 5g/0.5 L TMAC çözeltisi damla damla ilave edilerek 24 saat oda sıcaklığında karıştırmaya devam edilmiştir. Modifikasyondan sonra NK, santifuj yardımıyla çöktürülerek, klorür iyonlarından arındırılıncaya kadar

distile su ile yıkanmış olup, yıkama suyundan CI- iyonlarının tamamen uzaklaştığını kontrol etmek için 0.1 M 100 mL gümüş nitrat (AgNO₃) çözeltisi kullanılmıştır. Son olarak 60°C sıcaklıktaki etüvde 48 saat kurutma işlemi uygulanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. NK'nin modifikasyon aşamaları *Figure 2.* NC modification steps

2.2.2. Kompozitlerin Hazırlanması (Preparation of Composites)

Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada:

AESO ve kütlece % 0, 1, 2, 3, 4, 5 oranlarında KY behere alındıktan sonra 200 rpm'de ve 25°C'de 15 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Daha sonra önceki çalışmamızda belirlemiş olduğumuz kütlece %4 oranında Irgacure 184 fotobaşlatıcısı [22] ve %30 oranında IPOX ilave edilerek cam baget ile köpük oluşturmayacak şekilde karıştırılmıştır. Ultrasonik banyoda 15 dakika kabarcıkların giderilmesi için bekletilmiştir. Numuneler jel dökme yöntemiyle 10x10x0,5 cm ebatında kestirilen teflon yüzey malzemesine ve mikrobiyolojik analiz için petri kaplarına yerleştirilmiştir. UV kürleme cihazında filmlerin her iki yüzü 6 dakika kürlendikten sonra vakumlu etüvde 100°C'de 24 saatte kürlenme tamamlanmıştır. Antibakteriyel analiz sonucu en uygun KY oranı belirlenmiştir.

Bir önceki sette uygun görülen KY oranı sabit tutularak AESO ve NK ile (matrisin kütlece % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranında) 200 rpm'de ve 25°C'de 15 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Yapılan diğer işlemler ilk aşama ile aynıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Nanokompozit film yapım aşamaları *Figure 3.* Nanocomposite film production steps

2.2.3. Analiz ve Testler (Analysis and Tests)

2.2.3.1. Bakteriyolojik analiz (Bacteriological analysis)

AATCC TM 147-1998'de açıklanan agar difüzyon yöntemi kullanılarak test edilmiştir. Antibakteriyel aktivite iki farklı bakteri: Gram negatif (*Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa*) ve Gram pozitif (*Staphylococcus aureus*) bakterilere karşı değerlendirilmiştir. 0,9 cm çapındaki numune, her iki taraftan 10 dakika boyunca UV ışığı altında sterilize edilmiş ve daha önce bir test bakterisi aşılanmış agar yüzeyine nazikçe yerleştirilmiştir. 37°C'de 24 saat inkübasyondan sonra, numunenin veya antagonistik zone bölgesi sınırları boyunca çapları ölçülmüştür.

2.2.3.2. Su buharı geçirgenliği testi (Water vapor permeability test)

Film numunelerinin su buharı geçirgenlik değerlerini belirlemek için ASTM E96'ya göre kurutucu yöntemi uygulanmıştır. Numune, 2,5x10⁻⁴m² bir yüzey alanına sahip dairesel bir şekilde kesilmiş ve 1±%1 bağıl nem sağlayan, kurutulmuş silika jel ile doldurulmuş silindirik camın üzerine yerleştirilmiştir. Numuneler daha sonra para film ile camla tamamen kapatılmış ve % 75±1 bağıl nem değerine ulaşmak için doygun NaCl çözeltisi ile doldurulmuş bir desikatöre yerleştirilerek bir saatlik aralıklarla ağırlık değişimleri kaydedilmiştir. Film örneklerinin su buharı geçirgenlikleri (SBG) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

SBG= w/t*L/ΔP/A
w/t =Kararlı durumda kütlelerin zamana karşı grafiğinden elde edilen regresyon katsayısı
A= film alanı (m2)
L= ortalama film kalınlığı (m)
ΔP= filmin her iki yüzü arasındaki kısmi su buharı basınç farkı (Pa)

2.2.3.3. Çözünürlük-şişme- su içeriği testleri (Solubility-swelling-water content tests)

Çözünürlük-şişme-su içeriği testleri için iki farklı setten 1,5 cm çapında diskler hazırlanmıştır. Film örneklerinin ilk ağırlıkları tartılmış (W1) ve etüvde bir gün boyunca 70°C'de bekletilmiştir (W2). Numuneler 20 ml saf su içerisinde 24 saat sonrası yaş ağırlıkları alınmıştır (W3). Son olarak tekrar etüvde bir gün boyunca 70°C'de bekletilerek son tartımı alınmıştır (W4). Elde edilen değerler aşağıdaki formüller kullanılarak filmlerin çözünürlük-şişme-su içerikleri belirlenmiştir.

% Su içeriği = (W1-W2)/(W1) x 100

%Şişme = (W3-W2)/(W2) x 100

% Çözünürlük = (W2-W4)/(W2) x 100

Her bir film kompozisyonu için şişme, çözünürlük ve su içeriği analizi en az 3 defa tekrar edilmiş ve bulunan değerlerin istatiksel olarak analizleri yapılmıştır.

2.2.3.4. pH Testleri (pH Tests)

25x25mm ebatında kesilmiş film örneklerinin pH ölçümü, 20 mL %0,9 NaCl çözeltisinde 72 saat bekletilerek gerçekleştirilmiştir. 24 saat aralıklarla alınan pH değerleri tabloya geçirilmiştir.

2.2.3.5. İstatistik Analizleri (Statistical Analysis)

Veriler, MINITAB® release 17.0 programında tek yönlü ANOVA kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen ortalama analitik değerler, p<0.05'de Tukey çoklu aralık testi kullanılarak anlamlı farklılıklar açısından karşılaştırılmıştır.

3. BULGULAR ve SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

3.1. Bakteriyolojik Analiz (Bacteriological analysis)

Çalışmada kompozit filmlerin bakteriyolojik analizleri için kullanılan *Staphylococcus aureus* (Gram+), doğal olarak insanların burnunda ve boğazında ayrıca cilt yaralarında bulunabilmektedir. Çevre koşullarına dayanıklıdır ve birçok enfeksiyona neden olabilmektedir. Özellikle gıda kaynaklı zehirlenmelerde önemli bir rolü bulunmaktadır [23-24]. Hayvansal ve hastane kaynaklı enfeksiyonlarda, gıda zehirlenmelerinde ve su kirliliğine etken olan en önemli patojenlerden biri olan *Escherichia coli* (Gram-), ortamda kolaylıkla yayılabilmektedir [25]. Klinik olarak, *E. coli* tüm yaş gruplarında diyare, idrar yolu enfeksiyonları, bakteriyemi, menenjit, septisemi ve pnömoni dahil olmak üzere çeşitli klinik hastalıklara neden olabilir [26]. *Pseudomonas aeruginosa* (Gram-) ise yanık yarası enfeksiyonları, bakteriyemi, hastane ve ventilatör ile ilişkili Pnömoni dahil nozokomiyal enfeksiyonlara ve ayrıca kistik fibroz enfeksiyonuna neden olabilen bir bakteri türüdür [27].

Kekiğin yapısında esansiyel yağlardan karvakrol (%80'e kadar değişen oranlarda), timol (%64'e kadar değişen oranlarda), γ-terpinen, p-simen, linalool, terpinen-4-ol ve sabinen hidrat bulunur. Karvakrol ve timol kekikte majör bileşenlerdendir ve antiseptik (fenolden 20 kat fazla), antifungal ve antibakteriyel özellik göstermesinin en temel nedenidir [28-29]. AESO polimer film içerisindeki kekik yağı oranı ile oluşan zone görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre ölçülen inhibisyon çapları ise Çizelge 1'de görülmektedir.



Şekil 4. Polimer film içerisindeki KY oranı ile oluşan zone görüntüleri (a): Gram pozitif, (b) Gram negatif bakterileri

Figure 4. Zone images formed by the ratio of TO in the polymer film (a): Gram positive, (b) Gram negative bacteria

KY oranı	İnhibisyon canı (mm)			
(kütlece %)	S.aureus Gram (+)	<i>E.coli</i> DH5a Gram (-)	P.aeruginosa Gram (-)	
0	x	x	x	
1	10,498±0,057 ^в	10,002±0,158 ^D	10,550±0,505 ^C	
2	10,540±0,010 ^в	11,200±0,592 ^c	10,540±0,513 ^c	
3	11,238±0,102 ^в	11,442±0,516 вс	11,422±0,548 вс	
4	13,244±0,687 ^A	12,050±0,405 AB	11,748±0,220 в	
5	13,440±0,450 A	12,340±0,428 A	12,022±0,677 A	

Çizelge 1. Polimer film içerisindeki KY oranı ile inhibisyon çapı değişim tablosu *Table 1. Inhibition diameter change table with the ratio of TO in the polymer film*

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05)

Çizelge 1'den KY içermeyen kontrol filmlerinde hiçbir inhibisyon bölgesi olmadığı anlaşılmaktadır. İstatistiksel olarak, Gram pozitif olan *S.aureus* bakterisinden inhibisyon çapı, KY oranı %1 den %3 olana kadar önemli bir artış olmazken %4 te önemli miktarda artmış, %4'ten %5'e olan artış ise istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (p<0.05). Gram negatif bakterisinden olan E.*Coli* bakterisinde KY oranı arttıkça inhibisyon çapının da arttığını, *P.aeruginosa* bakterisinde ise KY oranının %3'ten sonra anlamlı bir artış olduğu görülmektedir (p<0.05). KY'nin yüksek oranda sahip olduğu fenolik bileşikler ile bakterinin hücre duvarına yapışarak, hücre membran bütünlüğünü bozduğu ve bu mekanizma aracılığıyla mikroorganizmaları inhibe etmektedir [30]. Genel olarak Gram pozitif ve Gram negatif bakterilerine karşı benzer bir antibakteriyel özellik gözlenmiş olsa da %5 KY içeren film, Gram pozitif olan *S.aureus* bakterilerine karşı 13,440 mm'lik inhibisyon çapı ile en yüksek bakteriyostatik etkiyi göstermiştir. Nitekim Marino ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kekik esansiyel yağının antimikrobiyal etkisinin Gram (+) bakteriler üzerinde Gram (-) bakterilerden daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir [31]. Daha önceki birçok çalışmada da elde edilen sonuçlar bizim sonuçlarımızı desteklemektedir [32-34].

AESO polimer film yapıya en fazla %5 oranında KY ilavesi yapılabilmiştir. Daha fazla ilave yapılması kompozit yapı bütünlüğünü bozarak film yapıyı elde etmede zorluk oluşturmuştur. Antibakteriyel açıdan %4 ile %5 KY oranı arasında anlamlı bir fark olmadığından çalışmanın ikinci aşamasında %4'lük oran sabit tutulmuş ve farklı oranlarda NK (kütlece %1, %2, %3, %4, %5) ilavesi ile nanokompozit filmler hazırlanmıştır. Kil minerali yapısı itibariyle hidrofilik yapıdadır. Buna karşın polimer molekülleri genellikle hidrofobik yapıya sahiptir. Kilin modifikasyonu işlemi, bu iki farklı yapıya sahip olan malzemelerin birbiri ile uyumunu artırmak için polimer nanokompozit çalışmalarında uygulanan yaygın bir yöntemdir [35]. Şekil 5'te AESO polimer kompozit filmlerinin artan NK oranına karşı oluşan zone görüntüleri verilmiştir. Çizelge 2'de de ölçülen inhibisyon çapları özetlenmiştir.



Şekil 5. Polimer kompozit film sabit KY içeren artan NK oranına karşı oluşan zone görüntüleri: (a) Gram pozitif, (b) Gram negatif bakterileri

Figure 5. Zone images of polymer composite film containing fixed HF against increasing NK ratio: (a) Gram positive, (b) Gram negative bacteria

Çizelge 2'ye göre %1 oranda NK ilave edilmiş kompozit filmler, bakteriyolojik olarak üç bakteri türünden de hiç etkilenmemiştir. Daha fazla nanokil ilavesi ile Gram pozitif olan *S.aureus* bakterisi %3 NK oranına kadar istatistiksel olarak önemli bir değişiklik olmayıp %5 NK ilavesi ile inhibisyon çapındaki azalma istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (p<0.05). Gram negatif bakterinden *E.coli* **DH5a'**ye bakarsak, %3 ve sonrası zon çapındaki azalma istatistiki açıdan önemli bulunmuş olup daha fazla NK ilavesinin istatistiksel açıdan antibakteriyel özellik etkisini önemsiz oranda azalttığı gözlemlenmiştir (p<0.05). Son olarak *P.aeruginosa* bakterisine karşı oluşan inhibisyon çapı %3 NK ilavesine kadar istatistiksel açıdan önemli bulunmazken %5 NK ilaveli nanokompozit filmin antibakteriyel özelliğindeki azalma istatistiksel olarak önemli olarak kaydedilmiştir (p<0.05).

NK oranı	İnhibisyon çapı (mm)		
(kütlece %)	S.aureus Gram (+)	E.coli DH5a Gram (-)	P.aeruginosa Gram (-)
0	13,244±0,450 ^A	12,050±0,428 ^A	11,748±0,677 ^A
1	13,440±0,450 ^A	12,040±0,428 ^A	11,742±0,677 ^A
2	13,036±0,365 ^{AB}	11,950±0,517 AB	11,700±0,417 AB
3	12,240±0,694 вс	11,580±0,480 ^в	11,650±0,644 вс
4	12,038±0,698 ^{BC}	11,340±0,416 в	11,590±0,468 ^{BC}
5	11,720±0,566 ^c	11,200±0,592 ^в	11,120±0,602 ^C

Çizelge 2. %4 KY içeren polimer filmin artan NK oranı ile inhibisyon çapı değişim tablosu *Table 2. Inhibition diameter change with increasing NC ratio of polymer film containing 4% TO*

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05).

3.2. Çözünürlük-şişme-su içeriği testleri (Solubility-swelling-water content tests)

Çizelge 3(a)'ya göre film yapısı içerisinde KY oranı arttıkça istatistiksel açıdan şişme oranında önemli bir artış kaydedilmiştir (p<0.05). KY miktarının artmasıyla AESO filmlerinin şişme değerlerinin sayısal olarak artması KY bileşenlerindeki hidroksil gruplarından kaynaklanabileceği düşünülmüştür [36]. Film yapıya % 4 NK ilavesine kadar istatistiki açıdan önemli bir şişme gözlenmezken %4 ve sonrası ve bir miktar şişme kaydedilmiştir (p<0.05) (Çizelge 3(b)). Kil, yapısı gereği suyu emme özelliğine sahiptir [37]. Bu nedenle kompozit yapıda kil oranı arttıkça bir miktar su çekmesi beklenen bir durumdur.

KY oranı	Şişme oranı	NK oranı	Şişme oranı
(kütlece %)	(%)	(kütlece %)	(%)
0	0,2437±0,0100F	0	1,5043±0,0129 ^c
1	1,2160±0,0101 ^E	1	1,5133±0,0208 ^c
2	1,3467±0,0153 ^D	2	$1,5600\pm0,0458^{BC}$
3	1,4190±0,0165 ^c	3	1,6067±0,0751 ^{BC}
4	1,5043±0,0129 ^в	4	1,9333±0,1528AB
5	1,5823±0,0108 ^A	5	2,1500±0,3279 ^A

Çizelge 3. (a) Artan KY oranının şişme oranına etkisi, **(b)** sabit %4 KY içeren ve artan NK oranına karşı şişme oranı değişimi

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05)

Çizelge 4. (a) Artan KY oranının suda çözünürlük oranına etkisi, **(b)** %4 KY içeren polimer filmin artan NK oranına karşı sudaki çözünürlüğünün değişimi

 Table 4(a). The effect of increasing TO ratio on water solubility ratio, (b) Change of water solubility of polymer film containing 4% TO against increasing NC ratio

KY oranı	Suda çözünürlük oranı	NK oranı	Suda çözünürlük oranı
(kütlece %)	(%)	(kütlece %)	(%)
0	0,15500±0,00500 ^A	0	0,25000±0,04583 ^A
1	0,24333±0,05132 ^A	1	0,25333±0,05033 ^A
2	0,24000±0,01732 ^A	2	0,26333±0,04726 ^A
3	0,25333±0,05033 ^A	3	0,27667±0,03215 ^A
4	0,25000±0,04583 ^A	4	0,28000±0,02646 ^A
5	0,26333±0,04726 ^A	5	0,31000±0,08544 ^A

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05)

Çizelge 4(a)'da görüldüğü gibi AESO'nın suda çözünürlük özelliği düşüktür. KY oranının artmasıyla istatistiksel olarak çözünürlüğündeki artış önemsiz bulunmuştur (p<0.05). Yapıya NK ilavesi yapılması da suda çözünürlük oranını önemsiz oranda artırdığı görülmektedir (Çizelge 4(b)).

Filmlerin çözünürlük değerleri, eklenen katkı maddelerinin doğasına, konsantrasyonuna ve bu katkı maddelerinin hidrofilik ve hidrofobik indekslerine bağlı olarak farklılık gösterir. Hidrofilik özellik arttıkça çözünürlüğün de artması beklenir [38]. Sonuç olarak kompozit film yapısı içerisinde KY ve NK oranı arttıkça hidrofobik yapının bozulmadığı söylenebilir.

Çizelge 5. (a) Artan KY oran	ının su içeriği oranıı	na etkisi, (b) %	4 KY içeren	polimer filmin	artan NK
	oranına karşı s	u içeriği değişi	mi		

 Table 5. (a) The effect of increasing TO ratio on the water content ratio, (b) the change in water content versus increasing NC ratio of the polymer film containing 4% TO

KY oranı	Su içeriği	NK oranı	Su içeriği
(kütlece %)	(%)	(kütlece %)	(%)
0	0,66333±0,01528 ^B	0	0,82000±0,07000 ^A
1	0,67333±0,02082 ^B	1	0,85333±0,04509 ^A
2	0,71667±0,10408 ^{AB}	2	$0,85667 \pm 0,09018^{A}$
3	0,81667±0,07638 ^{AB}	3	0,88000±0,06245 ^A
4	0,82000±0,07000 ^{AB}	4	$0,88667\pm0,06028^{A}$
5	$0,85000\pm0,05000^{\text{A}}$	5	0,89167±0,05252 ^A

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05)

Çizelge 5(a)'da verilen bulgulardan da anlaşılacağı gibi, AESO filmlerine eklenen KY, su moleküllerine olan afiniteyi biraz artırmıştır. %4 KY ilavesine kadar artan su içeriği önemsiz bulunurken %5 KY içeren polimer filmin su içeriği istatistiki açıdan önemli bulunmuştur (p<0.05). Öte yandan NK oranının artması ile su içeriğinde istatistiki olarak önemsiz bir artış olmuştur (p<0.05) (Çizelge 5 (b)).

3.3. pH ölçümleri

Her iki set için 72 saat tuzlu suda bekletilmiş film örneklerinin pH değerleri Çizelge 6(a) ve Çizelge 6(b)'de görülmektedir.

Çizelge 6(a). Artan KY oraninin pH etkisi					
	Table 6(a). pH effect of increasing TO ratio				
KY oranı		pH d	leğerleri		
(kütlece %)	0 saat	24 saat	48 saat	72 saat	
0	7,33±0,15 ^{A,a}	7,29±0,04 ^{A,a}	7,26±0,02 ^{A,a}	7,23±0,03 ^{A,a}	
1	7,35±0,15 ^{A,a}	7,30±0,03 ^{A,a}	7,27±0,01 ^{A,a}	7,23±0,02 ^{A,a}	
3	7,37±0,04 ^{A,a}	7,33±0,04 ^{A,ab}	7,27±0,03 ^{A,b}	7,28±0,03 ^{A,b}	
4	7,37±0,01 ^{A,a}	7,33±0,05 ^{A,ab}	7,29±0,06 ^{A,ab}	7,25±0,02 A,b	
5	7,38±0,03 ^{A,a}	7,33±0,05 ^{A,ab}	7,29±0,04 ^{A,ab}	7,25±0,02 ^{A,b}	

^{A-B}Aynı sütundaki büyük harfler örnekler arası farklılıkları, ^{a-b}Aynı satırdaki küçük harfler süreler arasındaki farklılıkları göstermektedir (p<0.05)</p>

İstatiksel olarak pH değerleri örnekler arası farklılıklar ve süreler arası farklılıklar olmak üzere iki farklı parametre açışından değerlendirilmiştir. Polimer filmlere farklı oranlarda KY ilavesinin örneklerin pH değerlerine etkisi 0., 24., 48., 72. saatlerde belirlenmiş ve Çizelge 6(a)'da verilmiştir. Çizelgedeki verileri standart sapmaları da dikkate alınarak süreler arası farklılıklar açısından incelediğimizde, KY içermeyen kontrol örneklerinde ilk pH ölçümü ile 72. saat sonrası kompozit filmlerin pH değeri 7,33 den 7,23'e azalmış ve asitlikteki bu artış istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (p<0.05). pH 7,37'den 7,28'e

düşen %3 KY içeren filmin 48. saatten sonra istatistiksel açıdan önemli bir asitlik artışı olarak değerlendirilmiş, 72. saatteki asitlik artışı önemsiz bulunmuştur. %4 ve %5 KY içeren polimer filmin 72. saatteki asitlik artışı önemli bulunmuştur (p<0.05). Çizelge 6(a)'daki verileri örnekler arası farklılıklar açısından incelediğimizde ise ilk pH ölçümlerinde (0. saat) %0'dan %5 KY içeren örneklerde, KY oranı arttıkça pH değerinde hafif bir azalma tespit edilse de, bu azalma istatistiki açıdan önemli bulunmamıştır. 72. saat sonunda ise pH değerleri karşılaştırıldığında yine istatistiksel olarak belirgin bir fark gözlenmemiştir (p<0.05).

% 4 oranda KY içeren kompozit filmlere farklı oranlarda NK ilavesinin örneklerin pH değerlerine etkisi 0., 24., 48., 72. saatlerde belirlenmiş ve Çizelge 6(b)'de verilmiştir. Çizelgedeki değerleri süreler arası farklılıklar açısından incelediğimizde, NK içermeyen kontrol örneklerinde ilk pH ölçümü ile 72. saat sonrası kompozit filmlerin pH değeri 7,37 den 7,25'e azalmış ve asitlikteki bu artış istatistik olarak önemli bulunmuştur (p<0.05). %1'lik NK içeren film yapıda başlangıçtan 72. saate kadar pH değerleri arasındaki farklılıklar istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur. %3'lük NK içeren film için 48. saate kadar pH değerleri değerinde önemli bir düşüş kaydedilmiş (p<0.05), 72. saatte pH'ın değişmediği görülmüştür. Son olarak %5'lik NK içeren kompozit filmlerde süredeki artışa bağlı olarak gözlemlenen pH düşüşü istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur (p<0.05).

Çizelge 6(b)'deki verileri örnekler arası farklılıklar açısından incelediğimizde ise ilk pH ölçümlerinde (0. saat) %1 NK içeren örneklerde NK içermeyen örneklere göre pH değerinde hafif bir azalma tespit edilse de, bu azalma istatistiki açıdan önemli bulunmamıştır. Ancak kompozit film yapıda NK oranı %1'den %3'e çıktığında örneklerin pH değerinde istatistiki olarak önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak NK oranının %5'e çıkarılmasının pH değerini etkilemediği belirlenmiştir. 24., 48. ve 72. saat sonrası yapılan pH ölçümlerinde film yapısında NK miktarındaki artışın, örnekler arasında istatistiki olarak herhangi bir fark oluşturmadığı gözlenmiştir (p<0.05).

Bir malzemenin pH değerlerinin cilt pH değeri ile uyumlu olması önemli bir özelliktir ve literatürde bu aralık pH 5,25-7,9 olarak verilmektedir [39]. Bu çalışmada hazırlanan tüm filmlerin pH'ı 72 saat sonunda 7,23-7,29 aralığında olup cilt pH'ı ile uyumlu bulunmuştur.

NK orani	nH doğarlari				
(kütlece %)	0 saat	24 saat	48 saat	72 saat	
0	7,37±0,01 ^{AB,a}	7,33±0,05 ^{A,ab}	7,29±0,06 ^{A,ab}	7,25±0,02 ^{A,b}	
1	7,33±0,04 ^{B,a}	7,29±0,04 ^{A,a}	7,29±0,04 ^{A,a}	7,27±0,01 ^{A,a}	
3	7,40±0,02 ^{A,a}	7,34±0,03 ^{A,ab}	7,30±0,03 ^{A,b}	7,29±0,04 ^{A,b}	
5	7,39±0,02 ^{A,a}	7,34±0,03 ^{A,a}	7,31±0,04 ^{A,a}	7,29±0,06 ^{A,a}	

Çizelge 6(b). %4 KY içeren polimer filmin artan	ı NK oranına karşı pH değişimi
Table 6(b). pH change of polymer film containing 4%	TO against increasing NC ratio

^{A-B}Aynı sütundaki büyük harfler örnekler arası farklılıkları, ^{a-b}Aynı satırdaki küçük harfler süreler arasındaki farklılıkları göstermektedir.

3.4. Su buharı geçirgenliği testi (Water vapour transmission rate)

Polimerik biyobozunur filmlerin kullanım potansiyelini belirleyen önemli faktörlerden bir tanesi su buharı geçirgenlik kapasitesidir. Özellikle elde edilen biyobozunur filmler gıda sanayisinde ambalaj malzemesi olarak kullanılacaksa buradaki temel amacı gıda ile çevresindeki atmosfer arasında gerçekleşen nem transferini önlemek veya azaltmaktır [40]. **Çizelge 7(a).** Artan KY oranının su buharı geçirgenliğine etkisi, **(b)** sabit %4 KY içeren ve artan NK oranına karşı su buharı geçirgenlik etkisi

KY oranı (kütlece %)	Su buharı geçirgenliği x10 ⁻¹⁰ [g.m/(m²*Pa*s)]	NK oranı (kütlece %)	Su buharı geçirgenliği x10 ⁻¹⁰ [g.m/(m²*Pa*s)]
0	1381,9±124,36 ^A	0	5,0251±0,0001 ^A
1	2,1356±0,5329 ^A	1	2,1357±0,5329 ^A
2	1,7588±0,7106 ^A	2	2,2613±0,3553 ^A
3	3,7688±1,7766 ^A	3	5,0251±0,0001 ^A
4	5,0251±0,0001 ^A	4	5,0251±0,0001 ^A
5	5 0251+0 0001A	5	3 7688+1 7766 ^A

 Table 7(a). The effect of increasing TO ratio on water vapor permeability, (b) water vapor permeability effect against increasing NC ratio with

 a fixed 4% TO content

¹Aynı sütundaki farklı harfler örnekler arasındaki istatistiksel farklılığı ifade etmektedir (p<0.05)

AESO polimeri lipit bazlı olmasından dolayı hidrofobik yapı oluşturarak su buharı geçirgenliğine karşı dayanıklıdır [41-42] ve su buharı geçirgenliği ortalama 1,38191x10⁻⁰⁷ olarak ölçülmüştür. Çizelge 7(a)'ya baktığımızda %1 KY ilavesi ile bu değer 2,1356 x10⁻¹⁰ değerine düşerek su buharı geçirgenliği sayısal olarak bir miktar daha azalmış gibi görünüyor olsa da daha fazla KY ilavesi su buharı geçirgenliğine istatistiksel olarak bir değişim yapmamıştır (p<0.05). Film yapısına NK ilavesinin olması da genel olarak sabit bir değer verdiği söylenebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada, polimer bazlı filmlere kekik yağı (KY) katılarak antibakteriyel ürünler elde edilmiştir. İkinci aşamada, belli oranlarda nanokil (NK) ilave edilerek bir biyobozunur nanokompozit film elde edilmiştir. İncelenen bakteri türleri için polimer filmlerdeki KY miktarı arttıkça zon çaplarında belli bir artış gözlenmiştir. Çözünürlük-şişme-su içeriği testlerinde birbirine benzer sonuçlar gözlenmiş olup AESO polimeri içerisinde KY ve NK oranı arttıkça bu özelliklerde az da olsa bir azalma olmuştur. 72 saat boyunca incelenen pH test sonucuna göre, en düşük pH değeri %4 KY ve %5 NK ilaveli kompozit filmlerde gözlenmiş olup 7,29 olarak tespit edilmiştir. Bu da insan cildine zarar vermeyecek bir pH değeridir. Son olarak su buharı geçirgenliği testi uygulanan örneklerde KY ilavesinin AESO'nun su buharı geçirgenliğini azalttığı, NK ilavesinin önemli bir değişim yapmadığı kaydedilmiştir. Bu antibakteriyel özelliği sayesinde üretilen filmler başka analizlerle de desteklenerek gıda ambalajlarında veya medikal endüstrilerde değerlendirme imkanı bulabilir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar, yazarlık, alıntı, veri raporlama ve orijinal araştırma yayınlama dahil olmak üzere tüm etik yönergelere uyduklarını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Ülkü SOYDAL: Orijinal taslak- makalenin yazımı-sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, proje yönetimi, denetleme. Fadim SÖYLEMEZ GÜNBATTI: Araştırma, analizler, kaynaklar.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar bilinen hiçbir rakip finansal ve kişisel çıkarları olmadığını beyan ederler.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 21201074 numaralı proje (Antibakteriyel özellikli Biyokompozit Filmlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu) ile desteklenmiştir.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Veriler istek üzerine kullanıma sunulabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Yasmin, J.J. Luo, J.L. Abot, and I.M. Daniel, "Mechanical and thermal behaviour of clay/epoxy nanocomposites", *Composites Science and Technology*, vol. 66, pp. 2415-2422, 2006.
- [2] V.Mittal, "Bio-nanocomposites: future high-value material", in *Nanocomposites with Biodegradable Polymers: Synthesis, Properties and Future Perspectives,* V. Mittal, Ed., Oxford University Press, Oxford, 2011, pp. 1-27.
- [3] H. Salam, and Y. Dong, "Property evaluation and material characterization of soybean oil modified bioepoxy/clay nanocomposites for environmental sustainability", *Materials Today Sustainability*, vol. 5, e100012, 2019.
- [4] V. Tanrattanakul, and P. Saithai, "Mechanical properties of bioplastics and bioplastic-organoclay nanocomposites prepared from epoxidized soybean oil with different epoxide contents", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 114, no. 5, pp. 3057-3067, 2009.
- [5] A. Ammar, A.W.M. Iling, K. Ramesh, and S. Ramesh, "Development of fully organic coating system modified with epoxidized soybean oil with superior corrosion protection performance", *Progress in Organic Coatings*, vol. 140, e105523, 2020.
- [6] S. J. Park, F. L. Jin, and J. R. Lee, "Synthesis and thermal properties of epoxidized vegetable oil", *Macromolecular Rapid Communications*, vol. 25, no. 6, pp. 724-727, 2004.
- [7] H. Uyama, M. Kuwabara, T. Tsujimoto, M. Nakano, A. Usuki, and S. Kobayashi, "Organicinorganic hybrids from renewable plant oils and clay", *Macromolecular Bioscience*, vol. 4, no. 3, pp. 354-360, 2004.
- [8] X. Ge, L. Yu, Z. Liu, H. Liu, Y. Chen, and L. Chen, "Developing acrylated epoxidized soybean oil coating for improving moisture sensitivity and permeability of starch-based film", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 125, pp. 370-375, 2019.
- [9] C. Zhang, M. Yan, E.W. Cochran, and M.R. Kessler, "Biorenewable polymers based on acrylated epoxidized soybean oil and methacrylated vanillin", *Materials Today Communications*, vol. 5, pp. 18-22, 2015.
- [10] E. Baştürk, T. Inan, and A. Güngör, "Flame retardant UV-curable acrylated epoxidized soybean oil based organic-inorganic hybrid coating", *Progress in Organic Coatings*, vol. 76, pp. 985-992, 2013.
- [11] L.Q. Carrillo, S. Duart, N. Montanes, S. T. Giner, and R. Balart, "Enhancement of the mechanical and thermal properties of injection-molded polylactide parts by the addition of acrylated epoxidized soybean oil", *Materials and Design*, vol. 140, pp. 54-63, 2018.
- [12] Y. Hu, P. Jia, Q. Shang, M. Zhang, G. Feng, C. Liu, and Y. Zhou, "Synthesis and application of UV-curable phosphorous-containing acrylated epoxidized soybean oil-based resins", *Journal of Bioresources and Bioproducts*, vol. 4, no. 3, pp. 183–191, 2019.
- [13] S. Kocaman, and G. Ahmetli, "A study of coating properties of biobased modified epoxy resin with different hardeners", *Progress in Organic Coatings*, vol. 97, pp. 53-64, 2016.
- [14] H.K. Güler, İ.E. Dönmez, and S.A. Aksoy, "Tıbbi ve aromatik bitkilerin antibakteriyel aktivitesi ve tekstil sektöründe kullanımı", *SDU Journal of Science (E-Journal)*, vol. 10, no. 2, pp. 27-34, 2015.
- [15] S. Pavlidou, and C.D. Papaspyrides, "A review on polymer-layered silicate nanocomposites", *Progress in Polymer Science*, vol. 33, pp. 1119–1198, 2008.

- [16] S. Sedaghat, "Synthesis of clay-CNTs nanocomposite", *Journal of Nanostructure in Chemistry*, vol. 3, pp. 3–6, 2013.
- [17] M.W. Dewan, M.K. Hossain, M. Hosur, and S. Jeelani, "Thermomechanical properties of alkali treated jute-polyester/nanoclay biocomposites fabricated by VARTM process", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 128, pp. 4110–4123, 2013.
- [18] M.F. Hossen, S. Hamdan, M.R. Rahman, M.M. Rahman, F.K. Liew, and J.C. Lai, "Effect of fiber treatment and nanoclay on the tensile properties of jute fiber reinforced polyethylene/clay nanocomposites", *Fibers and Polymers*, vol. 16, pp. 479–485, 2015.
- [19] B. Li, X. Zhang, J. Gao, Z. Song, G. Qi, Y. Liu, and J. Qiao, "Epoxy based nanocomposites with fully exfoliated unmodified clay: mechanical and thermal properties", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 10, pp. 5864–5868, 2010.
- [20] P.K. Kushwaha, and R. Kumar, "Reinforcing effect of nanoclay in bamboo-reinforced thermosetting resin composites", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 50, pp. 127– 135, 2011.
- [21] F. Uddin, "Studies in finishing effects of clay mineral in polymers and synthetic fibers", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, e243515, 2013.
- [22] A. Cerit, S. Kocaman, and U. Soydal, "UV-cured coatings based on acrylated epoxidized soybean oil and epoxy carboxylate", *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 447-450, 2016.
- [23] H. Vural, and A. Öztan, "Effects of starter cultures on growth of Staphylococcus aureus in fermented meat products", *Gıda*, Vol. 18, no. 4, pp. 259-263, 1993.
- [24] A. Gülbandılar, "Kütahya yöresinde burun mukozasındaki *Staphylococcus aureus* taşıyıcılığının ve antibiyotik duyarlılığının ve antibiyotik duyarlılığının araştırılması", *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt. 18, cc. 1-6, 2009.
- [25] R. Wang, Y. Liu, Q. Zhang, L. Jin, Q. Wang, Y. Zhang, X. Wang, M. Hu, L. Li, J. Qi, Y. Luo, and H. Wang, "The prevalence of colistin resistance in *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* isolated from food animals in China: coexistence of *mcr-1* and *blaNDM* with low fitness cost", *International Journal of Antimicrobial Agents*, vol. 55 no. 5, pp. 739-744, 2018.
- [26] N. Long, J. Deng, M. Qiu, Y. Zhang, Y. Wang, W. Guo, M. Dai, and L. Lin, "Inflammatory and pathological changes in Escherichia coli infected mice", *Heliyon*, vol. 8, e12533, 2022.
- [27] A. Alhazmi, "Pseudomonas aeruginosa Pathogenesis and Pathogenic Mechanisms", International Journal of Biology, vol. 7, no. 2, pp. 44-67, 2015.
- [28] A. Azizi, C. Wagner, W. Friedt, and B. Honermeier,"Intraspecific diversity and relationship between subspecies of Origanum vulgare revealed by comparative AFLP and SAMPL marker analysis", *Plant Systematics and Evolution*, vol. 281, pp. 151–160, 2009.
- [29] B. Başyiğit, İ. Hayoğlu, and F. Atasoy, "Kekik esansiyel yağı ve mikroenkapsülasyon uygulamaları, Batman University Journal of Life Sciences", Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, Cilt 7, ss. 63-70, 2017.
- [30] Q. Wang, Y. Du, Q. Feng, F. Huang, K. Lu, J. Liu, and Q. Wei, "Nanostructures and surface nanomechanical properties of polyacrylonitrile/graphene oxide composite nanofibers by electrospinning", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 128, no. 2, pp. 1152-1157, 2013.
- [31] M. Marino, C. Bersani, and G. Comi, "Antimicrobial activity of the essential oils of Thymus vulgaris L. measured using a bioimpedometric method", *Journal of Food Protection*, vol. 62, no. 9, pp. 1017-1023, 1999.
- [32] Y. Ozogul, E.K. Boga, I. Akyol, M. Durmus, and Y. Ucar, "Antimicrobial activity of thyme essential oil nanoemulsions on spoilage bacteria of fish and food-borne pathogens", *Food Bioscience*, vol. 36, e100635, 2020.
- [33] R. Moghimi, A. Aliahmadi, and H. Rafati, "Antibacterial hydroxypropyl methyl cellulose edible films containing nanoemulsions of Thymus daenensis essential oil for food packaging", *Carbohydrate Polymers*, vol. 175, pp. 241–248, 2017.

- [34] L.Y. Maroufi, M. Ghorbani, M. Mohammadi, and A. Pezeshki, "Improvement of the physicomechanical properties of antibacterial electrospun poly lactic acid nanofibers by incorporation of guar gum and thyme essential oil", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 622, e126659, 2021.
- [35] S. Biswas, and A. Satapathy, "A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo–epoxy and glass–epoxy composites", *Materials and Design*, vol. 31, pp. 1752-1767, 2010.
- [36] A. Hassan, M.B.K. Niazi, A. Hussain, S. Farrukh, and T. Ahmad, "Development of anti-bacterial PVA/starch based hydrogel membrane for wound dressing", *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 26, no. 1, pp. 235-243, 2018.
- [37] F.N. Köroğlu, Nitrofenollerin iyonik ve iyonik olmayan organobentonitlerle adsorpsiyon ve desorpsiyonu, Y.L. Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2004.
- [38] M. Ghasemlou, N. Aliheidari, R. Fahmi, S. Shojaee-Aliabadi, B. Keshavarz, M.J. Cran, and R. Khaksar, "Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils", *Carbohydrate Polymers*, vol. 98, no. 1, pp. 1117-1126, 2013.
- [39] N. Devi, and J. Dutta, "Preparation and characterization of chitosan-bentonite nanocomposite films for wound healing application", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 104, pp. 1897-1904, 2017.
- [40] N. Thongsrikhem, S. Taokaew, M. Sriariyanun, and S. Kirdponpattara, "Antibacterial activity in gelatin-bacterial cellulose composite film by thermally crosslinking with cinnamaldehyde towards food packaging application", *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 31, e100766, 2022.
- [41] J.M. Krochta, "Control of mass transfer in food with edible coatings and films", in *Advanced in Food Engineering*, R.P. Singh and M.A. Wirakartakusumah, Eds., Boca Raton, FL, CRC Press, pp. 517-538, 1992.
- [42] Embuscado, M.E., and K.C. Huber, "Edible Films and Coatings for Food Applications", *Springer, London*, pp. 1-56, 2009.



BİYOKÜTLEDEN GÖZENEKLİ KARBONLU MALZEME ÜRETİMİ: BİYOKÜTLE TİPİ VE SICAKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

¹Aynur AŞMA¹, ²Elif YAMAN¹, ³Sinan TEMEL¹

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Bilecik, TÜRKİYE ²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, Bilecik, TÜRKİYE ³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE ¹aynurdalseckin@gmail.com, ²elif.yaman@bilecik.edu.tr, ³sinan.temel@bilecik.edu.tr

Önemli Katkılar (Highligts)

- Biyokütle karbonlu malzeme üretmek için önemli bir hammaddedir.
- Farklı biyokütlelerden elde edilen karbonlu malzemelrin fizikokimyasal özellikleri birbirinden farklıdır.
- Rekasiyon şartlarının seçimi karbonlu malzemenin uygulama alanına göre önemlidir.

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



(a, b) KC-400 (c,d) KC-550 (e, f) KC-700 (a, b) M-400 (c,d) M-550 (e, f) M-700

Deneysel çalışma şartları ve elde edilen örneklerin SEM görüntüleri (Experimental operating conditions and SEM image of obtained samples)



BİYOKÜTLEDEN GÖZENEKLİ KARBONLU MALZEME ÜRETİMİ: BİYOKÜTLE TİPİ VE SICAKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERE ETKİSİ



¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Bilecik, TÜRKİYE ²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Alternatif Enerji Kaynakları Teknolojisi Programı, Bilecik, TÜRKİYE ³Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Bilecik, TÜRKİYE ¹aynurdalseckin@gmail.com, ²elif.yaman@bilecik.edu.tr, ³sinan.temel@bilecik.edu.tr

(Geliş/Received: 16.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.01.2023)

ÖZ: Bu çalışmada, yenilenebilir bir kaynak olan iki farklı biyokütlenin (karaçam ağacı talaşı ve meşe ağacı talaşı) detaylı karakterizasyonu, bu biyokütlelerden farklı sıcaklıklarda (400, 500 ve 700 °C) karbonizasyon yöntemi ile karbonlu malzeme üretilmesi ve üretilen bu malzemelerin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, biyokütle tipinin ve karbonizasyon sıcaklığının elde edilen karbonlu malzemenin fizikokimyasal özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesidir. Bu sebeple biyokütle örnekleri seçilirken, birinin sert odun (hard wood) diğerinin yumuşak odun (soft wood) olmasına dikkat edilmiştir. Biyokütle ve elde edilen örneklerin ön analizleri gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FT-IR) ve Taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri kullanılarak karakterizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, karbonizasyon sonucu elde edilen karbonlu malzemenin fizikokimyasal özelliklerinin başlı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Karbonizasyon, Karakterizasyon

Production of Porous Carbon Materials From Biomass: The Effect of Biomass Type and Temperature on Physiochemical Properties

ABSTRACT: In this study, detailed characterization of two different biomass samples (black pine wood sawdust and oak wood sawdust) which is a renewable resource, carbonization of these biomass at different temperatures (400, 500 and 700 °C) and the characterization of produced carbonaceous materials were carried out. The aim of the study is to specify the effect of biomass type and carbonization temperature on the physicochemical properties of the carbonaceous materials obtained. For this reason, while selecting biomass samples, importance was attached to ensure that one of them is hard wood and the other is soft wood. Pre-liminary analyses of biomass and obtained carbonaceous samples were executed. Characterization studies were completed using elemental analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and Scanning electron microscopy (SEM) techniques. According to the results, it was determined that the physicochemical properties of the carbonaceous material obtained as a result of carbonization depend on the raw material type and reaction conditions.

Keywords: Biomass, Carbonization, Characterization

*Corresponding Author: Elif YAMAN, elif.yaman@bilecik.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek katma değerli karbon malzemeler, karbonun yakıt olarak kullanılmasının yanı sıra aktif karbon [1], karbon nanotüpler [2], karbon nanofiberler [3], gözenekli karbon fiber [4-5], N-katkılı gözenekli karbon [6] ve grafen [7] dahil olmak üzere karbon içeren tüm malzemeleri kapsamaktadır. Bu karbonlu malzemeler genellikle yüksek spesifik yüzey alanı, iyi adsorpsiyon kapasitesi, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek iletkenlik özelliklerine sahiptir. Atık su arıtma [8], baca gazı arıtımı ve gaz saflaştırma [9-10], katalizör destek malzemesi [11], süperkapasitör [12], enerji depolama [13], güneş paneli [14] ve yarı iletken [15] uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gözenekli karbonlu malzemeler konvensiyonel yöntemlerde genellikle kömür, petrol ve türevlerinden hazırlanmaktadır ve bu da enerji kıtlığına ve çevresel krizlere yol açmaktadır. Bu nedenle, yeni, çevre dostu, düşük maliyetli ve yenilenebilir hammaddeler bulmak ve gözenekli karbonlu malzemelerin hazırlama yöntemlerini geliştirmek, enerji verimliliğini sağlamak için önemlidir. Biyokütlenin karbon nötr olması kullanılmasındaki en büyük avantajıdır ve karbon içeren tek yenilenebilir enerji kaynağıdır. Aynı zamanda üstün fizikokimyasal özelliklere sahiptir ve büyük miktarlarda, yaygın olarak ve iklimine uygun olarak her verde vetiştirilebilir. Biyokütle, küresel krizle başa çıkmada, fosil yakıtlardan kimyasal hammadde üretiminin yerini almada, iklim değişikliği, enerji arzı ve enerji tüketimi arasındaki uyumsuzluğun giderilmesinde, çevrenin korunması ve en önemlisi karbonsuzlaştırmanın gerçekleştirilmesinde çok önemli role sahiptir. Biyokütlenin karbon açısından zengin, sürdürülebilir ve yenilenebilir doğası, onu yenilenebilir karbon malzemelerin üretiminde umut verici bir hammadde haline getirmektedir [16].

Biyokütle, genel olarak dünyada yaşayan tüm organizmaların zamanla oluşturduğu toplam kütle miktarı olarak tanımlanmaktadır [17]. Bitkisel kökenli lignoselülozik biyokütle kaynakları karbonlu malzeme üretiminde kullanılarak, kolay elde edilebilen, ucuz, sürdürülebilir ve atık yönetimine katkıda bulunan malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir [18]. Biyokütle yüksek karbon (C) içeriğinin yanı sıra hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve az miktarda alkali, toprak alkali ve ağır metaller içermektedir [19]. Lignoselülozik biyokütle, hemiselüloz, selüloz ve ligninin bir araya gelerek oluşturduğu odunsu biyokütle olarak tanımlanmaktadır. Diğer biyokütlelere göre daha fazla lignin içeren odunsu biyokütle, sert odunlu (hardwood) ve yumuşak odunlu (softwood) olmak üzere iki gruba ayrılır. Sert odunlu ağaçlar geniş yapraklıdır, yavaş büyürler, tam olgunlaşması 100 yılı bulabilir, daha çok tropik iklimlerde yetişir ve lignin içerikleri kütlece yaklaşık %20-25'dir. Sert odunlu ağaçlara kızılağaç, kayın, maun, akçaağaç, meşe ve ceviz ağacı örnek olarak verilebilir [20]. Yumuşak odunlu ağaçlar ise, iğne yapraklı ve kozalakları olan ağaç türlerindendir. Sert ağaçlara göre daha hızlı büyürler, karaçam, ardıç, sedir, göknar, çam, ladin ve porsuk ağacı yumuşak odunlu ağaçlara örnek olarak verilebilirler [21].

Biyokütleden gözenekli karbonlu malzeme üretim tekniklerinden biri karbonizasyondur. Bu yöntemde biyokütle oksijensiz ortamda yüksek sıcaklıklara çıkarılarak, ısıl olarak parçalanma gerçekleştirilir. Karbonizasyon reaksiyonunun katı ürünü, hammadde ve reaksiyon koşullarına göre değişmek üzere yaklaşık %85 karbon içeren, az miktarda oksijen ve hidrojen de içeren aromatik organik yapıda bir katıdır [22]. Katı ürün veriminin en yüksek olduğu yöntem yavaş karbonizasyondur. Yavaş karbonizasyonda ısıtma hızı düşük, reaksiyon süresi ise uzun tutulur. Karbonizasyon sonucunda elde edilen ürün verimi ve ısıl değeri hammadde tipine ve reaksiyon koşullarına bağlı olmak üzere sırası ile kütlece yaklaşık %35-55 ve 20-36 MJ/kg aralığında değişmektedir [23]. Yaashikaa ve arkadaşları, biyokütle tipi, sıcaklık, basınç, partikül boyutu, ısıtma hızı gibi reaksiyon koşullarının katı ürünün fizikokimyasal özellikleri üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir [24]. Karbonizasyon sıcaklığı artırıldığında katı ürünün yüzey alanı artmakta ve mikro-gözenekliliği gelişmektedir [25-26]. Farklı kaynaklardan elde edilen biyokütlelerin karıştırılması ve karbonizasyonuna tabi tutulmasıyla elde edilen katı ürün özellikleri incelendiğinde ise, reaksiyon sıcaklığı ve karıştırma oranının en önemli iki reaksiyon parametresi olduğu görülmüştür [27-28].

Elde edilen katı ürün sahip olduğu mikro- ve mezo-gözenekler sayesinde doğrudan toprak iyileştirici olarak, atıksu arıtımında ve adsorpsiyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar [29]. Buna ek olarak, sanayide enerji kaynağı olarak ve kimya sanayisinde bazı kimyasalların hammaddesi olarak

kullanılabilmektedir [30-31].

Yapılan bu çalışmada, sert odun (meşe ağacı talaşı) ve yumuşak odun (karaçam ağacı talaşı) olmak üzere iki farklı tip biyokütleden farklı sıcaklıklarda (400 °C, 550 °C ve 700 °C) gözenekli karbonlu malzeme üretilmiştir. İki farklı tipte biyokütle seçilmesi ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen karbonizasyon işlemi ile biyokütle tipi ve reaksiyon sıcaklığının elde edilen biyokömür örneklerinin fizikokimyasal özelliklerine etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Literatürdeki biyokömür üretim teknikleri incelendiğinde, çoğu çalışmada saf inert gaz akışının sağlandığı özel piroliz reaktörleri ya da tüp fırınların kullanıldığı görülmektedir [32-37]. Bu çalışmada kullanılan yöntemde ise, biyokömür atık biyokütle örneğinden piroliz yöntemi gibi özel reaktörler gerektirmeyen ve daha kolay bir yöntem olan kül fırında karbonizasyon yöntemi ile üretilmiştir. Biyokütle örnekleri seçilirken özellikle gıda değeri olmayan, mobilya sektörü atığı olan hammaddelerin seçilmesine özen gösterilmiştir. Böylelikle yapılan bu çalışma bu çalışma bu yokütle atığı değerlendirilmiş hem de atık yönetimine katkıda bulunulmuştur.

2. MATERYAL ve METOD (MATERIALS and METHOD)

2.1. Biyokütle Örneklerinin Karakterizasyonu (Characterization of Biomass Samples)

Çalışma kapsamında kullanılan biyokütle örneklerinden karaçam ağacı talaşı (KÇ) Sıla Orman Ürünleri (Bilecik, Türkiye); meşe ağacı talaşı (M) Arslanoğlu Kereste (Bilecik, Türkiye) firmalarından atık olarak temin edilmiştir. Öncelikle, KÇ ve M örneklerinin yığın (ASTM E 873-82) [38] ve gerçek yoğunlukları (He gaz piknometresi, Micromeritics-AccuPyc II 1340), nem (Nem tayin cihazı, Sartorious, MA 150), kül (ASTM 1102-84) [39], uçucu madde (ASTM E 897-82) [40] ve sabit karbon (100-(Nem+Kül+Uçucu Madde)) miktarları belirlenmiştir. KÇ ve M örneklerinin içerdiği karbon, hidrojen, azot ve oksijen miktarını tayin etmek için elementel analiz cihazı (LECO CHN/S 628) kullanılmış, elde edilen veriler ve Dulong formülü [41] kullanılarak örneklerin üst ısıl değerleri hesaplanmıştır. Hammaddelerin içerdiği fonksiyonel grupların tanımlanması için kullanılan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FT-IR, Perkin Elmer, Spectrum 100) 4000-380 cm⁻¹ dalga boyu aralığında, 4 cm⁻¹ çözünürlükte çalıştırılmıştır. Analizler gerçekleştirilirken zayıf toplam frekans (ATR) modülü kullanılmıştır. Biyokütle örneklerinin yüzey morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM, ZEISS SUPRA 40VP) kullanılmıştır. Görüntüler elde edilirken ikincil elektron (SE) dedektör kullanılarak, 10 kV elektron yükü ve ~10 mm çalışma mesafesi şartlarında çalışılmıştır. SEM analizinden önce iletkenliğin sağlanması için örnekler Au/Pd ile kaplanmıştır (Quorum Q300).

2.2. Biyokütle Örneklerinin Karbonizasyonu (Carbonization of Biomass Samples)

KÇ ve M örnekleri tartılarak toprak kaplara yerleştirilmiş, ağızları hava almayacak şekilde sıkıca kapatılmış ve kül fırına konmuştur. 20 °C/dk ısıtma hızı ile istenilen sıcaklığa çıkarılan örnekler bu sıcaklıklarda 15 dk bekletilmiştir. KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonizasyonu ile elde edilen katı ürünler KÇ-400, KÇ-550, KÇ-700, M-400, M-550, M-700 olarak kodlanmıştır. Elde edilen bu örneklere ön analizler (yığın yoğunluk tayini, gerçek yoğunluk tayini, kül miktar tayini, nem miktar tayini, sabit karbon miktar tayini), elementel analiz, FT-IR ve SEM analizleri KÇ ve M örneklerine uygulanan aynı şartlarda uygulanmıştır. Deneysel yöntemi özetleyen şematik gösterim Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel yöntemin şematik olarak gösterimi *Figure 1.*. *Schematic representation of the experimental method*

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

3.1. Biyokütle Örneklerinin Karakterizasyon Sonuçları (Characterization Results of Biomass Samples)

KÇ ve M örneklerine uygulanan ön analizler ve elementel analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Hammaddelerin gerçek yoğunluk ve yığın yoğunluk değerleri arasında fark olması, biyokütlelerin gözenekli yapıda olduğunu göstermektedir. KÇ kütlece % 4,45 nem, % 2,34 kül ve %70,42 uçucu madde içerirken; M örneği %3,56 nem, %4,88 kül ve %68,32 uçucu madde içermektedir. Hammaddelerin içerdiği sabit karbon miktarı ise sırası ile kütlece %22,79 ve %23,24'dür. KÇ ve M örneklerinin düşük nem ve yüksek uçucu madde miktarına sahip olması bu hammaddelerin uçuculaştırma/karbonizasyon yöntemi ile karbonlu malzeme üretimi için uygun olduğunu göstermektedir. Karbonizasyon yönteminde hammadde reaktif olmayan ortamda, yüksek sıcaklıkta ısıl olarak bozundurulur. İşlem sırasında hammaddeye verilen ısı öncelikle yüzeydeki nemin uzaklaştırılmasında kullanıldığından, düşük nem içeriğine sahip biyokütleler karbonizasyon ile değerlendirilmek için tercih edilmektedir [42]. Elementel analiz sonuçlarına göre KÇ ve M örneklerinin içerdiği karbon miktarı sırası ile kütlece %40,22 ve %41,59'dur. Örneklerin sahip olduğu yüksek karbon miktarı, bu hammaddelerden karbonlu malzeme üretilmesi için uygundur.

Özellik	KÇ	Μ
Gerçek Yoğunluk (g/cm³)	1,38	1,27
Yığın Yoğunluk (g/cm³)	0,21	0,26
Nem (%)	4,45	3,56
Kül (%)	2,34	4,88
Uçucu Madde (%)	70,42	68,32
Sabit Karbon (%)*	22,79	23,24
Karbon (%)	40,22	41,59
Hidrojen (%)	6,58	6,19
Azot (%)	0,25	0,16
Oksijen (%)**	52,95	52,06
Isıl Değer (MJ/kg)	13,55	13,61
	1/11 11	36 11

Çizelge 1. E	iyokütle örneklerinin ön analiz ve elementel analiz sonuçları
Tahle	1 Preliminary analysis and elemental analysis results of hiomass samples

*Farktan (Sabit Karbon= 100- (Nem+Kül+Uçucu Madde)) **Farktan (Oksijen=100- (Karbon+Hidrojen+Azot)

KÇ ve M örneklerinin sahip olduğu fonksiyonel grupları gösteren FT-IR spektrumları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2 (a)'da 3339 cm⁻¹'de ve Şekil 2 (b)'de 3321 cm⁻¹'de yer alan geniş pik, -OH grubuna aittir. Bu pikler ham maddelerin yapısında bulunan yüzey nemi ile alkol ve fenollerin içerdiği O-H gerilimini göstermektedir [43]. KÇ örneğinde 2915 cm⁻¹ metil ve metilen gruplarını ifade eden C-H gerilme titreşimine ait pik bulunmaktadır [44]. Hammadde yapısında bulunan karboksilik asit, keton, aldehit ve esterleri belirten C=O grubu 1739 cm⁻¹ ve 1598 cm⁻¹ bölgesindeki pikler ile belirtilmiştir. C=C gerilimini
gösteren alkenlere ait pik 509 cm⁻¹ bölgesinde yer almaktadır [45]. Selüloz yapısındaki C-H ise 1281 cm⁻¹'de gözlenen pik ile belirlenmiştir [46]. 1021 cm⁻¹ ve 1262 cm⁻¹ bölgesinde görülen pikler C-O gerilme titreşimine aittir ve yapıdaki alkol, fenol, eter ve ester gruplarını gösterir [47]. M örneğinde ise 2887 cm⁻¹ de alifatik CH₃ grupları gösteren bir pik yer almaktadır. C-H gerilmesine ait pik 1254 cm⁻¹'de, C-O ve C-O-C bağlarına ait olan pik ise 1019 cm⁻¹'de görülmektedir [48].



Şekil 2: (a) KÇ (b) M örneklerinin FT-IR spektrumları *Figure 2:* FT-IR spectra of (a) KÇ (b) M

KÇ ve M örneklerine ait SEM görüntüleri sırası ile Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre KÇ örneği az gözenekli ve düzlemsel yapıda, M ise karmaşık, daha gözenekli ve çok tabakalı lifli yapıdadır.



Şekil 3: KÇ'ye ait SEM görüntüleri (a) 500x (b) 2kx Figure 3: SEM images of KÇ (a) 500x (b) 2kx



Şekil 4: M'ye ait SEM görüntüleri (a) 500x (b) 2kx Figure 4: SEM images of M (a) 500x (b) 2kx

3.2. Karbonizasyon Sonucu Elde Edilen Örneklerin Karakterizasyon Sonuçları (Characterization 3.2.1. Results of Carbonized Samples)

KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonize edilmesi ile elde edilen örneklerin verimleri ve fiziksel görüntüleri sırası ile Çizelge 2 ve Şekil 5'te verilmiştir. Karbonizasyon reaksiyon sıcaklıkları arttıkça, daha fazla uçucu hidrokarbonun biyokütleden ayrılması ile katı ürün veriminin literatürle uyumlu bir şekilde azaldığı görülmektedir [49]. Karbonizasyon sıcaklığının aynı olduğu fakat farklı biyokütlelerin karbonizasyonu sonucunda elde edilen verim değerlerinin birbirinden farklı olması ise, biyokütle tipinin elde edilen ürün veriminde etkili olduğunu göstermektedir.

Table 2: Yields of carbonization reaction								
Biyokütle	Karbonizasyon Sıcaklığı (°C)							
	400	550	700					
KÇ	51,03	27,02	14,19					
М	60,40	43,80	29,84					

iyokütle tipinin elde edilen ürün veriminde etkili olduğunu göstermektedir. **Çizelge 2:** Karbonizasyon reaksiyonu verimleri (%)

Biyokütle tipi ve karbonizasyon sıcaklığı değiştikçe elde edilen katıların morfolojik ve görsel özelliklerinin de farklılaştığı gözlenmiştir (Şekil 5). 400 °C'de elde edilen örneklerin renkleri kahverengimsiyken, reaksiyon sıcaklığı arttıkça siyah renkli örnekler elde edilmiştir.



Şekil 5: Örneklerin görselleri (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700 (d) M-400 (e) M-550 (f) M-700 *Figure 5: Images of (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700 (d) M-400 (e) M-550 (f) M-700*

Farklı biyokütlelerden farklı reaksiyon koşullarında elde edilen karbonlu malzemelerin ön analiz ve elementel analiz sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir. 400 °C, 550 °C ve 700 °C'de sentezlenen örneklerin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklıklara çıkıldığında gerçek yoğunluk değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir fakat yığın yoğunluk değerleri azalmıştır. Yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, daha çok uçucu hidrokarbon yapıdan uzaklaşmış, buna bağlı olarak gözeneklilik artmış ve hesaplanan yığın yoğunluk değerleri de düşmüştür. En düşük yığın yoğunluk değerleri en yüksek sıcaklıklarda sentezlenen KÇ-700 ve M-700 örnekleri için sırasıyla 0,35 g/cm3 ve 0,40 g/cm3 olarak bulunmuştur. Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça her iki biyokütle örneğinde de genel eğilimle nem iceriğinin azaldığı belirlenmistir. Buna uymayan M-550 örneğinde nem değerinin yüksek olması, nem içeriğinin üretim sonrası saklama koşullarından etkilenmesi ile açıklanabilir. Karbonize edilmiş örneklerin sahip olduğu kül miktarları KÇ ve M'nin içerdikleri kül miktarlarından daha fazladır. Karbonizasyon sürecinde yüksek sıcaklığa çıkıldığında biyokütle yapısındaki uçucu hidrokarbonlar yapıdan uzaklaşır, kül yapıcı bileşenlerin kütlece yüzdeleri ise bağıl olarak artar. Buna göre, elde edilen örneklerin kül içerikleri hammaddelerin kül içeriğinden daha fazladır. Elementel analiz sonuçlarına göre, sıcaklık arttıkça örneklerin içerdiği karbon miktarı ve buna bağlı olarak hesaplanan ısıl değerlerde artış görülmüştür.

	KÇ-400	KÇ-550	KÇ-700	M-400	M-550	M-700
Gerçek Yoğunluk (g/cm³)	1,39	1,34	1,35	1,24	1,28	1,26
Yığın Yoğunluk (g/cm³)	0,49	0,49	0,35	0,50	0,48	0,40
Nem (%)	1,17	0,75	0,87	0,88	1,33	0,51
Kül (%)	1,03	2,01	1,65	23,82	19,73	21,47
Uçucu Madde (%)	56,54	53,67	49,23	50,76	48,07	35,27
Sabit Karbon (%)	41,26	43,57	48,25	24,54	30,87	42,75
Karbon (%)	42,05	47,98	53,65	45,73	46,12	50,09
Hidrojen (%)	5,97	5,32	5,88	5,12	5,20	5,32
Azot (%)	0,23	0,21	0,19	0,29	0,34	0,21
Oksijen (%)	51,75	46,49	40,28	48,86	48,34	44,38
H/C	1,70	1,33	1,32	1,34	1,35	1,28
O/C	0,92	0,73	0,56	0,80	0,79	0,67
Isıl Değer (MJ/kg)	13,50	15,52	19,36	14,04	14,38	16,61

Çizelge 3. Karbonizasyon sonucu elde edilen örneklerinin ön analiz ve elementel analiz sonuçları *Table 3. Preliminary analysis and elemental analysis results of carbonizated samples*

KÇ ve M örneklerinin farklı sıcaklıklarda karbonizasyonu sonucu elde edilen örneklerin FT-IR spektrumları sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 6'da KÇ-400 örneğinde 3350 cm⁻¹O-H grubunu gösteren, 2868 cm⁻¹'de bulunan metil ve metilen gruplarını gösteren ve alkol, fenol, eter ve ester gruplarına ait C-O gerilme titreşimlerini gösteren piklerin şiddeti en yüksektir [50]. KÇ-400 örneğinde 2917 cm⁻¹ bölgesinde görülen yayvan ve düşük şiddetli pik, alkil gruplarına ait C-H gerilme titreşimini göstermektedir ve bu alifatik zincir biyokütle örneklerinin ana yapısına aittir [51]. KÇ-550 ve KÇ-700 örneklerinde bu pikin görülmemesinin sebebi, yüksek sıcaklıkta karbonizasyon reaksiyonlarının daha yüksek verimde gerçekleşmesi ve elde edilen biyokömür örneklerinin biyokütle yapısından tamamen uzaklaşmasıyla açıklanabilir [52]. Bu sonuç elementel analiz sonuçları ile de uyum içerisindedir. Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça elde edilen biyokömür örneğinin karbon içeriğinin de arttığı belirlenmiştir. KÇ-550 örneğinde 1688 cm⁻¹ ve 1576 cm⁻¹ bölgesinde bulunan keton, aldehit, karboksilik asit ve esterlerin gruplarını gösteren C=O gerilme titreşiminin şiddeti en fazladır.



Şekil 6: FT-IR spektrumları (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700 Figure 6: FT-IR Spectra (a) KÇ-400 (b) KÇ-550 (c) KÇ-700

Şekil 7'de verilen spektruma göre karbonizasyon sıcaklığı değiştikçe O-H grubuna ait bant titreşimi (3403 cm⁻¹), C-H bant titreşimi (2874 cm⁻¹) ve C=O (1590 cm⁻¹) gerilme titreşimine ait pik şiddetlerinde farklılık olmadığı belirlenmiştir. Fakat M-400 örneğinde (en düşük karbonizasyon sıcaklığı) C=O gerilme titreşimini gösteren 1594 cm⁻¹'de gözlenen pik en yüksek şiddettedir. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça yapıdaki C-H grubunu (1405 cm⁻¹) gösteren pik şiddetinin arttığı, C-H grubuna ait pikin (873 cm⁻¹) ise M-700 örneğinde en yüksek şiddette olduğu belirlenmiştir.

Hammaddeler ve karbonizasyon sonucu elde edilen karbonlu malzemelerin FT-IR spektrumları incelendiğinde, KÇ ve M örneklerinin daha çok tek bağlı alkil bileşenlerden oluştuğu, reaksiyon sonrası elde edilen örneklerin ise çift bağ ve aromatik yapılardan oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 7: FT-IR spektrumları (a) M-400 (b) M-550 (c) M-700 **Figure 7:** FT-IR Spectra (a) M-400 (b) M-550 (c) M-700

Farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. KÇ-400, KÇ-550 ve KÇ-700 örneklerinin SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça gözenekliliğin arttığı ve düzgün kafes yapılarının geliştiği görülmektedir. M-400, M-550 ve M-700 örneklerinde de yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça gözenekliliğinin arttığı fakat süngerimsi yapıda gözeneklerin oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 8: SEM görüntüleri (a) KC-400, 500x (b) KC-400, 2kx (c) KC-550, 500x (d) KC-550, 2 kx (e) KC-700, 500 x (f) KC-400, 2kx *Figure 8: SEM images (a) KC-400, 500x (b) KC-400, 2kx (c) KC-550, 500x (d) KC-550, 2 kx (e) KC-700, 500 x (f) KC-400, 2kx*



Şekil 9: SEM görüntüleri (a) M-400, 500x (b) M-400, 2kx (c) M-550, 500x (d) M-550, 2 kx (e) M-700, 500 x (f) M-400, 2kx (f) M-400, 2kx

Figure 9: SEM images (a) M-400, 500x (b) M-400, 2kx (c) M-550, 500x (d) M-550, 2 kx (e) M-700, 500 x (f) M-400, 2kx

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Hammaddelerin içerdiği C, H, N ve O miktarlarının belirlenmesi için elementel analiz gerçekleştirilmiş ve sahip oldukları ısıl değerler KÇ ve M için sırasıyla 13,55 MJ/kg ve 13,61 MJ/kg olarak hesaplanmıştır. FT-IR analizlerine göre KÇ ve M yapılarında alkol, fenol, eter, keton, aldehit, karboksilik asit ve ester gruplarına ait pikler tespit edilmiştir. Örneklerin karbonize edilmesi ile yapıda metil ve metilen gruplarına, keton, aldehit, karboksilik asit, esterlerin gruplarına, alkol, fenol, eter ve ester grupları belirlenmiştir. Karbonizasyon öncesi ve sonrası gerçekleştirilen SEM analizine göre, yüzey morfolojik yapısının ısıl işlem ile değiştiği, sıcaklık arttıkça gözenekliliğin arttığı belirlenmiştir. Bu sonuç, yığın yoğunluk değerlerinin sıcaklık arttıkça azalıyor olması ile de desteklenmektedir. Yumuşak odunlu ağaç (KÇ) ve sert odunlu ağaç (M) olarak örneklerin fizikokimyasal özellikleri birbiriyle karşılaştırıldığında, KÇ'nin kül içeriğinin daha düşük, uçucu madde içeriğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Biyokütleden karbonlu malzeme üretiminde, kül miktarının düşük ve uçucu madde miktarının yüksek olması tercih edilmektedir, buna göre karbonizasyon işlemi için KÇ örneğinin daha uygun olduğu belirlenmiştir. KÇ örneğinden elde edilen biyokömür örnekleri ise M örneğinden elde edilen biyokömür örnekleri ise sahiptir.

Yapılan karakterizasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, biyokütle yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz bir kaynak olarak karbonlu malzeme üretiminde gelecek vadeden bir hammaddedir. Biyokütleden elde edilen karbonlu malzemenin yüzeysel, fiziksel ve kimyasal özellikleri hammadde tipi ve reaksiyon koşullarına bağlıdır ve bunların seçimi karbonlu malzemenin uygulama alanına yönelik olmak üzere çok önemlidir. Belirlenen hammaddenin atık biyokütle olarak değerlendirilmesi ise hem üretim maliyetini azaltmakta hem de atık yönetimine katkıda bulunmaktadır.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Bu çalışma yapılırken, yazarlık, alıntı, veri raporlama ve orijinal araştırma yayınlama dahil olmak üzere tüm etik yönergelere uyulmuştur.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

AA: Deneylerin yapılması EY: Deneylerin tasarlanması, sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması ve revizyonu; ST: Sonuçların yorumlanması, tam metnin yazılması.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarların herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Bu çalışma, kamu, ticari veya kar amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Uygulanamaz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Xue, X. Gao, M. K. Seliem, M. Mobarak, R. Dong, X. Wang, Z. Li, "Efficient adsorption of anionic azo dyes on porous heterostructured MXene/biomass activated carbon composites: Experiments, characterization, and theoretical analysis via advanced statistical physics models", *Chemical Engineering Journal*, vol. 451, no. 3, Jan., pp. 138735, 2023.
- [2] A. Ito, K. Tanaka, "Applications of Carbon Nanotubes and Graphene in Spin Electronics", *Carbon Nanotubes and Graphene*, pp. 253-278, 2014.
- [3] W. D. Li, X. P. Wang, Eds., *Nanofibers: Synthesis, Properties, and Applications,* Nova Science Publishers Incorporated, 2012.
- [4] C. Ma, J. Bai, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, W. Jiang, L. Wang, "Polyacrylonitrile-derived nitrogen enriched porous carbon fiber with high CO₂ capture performance", *Separation and Purification Technology*, vol. 303, Dec., pp. 122299, 2022.
- [5] C. Ma, T. Lu, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, W. Jiang, L. Wang, "Polyacrylonitrile-Derived N-Doped Nanoporous Carbon Fibers for CO₂ Adsorption", ACS Applied Nano Materials, vol. 5, no. 9, Aug., pp. 13473-13481, 2022.
- [6] Q. Yu, J. Bai, J. Huang, M. Demir, B. N. Altay, X. Hu, L. Wang, "One-Pot Synthesis of N-Rich Porous Carbon for Efficient CO₂ Adsorption Performance", *Molecules*, Vol. 27, no. 20, Oct., pp. 6816, 2022.
- [7] S. Ray, "Applications of graphene and graphene-oxide based nanomaterials", *William Andrew Press*, 2015.
- [8] A. Gul, N. G. Khaligh, N. M. Julkapli, "Surface modification of carbon-based nanoadsorbents for the advanced wastewater treatment", *Journal of Molecular Structure*, vol. 1235, July, pp. 130148, 2021.
- [9] X. Zhang, Y. Li, Z. Zhang, M. Nie, L. Wang, H. Zhang, "Adsorption of condensable particulate matter from coal-fired flue gas by activated carbon", *Science of The Total Environment*, vol. 778, July, pp. 146245, 2021.

- [10] H. Zhang, J. Niu, Y. Guo, F. Cheng, "Recirculating coking by-products and waste for cost-effective activated carbon (AC) production and its application for treatment of SO₂ and wastewater in cokemaking plant", *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, no:2, Jan., pp. 124375, 2021.
- [11] E. Yaman, F. Ö. Gökmen, S. Temel, N. Özbay, "Evaluation of bio-char as porous catalyst support in the pyrolysis of Brassica napus subsp. napus cake", *Journal of Porous Materials*, vol. 29, no. 3, Feb., pp. 771-781, 2022.
- [12] A. M. Abioye, F. N. Ani, "Recent development in the production of activated carbon electrodes from agricultural waste biomass for supercapacitors: A review", *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 52, Dec., pp. 1282-129, 2015.
- [13] M. Sevilla, R. Mokaya, "Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage", *Energy & Environmental Science*, vol. 7, no. 4, Jan., pp. 1250-1280, 2014.
- [14] R. K. Bera, S. G. Mhaisalkar, D. Mandler, S. Magdassi, "Formation and performance of highly absorbing solar thermal coating based on carbon nanotubes and boehmite", *Energy Conversion and Management*, vol. 120, July, pp. 287-293, 2016.
- [15] G. Zou, D. Zhang, C. Dong, H. Li, K. Xiong, L. Fei, Y. Qian, "Carbon nanofibers: synthesis, characterization, and electrochemical properties", *Carbon*, vol. 44, no. 5, Apr., pp. 828-832, 2006.
- [16] L. Ge, C. Zhao, M. Zuo, J. Tang, W. Ye, X. Wang, C. Xu, "Review on the preparation of high valueadded carbon materials from biomass", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 168, Nov., pp. 105747, 2022.
- [17] E. Kapluhan, "Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Biyokütle Enerjisinin Dünyadaki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu", *Marmara Coğrafya Dergisi*, vol. 30, Kas., pp. 97, 2014.
- [18] A. Aşma, E. Yaman, S. Temel, "Biyokütleden Üretilen Karbon Altlık Üzerinde ZnO Nano-Parçacıkların Biriktirilmesi ve Karakterizasyonu", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 29, no. 3, Ara., pp. 431-439, 2021.
- [19] E. Sözen, G. Gündüz, D. Aydemir, E. Güngör, "Biyokütle Kullanımının Enerji, Çevre, Sağlık ve Ekonomi Açısından Değerlendirilmesi", *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, vol. 19, no. 1, Haz., pp. 149, 2017.
- [20] E. Novaes, M. Kirst, V. Chiang, H. Winter-Sederoff, R. Sederoff, "Lignin And Biomass: A Negative Correlation for Wood Formation and Lignin Content in Trees", *Plant Physiology*, vol. 154, no. 2, Oct., pp. 557, 2010.
- [21] Diffen, 2021, "Hardwood vs Softwood" 2022 [Online] Available: https://www.diffen.com/difference/Hardwood_vs_Softwood [accessed: 15.11.2022]
- [22] J. P. Diebold, A. V. Bridgwater, "Overview of Fast Pyrolysis of Biomass for The Production of Liquid Fuels". *Developments in Thermochemical Biomass Conversion*, Springer, Dordrecht, 1997.
- [23] T. Kan, V. Strezov, T. J. Evans, "Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Review of Product Properties and Effects of Pyrolysis Parameters", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1139, May, 2016.
- [24] P. R. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Varjani, A. Saravanan "A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy", *Biotechnology Reports*, vol. 28, Dec., pp. 00570, 2020.
- [25] B. Khiari, I. Ghouma, A. I. Ferjani, A. A. Azzaz, S. Jellali, L. Limousy, M. Jeguirim, "Kenaf stems: Thermal characterization and conversion for biofuel and biochar production", *Fuel*, vol. 262, Feb., pp. 116654, 2020.
- [26] A. Hmid, D. Mondelli, S. Fiore, F. P. Fanizzi, Z. Al Chami, S. Dumontet, "Production and characterization of biochar from three-phase olive mill waste through slow pyrolysis", *Biomass* and Bioenergy, vol. 71, Dec., pp. 337, 2014.
- [27] A. Ghysels, A. Krämer, R. M. Venable, W. E. Teague, E. Lyman, K. Gawrisch, R. W. Pastor, "Permeability of membranes in the liquid ordered and liquid disordered phases", *Nature communications*, vol. 10, no.1, Dec., pp. 11, 2019.

- [28] G. Bhowmick, A. K. Sarmah, R. Sen, "Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value-added products", *Bioresource technology*, vol. 247, Jan., pp. 1148, 2018.
- [29] D. Mohan, A. Sarswat, Y. S. Ok, C. U. Pittman Jr, "Organic And İnorganic Contaminants Removal from Water with Biochar, A Renewable, Low Cost And Sustainable Adsorbent–A Critical Review", *Bioresource Technology*, vol. 160, May., pp. 201, 2014.
- [30] M. K. Hossain, V. Strezov, K. Y. Chan, A. Ziolkowski, P. F., Nelson, "Influence of Pyrolysis Temperature on Production And Nutrient Properties Of Wastewater Sludge Biochar", *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 1, Jan., pp. 225, 2011.
- [31] Y. Lee, J. Park, C. Ryu, K. S. Gang, W. Yang, Y. K. Park, S., Hyun, "Comparison of Biochar Properties from Biomass Residues Produced by Slow Pyrolysis at 500 °C", *Bioresource Technology*, vol. 148, Nov., pp. 197, 2015.
- [32] L. Xie, Q. Li, M. Demir, Q. Yu, X. Hu, Z. Jiang, L. Wang, "Lotus seed pot-derived nitrogen enriched porous carbon for CO₂ capture application", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 655, Dec., pp. 130226, 2022.
- [33] C. Song, K. Chen, M. Chen, X. Jin, G. Liu, X. Du, Q. Huang, "Sequential combined adsorption and solid-phase photocatalysis to remove aqueous organic pollutants by H₃PO₄-modified TiO₂ nanoparticles anchored on biochar", *Journal of Water Process Engineering*, vol. 45, Feb., pp. 102467, 2022.
- [34] H. Luo, S. Yu, M. Zhong, Y. Han, B. Su, Z. Lei, "Waste biomass-assisted synthesis of TiO2 and N/O-contained graphene-like biochar composites for enhanced adsorptive and photocatalytic performances", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 899, Apr., pp. 163287, 2022.
- [35] R. Shan, L. Lu, J. Gu, Y. Zhang, H. Yuan, Y. Chen, B. Luo, "Photocatalytic degradation of methyl orange by Ag/TiO₂/biochar composite catalysts in aqueous solutions", *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 114, Aug., pp. 105088, 2020.
- [36] L. Lu, R. Shan, Y. Shi, S. Wang, H. Yuan, "A novel TiO₂/biochar composite catalysts for photocatalytic degradation of methyl orange", *Chemosphere*, vol. 222, May, pp. 391-398, 2019.
- [37] J. Kim, B. Park, Y. Son, J. Khim "Peat moss-derived biochar for sonocatalytic applications", *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 42, Apr., pp. 26-30, 2018.
- [38] ASTM, "Standart test method for bulk density of densified particulate biomass fuels", *In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts*, Easton, M.D., USA, E 873-82, 1983.
- [39] ASTM, "Standart test method for ash in wood", *In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts*, Easton, M.D., USA, D-1102-84, 1983.
- [40] ASTM, "Standart test method for volatile matter in analysis sample refuse derived fuel-3", In ASTM Annual Book of Ame. Soc. for Testing and Materials Standarts, Easton, M.D., USA, E-897-82, 1983.
- [41] J. H. Harker, J. R. Backhurst, Fuel and Energy 120, London, Academic Press Inc., 1981.
- [42] B. V. Babu, A. S. Chaurasia, "Modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects", *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 14, Aug., pp. 2254, 2003.
- [43] A. S. Khan, Z. Man, M. A. Bustam, A. Nasrullah, Z. Ullah, A. Sarwono, N. Muhammad, "Efficient conversion of lignocellulosic biomass to levulinic acid using acidic ionic liquids", *Carbohydrate polymers*, vol. 181, Feb, pp. 211, 2018.
- [44] N. Wang, A. Tahmasebi, J. Yu, J. Xu, F. Huang, A. Mamaeva, "A comparative study of microwaveinduced pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass", *Bioresource technology*, vol. 190, Aug., pp. 90, 2015.
- [45] E. Yaman, "Biyokütleden Fenolik Hidrokarbonlarca Zengin Değerli Kimyasalların Elde Edilmesi", PhD thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2018.
- [46] P. Devi, A. K. Saroha, "Effect of pyrolysis temperature on polycyclic aromatic hydrocarbons toxicity and sorption behaviour of biochars prepared by pyrolysis of paper mill effluent treatment plant sludge", *Bioresource technology*, vol. 192, Sep., pp. 316, 2015.

- [47] T. Yuan, A. Tahmasebi, J. Yu, "Comparative study on pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass using a thermogravimetric and a fixed-bed reactor", *Bioresource Technology*, vol. 175, Jan., pp. 333, 2015.
- [48] A. Ulusal, "Biyokütleden piroliz yöntemi ile üretilen biyocharin çevresel etkilerinin incelenmesi", *Master's thesis*, Anadolu Üniversitesi, 2016.
- [49] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, P. Boguta, "Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects", *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol.19, no. 1, Feb., pp. 193, 2020.
- [50] N. Özbay, A. Ş. Yargıç, R. Z. Y. Şahin, E. Yaman, "Research on the Pyrolysis Characteristics of Tomato Waste with Fe–Al₂O₃ Catalyst", *In Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions*, pp. 815-828, Academic Press, 2018.
- [51] E. Yaman, A. Ulusal, B. B. Uzun, "Co-pyrolysis of lignite and rapeseed cake: a comparative study on the thermal decomposition behavior and pyrolysis kinetics", *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 1, Jan., pp. 1–15, 2021.
- [52] E. Yaman, T. C. Ulu, N. Özbay, "Characterization of different biochars and their impacts on infectivity of entomopathogenic nematode Heterorhabditis bacteriophora", *Biomass Conversion and Biorefinery*, in press, 1-14, 2021.



AKILLI MALZEME OLARAK POLİMERLER VE UYGULAMALARI

^{1*}Derya MUTLU^(D), ²İdris KARAGÖZ^(D)

¹Polimer Malzeme Mühendisliği A.B.D., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE ²Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE ¹deryamutlu09@hotmail.com, ²idris.karagoz@yalova.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Şekil hafızalı polimerler ve uygulamaları
- Gelişen bir malzeme olarak akıllı polimerler
- Akıllı polimer teknolojilerindeki güncel gelişmelerin incelenmesi

Grafiksel Özet (Graphical Abstract)



(Classification of smart polymers)



AKILLI MALZEME OLARAK POLİMERLER VE UYGULAMALARI



¹Polimer Malzeme Mühendisliği A.B.D., Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE ²Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi, Yalova, TÜRKİYE ¹deryamutlu09@hotmail.com, ²idris.karagoz@yalova.edu.tr

(Geliş/Received: 21.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.10.2022)

ÖZ: Gelişmekte olan malzemeler içerisinde yer alan akıllı malzemeler günümüzde oldukça dikkat çeken ve çok farklı uygulamalarda kullanım alanı bulan en önemli mühendislik malzemelerinden biridir. Bu çalışma ile akıllı polimerlerin mevcut kullanım alanlarına ek olarak gelecekteki potansiyel uygulamalarının belirlenmesi, akıllı polimer teknolojilerindeki güncel gelişmelerin izlenmesi, akıllı polimerler konusunda temel bir sınıflandırmanın oluşturulması, literatürün derlenmesi, konu hakkında çalışanlar ve konuya ilgi duyanların başvuracağı Türkçe bir kaynak oluşturulması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada; akıllı polimer teknolojilerindeki son gelişmeler mevcut çalışmalar doğrultusunda incelenecek, polimerlerin akıllı malzeme olarak kullanımının avantajları, dezavantajları, akıllı polimer teknolojilerindeki son gelişmeler nevcut çalışmada akıllı polimerler, (i)akıllı polimerik jeller, (ii)şekil hafızalı polimerler, (iii)kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler ve (iv) iletken polimerler şeklinde dört başlıkta sınıflandırılarak incelenmiştir

Anahtar Kelimeler: Akıllı Polimerler, Hidrojeller, Şekil Hafızalı Polimerler, Kendi Kendini Onaran/İyileştiren Polimerler, İletken Polimerler

Polymers as Smart Materials and Their Applications

ABSTRACT: Smart materials, which are among the developing materials, are one of the most important engineering materials that attract attention and find use in many different applications. In this study, it is aimed to determine the potential future applications of smart polymers in addition to the current use, to monitor the current developments, to create a basic classification, to compile the literature. Therefore, a Turkish resource is created for the researchers who work on the subject and are interested. In the present work, the latest developments in smart polymer technologies will be examined in line with current studies, their advantages, and disadvantages of using polymers as smart materials will be evaluated. Smart polymers are classified under four headings as (i) smart polymeric gels, (ii) shape memory polymers, (iii) self-healing polymers and (iv) conductive polymers.

Keywords: Smart Polymers, Hydrogels, Shape Memory Polymers, Self-Healing Polymers, Conductive Polymers

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilim ve teknolojideki gelişmelerle birlikte ortaya çıkan yeni teknolojiler, daha üstün özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesinde ve üretiminde büyük bir kolaylık sağlamıştır. Özellikle kompozit malzemelerle ilgili olarak son yıllarda yapılan çalışmalar, gelecekte akıllı malzemeler konusunda yapılacak çalışmaların daha da artacağını ve malzemelerin akıllı malzeme sınıflandırılmasında yer almasını sağlayacak farklı birçok yeni özelliğin malzemelere kazandırılmaya çalışılacağını öngörmektedir [1-2].

Bir malzemenin akıllı malzeme olarak sınıflandırılabilmesi, malzemenin çevresel uyaranlara (1sı, sıcaklık, mekanik ve manyetik) karşı tepki verme yeteneğini kazanması ve buna bağlı olarak performans veya özelliklerini değiştirebilmesi, malzemenin uyarıcılara karşı tepkilerinin açıklanabilir, anlaşılır ve öngörülebilir olması, enerji alış-verişinde bulunabilmesi (ışık yayan, elektrik üreten ve enerji değişimi yapabilen) ve tersine çevrilebilirlik (malzemenin niteliğinde ve fazında değişimin gerçekleşmesi ve bu değişimin geri alınabilir olması) gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir [1,3]. Akıllı malzemeler, günümüzde yukarıda kısmen ifade edilen avantajları nedeniyle gelişmiş uygulamalar için ilgi çekici bir malzeme sınıfı olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. Çevreye göre özelliklerini değiştirebilen ve duyusal yeteneklere sahip, otomatik olarak kendi kendini tamir edebilen, ısı ile şekil değiştirebilen veya manyetik alan uygulandığında anında faz değiştirebilen malzemeler, piezoelektrik malzemeler (sensörler ve aktüatörler), şekil hafızalı alaşımlar, manyeto-reolojik malzemeler ve elektro-reostat malzemeler akıllı malzemelerin kullanıldığı uygulamalara örnek alanlardır [3]. Çok fazla uygulama alanına sahip olsalar da, akıllı malzemelerin sınıflandırılmasıyla ilgili henüz akademik ve ticari olarak kullanılan ve yaygın kabul görmüş bir sınıflandırma sistemi mevcut değildir. Yeni kullanım alanları ortaya çıktıkça bu malzemelerde akıllı malzeme sınıfına dahil edilmektedir. Günümüzde termoelektrikler, multiferroikler, mangnetokalorik malzemeler, magnetoreolojik ve elektroreolojik akışkanlar, şekil hafızalı malzemeler, termo ve ışığa duyarlı polimerler de akıllı malzemeler sınıfına eklenmiştir. Ayrıca, sıcaklık, çözücü bileşimi, pH gibi dış koşullarda küçük bir değişiklikle hacmini yüzlerce kez değiştirebilen polimer jeller de akıllı malzemeler olarak kabul edilmektedir [2].

Bir polimerin akıllı malzeme tanımlanabilmesine; çevresel uyaranlara (sıcaklık, nem, pH, ışık yoğunluğu, elektriksel veya manyetik alan vb. gibi dış etkenler) karşı tepki vermesi, renk veya transparanlığını değiştirmesi, iletken veya su geçirgen hale gelmesi ya da şekil değiştirerek bu tepkiye yanıt vermesi gibi özellikler örnek olarak verilebilir. Akıllı polimerlerin tepki oranı, fonksiyonel uyaranların yoğunluğu ile kontrol edilebilmektedir. Akıllı polimerlerin fizyokimyasal özelliklerinin değişimi ve kontrolü, farklı uygulamalarda kullanımı ve istenilen özelliklerin düzenlenebilmesi için tercih edilmektedir [5-6]. Akıllı polimerler genel olarak, sıcaklığa duyarlı polimerler, pH'a duyarlı polimerler, ışığa duyarlı polimerler, kendinden iletken polimerler, polimer hidrojeller, şekil hafızalı polimerler, kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler gibi geniş bir kullanım alanıyla karşımıza çıkmaktadır [5, 7].

Polimerler, seramik ve metallere göre sahip olduğu bazı avantajlar nedeniyle akıllı malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimerlerin kolay işlenebilirliği, proses kolaylığı, esnekliği, düşük ısıl ve elektrik iletkenliği, metallere oranla yüksek kimyasal ve korozyon direnci ve çok iyi mukavemet/ağırlık oranı vb özellikleri akıllı malzemeler için temel tercih sebepleri arasındadır [8-10]. İnsan vücudu ile uyumlu polimer türleri doku yenilenmesi, kıkırdak, kemik, periodontal doku, sinirlerin tamiri vb. biyomedikal sektöründe akıllı malzeme olarak tercih edilmektedir. Bu tür malzemelerin sahip olduğu şekil hafızası, polimerlerin kolay işlenebilmesini sağlamaktadır [2]. Polimerik misel ve dendrimer yapılar biyouyumlulukları nedeniyle ilaç taşınım sistemlerinde kullanılmaktadır. Biyouyumlu bir polimerden beklenen başlıca özellikler, biyolojik olarak parçalanabilmesi, parçalanma sonucu oluşan yapıların toksik olmaması ve bu yapıların vücut tarafından giderilebilmesidir [11]. Bazı akıllı biyopolimerler elektrofizyolojide, organik kimyasal transistörlerde, organik elektronik iyon pompalarında, elektronik tekstillerde, elektronik cilt vb. biyoelektronik alanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [12]. Polimerik akıllı hidrojeller ilaç/gen dağıtım sistemleri, doku mühendisliği protezleri, biyosensörler, fotoğrafçılık, boya/kaplama sektörü, aktüatörler vb. uygulamalarda büyük bir potansiyel kullanıma sahiptir [13].

Şekil hafızalı akıllı polimerler harici bir uyaran tarafından uyarıldığında önceden tanımlanmış kalıcı şeklini geri kazanma yeteneğine sahip polimerler şeklinde tanımlanmaktadır [14]. Uyaranların ısı, ışık, nem, manyetik alan, elektrik alan, basınç, pH olabildiği şekil hafızalı polimerler, havacılık, mühendislik, tıp, tekstil, litografi ve ev ürünlerinde önemli potansiyel uygulamalara sahiptir [15].

Akıllı polimerler sınıfında yer alan ve geniş bir kullanım alanına sahip olan kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler hasar oluştuğunda bunu hissedebilen ve hasar daha çok ilerlemeden bunu durdurarak kendi kendine tamir edebilen bir yapıya sahiptirler. Silikon bazlı kendi kendini

onaran/iyileştiren polimerler dinamik ağlarını yeniden düzenlemeleri sayesinde kendi kendini iyileştirebilmekte [16] ve bu özelliği nedeniyle hasarın önlenmesinin istenildiği enerji, biyomedikal gibi başlıca alanlarda kullanılmaktadır [17-18]. Kovalent bağlı kendi kendini onaran/iyileştiren hidrojeller, ilaç ve protein dağıtım sistemlerinde, doku-materyal bariyerlerinde, onarıcı tıpta [5] ve yara pansuman uygulamalarında [19] tercih edilmektedirler. Kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler kullanım alanı bulduğu uygulamalarda, temel olarak dış yardım olmadan kendi kendini iyileştirme veya kaybolan işlevlerin restorasyonu şeklinde faaliyet göstermektedir [20]. Kendi kendini onaran/iyileştiren polimerik malzemelerin kullanımı enerji, biyomedikal vb. sektörler için biyouyumluluk, maliyet, verimlilik, ürünün kullanım ömrünün uzaması gibi büyük avantajlar sağlamaktadır.

İletken polimerler, elektriksel iletkenliğe sahip konjuge karbon zinciri içeren polimerlerdir. İletken polimerlerin elektriksel iletkenliği metallerle karşılaştırılabilir nitelikte olup, iletkenlik yük taşıyıcı görevi gören boşluklara ve birbirini izleyen tek ve çift bağlardan oluşan karbon zincirlerine dayanır [21-22]. Bazı iletken polimerler esnek ve biyouyumlu olmasının yanında üretim ve uygulama kolaylığı da sağlamaktadır. Bu nedenle, medikal uygulamalar, robotik sistemler, tekstil ürünleri, transistörler, sensör ve biyosensörler vb. için önemli bir yapı iskelesi haline gelmiştir [23-24].

Akıllı malzemelerde polimer kullanımının birçok avantajı olmasına rağmen bazı kısıtlamaları da mevcuttur. Örneğin; polimerlerin erime ve bozunma sıcaklıkları düşüktür [25-26]. Sıcaklık özelliklerine bağlı olarak polimer malzemeler yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun değildir [27]. Bazı polimerler termal radyasyon, atmosferik koşullar ve UV ışını altında bozuna bilmektedir. Bu bozunmayı önlemek ve yapıyı iyileştirmek için polimerik yapıya üretim esnasında çeşitli katkı ve dolgu maddeleri katılmaktadır [28-29].

Doku mühendisliğinde boşluk doldurma malzemesi ve hücre ve ilaç dağıtımı için kullanılan biyopolimer esaslı iskelelerin implantasyonunun ameliyat gerektirmesi bir eksiklik olarak görülmektedir [29]. Benzer şekilde kendi kendini onaran/iyileştiren polimerlerde daha önce hasar görmüş ve iyileşmiş bölgelerde tekrarlanan iyileşme ile ilgili sınırlamalar bulunması, ilaç salınım sistemlerinde kullanılan ısıya duyarlı bazı polimerlerin biyolojik olarak bozunmama, parçalanma ve lokal ısı kontrolü altında kontrollü ilaç salımı gerçekleştirme gibi sınırlamaları akıllı polimerlerin kullanımlarında bir dezavantaj oluşturmaktadır [30].

Akıllı polimelerin kullanım alanları, avantaj ve dezavantajları, akıllı polimer teknolojilerindeki son gelişmelerle ilgili çalışmalar oldukça sınırlı ya da tek bir alana (kullanım alanına) odaklanmaktadır. Bu durum, akıllı polimerler konusundaki güncel gelişmelerin takip edilmesini ve farklı alanlara uyarlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada; akıllı polimer teknolojilerindeki son gelişmeler mevcut çalışmalar doğrultusunda incelenecek, polimerlerin akıllı malzeme olarak kullanımının avantajları, dezavantajları, akıllı polimer teknolojilerindeki son gelişmelerin ışığı altında değerlendirilecektir. Bu çalışma ile akıllı polimerlerin mevcut kullanım alanlarına ek olarak gelecekteki potansiyel uygulamalarının belirlenmesi, akıllı polimer teknolojilerindeki güncel gelişmelerin izlenmesi, akıllı polimerler konusunda temel bir sınıflandırmanın oluşturulması, literatürün derlenmesi, konu hakkında çalışanlar ve konuya ilgi duyanların başvuracağı Türkçe bir kaynak oluşturulması amaçlanmaktadır.

2. AKILLI POLİMERLER ve SINIFLANDIRILMASI (SMART POLYMERS and THEIR CLASSIFICATION)

Akıllı malzemeleri tanımlamada kullanılan standart bir tanım yoktur. Akıllı malzemeler için en yaygın kabul gören tanımlama, malzemenin dışsal bir uyarana tepki olarak özelliklerinin birini veya daha fazlasını öngörülebilir ve kullanışlı bir şekilde değiştiren bir malzemeyi belirtmesidir [31] Zeki malzemeler ya da aktif malzemeler şeklinde de isimlendirilen akıllı malzemeler terimi, eşsiz özelliklere sahip bir grup malzeme grubunu ifade etmektedir [32] Addington ve Schodeck'e [33] göre; bir malzemenin akıllı malzeme olup olmadığı:

- Aciliyet: Gerçek zamanlı olarak uyaranlara tepki verme
- Geçicilik: Birden fazla çevre durumuna tepki verebilme
- Kendini harekete geçirme: Zekâ, malzemenin dışından değil, dahili bir hareket ile

- Seçicilik: Uyaranlara verdiği tepkiler ayrık ve öngörülebilir
- Doğrudanlık: Uyaranlara verdiği tepkileri lokal olarak etkinleştirme

incelenerek ayırt edilebilir. Farklı kullanım ve uygulama alanları, polimer türleri dikkate alındığında, akıllı polimerleri sınıflandırmak oldukça zordur. Ancak bugüne kadar yapılan bilimsel çalışmalar ve kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda, akıllı polimerleri Şekil 1'de gösterildiği gibi dört temel başlık altında ele alarak incelemek mümkündür. Buna göre akıllı polimerler, (i)akıllı polimerik jeller, (ii)şekil hafızalı polimerler, (ii)kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler ve (iv)uyaranlara duyarlı polimerler şeklinde sınıflandırılabilir. Her ne kadar konuyu daha anlaşılır hale getirmek adına böyle bir sınıflandırma yöntemi seçilmiş olsa da akıllı polimerler aslında birbirleriyle oldukça güçlü bir etkileşime ve bazı benzer özelliklere sahip olan malzemelerdir.



Figure 1. Classification of smart polymers

3. AKILLI POLİMERİK JELLER (SMART POLYMERIC GELS)

Hidrojeller, fiziksel veya kimyasal olarak çapraz bağlanabilen üç boyutlu ağ yapı özelliğine sahip polimerlerdir. Hidrojeller, hidrofilik fakat çapraz bağlı yapıları nedeniyle polimeri çözmeden, sudaki kuru ağırlıklarının binlerce katına kadar büyük miktarda suyu emen üç boyutlu (3B) doğal veya sentetik polimerik ağlar şeklinde de tanımlanabilir [4, 34]. Bir jelin hidrojel olarak tanımlanabilmesi için kendi ağırlığının en az %20'si kadar su absorplayabilmesi gerekmektedir [35]. Genel olarak hidrojeller, su ile etkileştiklerinde çözünmez ve çözücüyü içine alarak şişerler. Bu durumun gerçekleşmesi, polimer zincirinde yer alan hidrofilik özelliğe sahip grupların varlığı ve ağ şeklindeki gözenekli yapıdan kaynaklanmaktadır [36]. Sahip olduğu su tutma kapasitesi, yumuşak ve esnek yapıları ile hidrojeller canlı dokulara benzerlik göstermektedir. Suda çözünen maddeler için geçirgen olmaları, insan vücudu ile uyumlu olmaları, su ile etkileşip şiştiğinde yumuşak ve düşük sürtünmeye sahip olmaları, ilaç salınım sistemlerinde kullanılabilmeleri, yüksek su tutma kapasiteleri hidrojellerin en önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bunun yanında hidrojellerin zayıf mekanik dayanıma sahip olması, mukavemet gerektiren alanlarda (kemik dokusu gibi) kullanımını kısıtlamaktadır [37]. Hidrojellerin kullanım alanları; kontakt lensler, yapay tendon materyalleri, biyosensörler, yüzey örtü malzemeleri, yapay kas, yapay deri, ilaç salım sistemleri, estetik cerrahi, tarımda akıllı sulama sistemleri, ağır metal giderimleri vb. şeklinde sıralanabilmektedir [30-38].

Akıllı hidrojeller, çevresel koşullarda küçük dış değişikliklere (uyaranlara) yanıt olarak ani tersinir hacim faz geçişlerine veya sol-jel faz geçişlerine maruz kalan hidrojeller olarak tanımlanır. Geleneksel hidrojellere kıyasla akıllı hidrojellerin bu tepkilere yanıtı daha hızlıdır. Akıllı hidrojeller için literatürde çok farklı sınıflandırma yöntemi mevcuttur. Ancak yaygın olarak akıllı hidrojeller; (i) uyarıcıya duyarlı şekil değiştiren hidrojeller (sıcaklığa, Ph vb.) (ii) sıvı kristalli hidrojeller şeklinde iki ana gruba ayrılmaktadır [39].

3.1. Uyarıcıya duyarlı akıllı hidrojeller (Stimuli sensitive smart hydrojels)

Uyaranlara duyarlı polimerler, sıcaklık [40] mekanik stres [41] manyetik/elektrik alan [42] nem

D. MUTLU, İ. KARAGÖZ

dalgalanmaları, pH [43] bazı küçük moleküller (CO₂ vb.) ve bazı biyomoleküller (glikoz vb.) gibi dış parametrelere tepki veren akıllı polimerlerdir. Dış uyaranlara verilen tepki, polimerin şekil, renk ve çözünürlüğündeki fiziksel veya kimyasal bir değişiklik olabilmektedir [15, 44-45]. Bu tür akıllı polimerler, biyoloji ve tıp alanlarında birçok uygulamada potansiyel kullanıma sahiptirler. Örneğin; sensör ve biyosensör olarak kontrollü ilaç dağıtımında [45-46] çevresel iyileştirmede [47] ve kemo-mekanik aktüatörlerde [48] yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Uyarıcıya duyarlı akıllı hidrojeller, programlanabilir doğası gereği tipik hidrojellerden ayrılmaktadır. Uyaranlara duyarlı hidrojeller, ışık, sıcaklık, kimyasallar, pH, elektrik sinyali gibi dış uyaranlara yanıt olarak şekillerini değiştirebilmektedir. Uyaranlara duyarlılıkları, yüksek hidrofilik özellikleri, moleküllerin hızlı difüzyon yetenekleri, biyouyumlulukları ve aynı zamanda yumuşak yapıları nedeniyle birçok farklı uygulamada tercih edilmektedir. İlaç/gen dağıtım sistemleri, biyosensörler, sıvı kontrolü, aktüatörler, hücre kültürü, algılama uygulamaları, ayırma işlemleri başlıca kullanım alanları olarak karşımıza çıkmaktadır [30-31]. Bu uygulamaların çoğunda, uyaran hidrojelin şişme derecesini etkileyen moleküler bir değişime (iyonizasyon, çapraz bağlanma) neden olur.

3.2. Işığa duyarlı akıllı hidrojeller (Light sensitive smart hydrojels)

Sıcaklık dışında, uyaranlara duyarlı polimerlerin ışık ve pH'a duyarlı türleri üzerine de çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin; iyonize olabilen fonksiyonel gruplara sahip pH'a duyarlı polimerler, çevresel pH değişikliklerine bağlı olarak proton bağışlayabilen veya proton kabul edebilen özelliği sahiptir. Bazı yaygın örnekler, akrilik asit (AAc) [49-50] ve N,N-dimetilaminoetil metakrilattır (DMAEMA) [51-52]. Işığa duyarlı monomerler hem sıcaklık hem de ışık duyarlılığı sergileyen malzemeleri üretmek için de kullanılabilir. Buna yaygın bir örnek azobenzendir [53-54]. Çoğu durumda bu polimerlerin tepkisi, polimere dahil edilen ışığa duyarlı moleküllerin ışıkla tetiklenen izomerizasyonu veya ışıkla tetiklenen iyonizasyonu ile gerçekleşmektedir. Benzer şekilde; biyolojik olarak duyarlı sistemlerden de, örneğin, enzime [55] ve glikoza [56] gibi biyolojik yapılarda doğal olarak mevcut olan uyaranlara yanıt verme özelliğine sahip polimerler üretilebilir [57].

Zhao [58] blok kopolimer misellerinin foto-indüklenmiş bozulmasına yol açan temel mekanizmalar geliştirmiştir. Geliştirilen bu mekanizmalar biyomedikal uygulamalar için çok önemli olan uyarma dalga boyu sorununa çözümler sunmuştur. Foto-tepki blok kopolimerlerinin kendi kendine montajı yoluyla oluşturulan polimer miseller veya veziküller, kontrollü ilaç dağıtımı için taşıyıcılar olarak kullanılabilmektedir. Foto kontrollü polimer miseller için genel mekanizma Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüleceği gibi malzemeler ışığa maruz kaldığında, foto kromik gruplarla modifiye edilmiş blokta çözünürlük değişiklikleri meydana gelir ve bunun sonucunda miseller çözülür. Birinci yaklaşım (Şekil 2a), blok kopolimerlerin (BKP) hidrofilik-hidrofobik dengesinin optik olarak kaydırılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda; misel içinde hidrofobik bloğun polaritesinde (veya suda çözünürlüğünde) bir artışla sonuçlanan bir fotokimyasal reaksiyon meydana gelir. Bu değişiklik, hidrofilik-hidrofobik dengeyi miselin kararsızlaşmasına doğru kaydırır ve böylece sulu çözeltide çözülmeye yol açar. İkinci yaklaşımda (Şekil 2b), bir foto reaksiyon, hidrofilik ve hidrofobik blokların birleşimini basitçe keserek misel bozulmasına yol açar. Üçüncü yaklaşım (Şekil 2c), BKP miselinin hızlı foto-indüklenmiş bozulmasını sağlayan hidrofobik bloğun ana zinciri boyunca tekrar tekrar fotoparçalanabilir birimlerin yerleştirilmesinden oluşur. Dördüncü yaklaşımda (Şekil 2d) ise, BKP misellerinin tamamen optik stabilizasyonu ve dengesizleştirilmesi için tersinir bir foto çapraz bağlama reaksiyonunu göstermektedir. Blok kopolimerler, özellikle misel stabilitesinin gerekli olduğu durumlarda yararlıdır. Reaksiyon tersine çevrilip farklı bir dalga boyu kullanıldığında, foto-indüklenmiş çapraz bağlanma (misel oluşumu) ve foto-indüklenmiş kararsızlaştırma (misel yapının bozulması) mümkün olabilmektedir.



Şekil 2. Çeşitli tipte ışığa duyarlı blok kopolimer miseller (a–d) şematik gösterimi [58] *Figure 2.* Schematic representation of various types of photosensitive block copolymer micelles (a–d) [58]

Peng ve ark. [13] tarafından çapraz bağlanma, bir proteinin salınımını kontrol etmek için dekstran hidrojellerine uyarlamış ve konak-misafir molekülleri dekstran omurgasına bağlanmıştır. Trans formunda, konak-konuk kompleksi oluşturulmuş, böylece dekstranın etkin bir şekilde çapraz bağlanması ve hidrojel oluşumu sağlanmıştır. Sistemde yeşil floresan proteini (GFP) kapsüllenmiştir. Çapraz bağlı sistemde, GFP jelin içinde kalır, ancak UV ışık ışınımından sonra GFP jelden difüze olabilir ve serbest bırakılır. Peng ve ark. tiyol-maleimid reaksiyonunu kullanarak dekstranlar, azobenzen (AB) veya β siklodekstrin (CD) parçaları ile işlevselleştirmiştir. Amaçları bu polimerleri proteinlerin ışık kontrollü salımı için supramoleküler olarak çapraz bağlanmış bir hidrojelin yapı taşları şeklinde kullanmaktır. Sistemin mekanizması temel olarak şu şekilde gerçekleşmektedir: (*i*)azobenzenler(AB) trans konfigürasyonundayken jel oluşumunu indükler, (*ii*)UV ışığı (365 nm) ile ışınlamadan sonra azobenzen kısımları transtan cis konfigürasyonlarına izomerleşir, (*iii*)bu izomerleşme çapraz bağlantı noktalarının ayrılmasına neden olur ve (*iv*)hapsedilmiş proteinin ortama göç etmesine izin verir. Şekil 3'te yukarda açıklanan sistem şematik olarak verilmiştir. Bu strateji çapraz bağlı formda polimer ağının dışına yayılmayan, büyük moleküllere (yani protein, DNA veya yüksek moleküler ağırlıklı bir ilaç) uygun olarak geliştirilmesine olanak sağlamıştır.



Şekil 3. Trans yapıda bulunan jelden ışığa duyarlı protein salınımının şematik gösterimi [13] Figure 3. Schematic representation of photosensitive protein release from the trans-structured gel [13]

3.3. Sıcaklığa duyarlı akıllı hidrojeller (Temperature sensitive smart hydrojels)

Sıcaklık, uyaranlara duyarlı polimerlerde üzerine en fazla çalışma yapılan alanlardan biridir. Sıcaklıktaki değişikliklerin dışarıdan müdahalesiz bir şekilde uygulanabilmesi sıcaklığa duyarlı polimerleri ilgi odağı haline getirmiştir. Bazı polimerler daha "düşük kritik çözelti sıcaklığı" (LCST) sergiler. Düşük kritik çözelti sıcaklığı, sıcaklıkla indüklenen (sıcaklık kaynaklı) karışım gidermenin meydana geldiği en düşük sıcaklıktır [59]. LCST'nin altındaki sıcaklıklarda, sistem her oranda tamamen karışabilir. LCST'nin altında polimer zincirleri ve solvent molekülleri homojen olarak karışmış fazdadır. LCST'nin üzerinde ise faz ayrımı entropik olarak yönlendirilen bir işlem yoluyla gerçekleşir. Sıcaklığa duyarlı hidrojeller, sıcaklık değişimlerine maruz kaldıklarında şişme özelliklerini değiştirebilme yeteneğine sahiptir. Düşük kritik çözelti sıcaklığı (LCST) ve yüksek kritik çözelti sıcaklığı (HCST) olmak üzere, sıcaklığa karşı farklı davranışa sahip iki tür hidrojel mevcuttur. Sıcaklık artışı, LCST'de şişmeyi azaltırken, HCST ise şişmeyi arttırır [27]. Sıcaklığa duyarlı akıllı hidrojeller, ağ yapılarını, kinetiklerini, geçirgenliklerini, mekanik kuvvetlerini ve yüzey özelliklerini ortamın sıcaklığına göre değiştirir. LCST'den daha düşük sıcaklıklarda sıvı, hidrojelin hidrofilik kısmı ile etkileşir ve hidrojen bağları oluşturur. Bu etkileşim jel şişmesini arttırır. Ancak sıcaklık yükselip LCST'den daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında, hidrofobik etkileşimler güçlenir ve hidrojen bağları azalır. Bu fenomen, interpolimer zincir birleşiminden dolayı jelin büzülmesi şeklinde açıklanabilir [32].

Poli(N-izopropilakrilamid) (pNIPAm), ~32°C'de bir LCST sergileyen ve üzerinde en çok çalışılan sıcaklığa duyarlı polimerlerden biridir [60-61]. Çözelti sıcaklığı LCST'nin üzerine çıktığında, pNIPAm zincirleri uzatılmış (çözülmüş) rastgele bir bobinden kompakt (çözülmemiş) bir küresel konformasyona geçiş yapar [62]. Polimer zincirlerinin, bobin şeklinden (çözülmüş) globüle (çözülmemiş) geçişi, polimer bileşimi ayarlanarak termodinamik olarak kontrol edilebilir. Polimerin sırasıyla bir hidrofilik veya hidrofobik monomer ile kopolimerizasyonu, LCST'nin daha yüksek veya daha düşük sıcaklığa kaymasını sağlamaktadır [63-64]. Saf pNIPAm hidrojelleri genellikle sınırlı bir ilaç yükleme kabiliyetine sahiptir ve hidrojellerdeki basit fiziksel etkileşim kuvvetleri nedeniyle sürekli bir ilaç salınımı için uygun değildirler. Bu durum ilaç dağıtımındaki uygulamalarını büyük ölçüde engellemektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla Cao ve ark. [65] I3K peptidini pNIPAm ile karıştırarak hibrit bir hidrojel üretmiştir (Şekil 4a). Bu sistemde, sıcaklık 33 °C'nin üzerine çıktığında bir 3D hidrojel ağı oluşturmak için I₃K kendinden montajlı fibriller, pNIPAm ile karıştırılmıştır. Hidrojen bağlanması, hidrofobik etkileşim ve sterik engel gibi fiziksel etkileşimler tarafından yönlendirildiği için bu sol-jel prosesi sıcaklık değişimi ile tersine çevrilebilir özellik göstermektedir (Şekil 4b). Çalışmada; model ilaç olarak antibakteriyel peptit G(IIKK)3I-NH² kullanılmıştır. İlaç, daha düşük bir sıcaklıkta doğrudan I₃K/PNIPAM karışık çözeltisine eklenmiştir. Daha sonra jelleşmenin gerçekleşmesi ve model ilacın kompozit hidrojel içinde kolayca kapsüllenmesi için sıcaklık 33 °C 'nin üzerine çıkartılmıştır. Bu ilaç yüklü hidrojel yüksek sıcaklıktaki suya konulduğunda,

G(IIKK)₃I-NH₂ hidrojelden sürekli ve doğrusal bir şekilde salınabilir. Bu kompozit sistem, PNIPAM'ın sıcaklığa duyarlı faz geçişini ve peptit fibrillerinin ilaç yükleme yeteneğini birleştirerek kontrollü ilaç salımı ve termo-ters çevrilebilirlik gibi avantajlar sunmaktadır. Farklı şekillerde kompozit hidrojellerin geliştirilebilmesi pratik ilaç salınım uygulamaları için son derece umut vericidir.



Şekil 4. a)Termotersinir peptit/pNIPAm karışık hidrojellerinin hazırlanması ve kontrollü salım için antibakteriyel peptit G(IIKK)³ I-NH² 'nin yüklenmesi, b)pNIPAm LCST'nin altında veya üstünde sıcaklıkta I³K/pNIPAm ağlarının önerilen durumlarının şematik diyagramları [65] Figure 4. a) Preparation of thermoreversible peptide/pNIPAm mixed hydrogels and loading of antibacterial peptide G(IIKK)³ I-NH² for controlled release, b) Schematic diagrams of the proposed states of I3K/pNIPAm networks at temperature above or below the pNIPAm LCST [65]

Sıcaklığa duyarlı akıllı hidrojellerin birçoğu (örneğin; homopolimer ve kopolimer NiPAAm) biyolojik olarak parçalanmamaktadır [66]. Biyomedikal uygulamaları için bazı hidrojellerin biyolojik olarak parçalanabilmesi istenmektedir. Bu amaçla; Nakayama ve ark. [33] kontrollü ilaç salımı için termal olarak duyarlı, biyolojik olarak parçalanabilen polimerik miseller hazırlamışlardır. Araştırmacılar, suda çözünmeyen ilaçları sisteme dahil etmek için misellerde hidrofobik bir blok kullanmışlardır. Bu sayede biyolojik olarak parçalanabilen, kontrollü boyutlara ve 40 °C civarında bir LCST'ye ve faz geçiş sıcaklıklarına sahip hidrofobik polimerik miseller üretmişlerdir. Isıya duyarlı blok LCST'nin altındaki sıcaklıklarda miselin dış kabuğunu oluşturur. Ancak LCST'nin üzerindeki sıcaklık artışıyla beraber blok giderek hidrofobik hale gelerek küçülür ve salınım gerçekleşir. Şekil 5'te sıcaklık artışına bağlı olarak polimer miselden ilaç salınımı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5. Sıcaklık artışına bağlı olarak polimer miselden ilaç salınımı [33] Figure 5. Drug release from polymer micelle due to temperature increase [33]

3.4. pH duyarlı akıllı hidrojeller (pH sensıtıve smart hydrogels)

pH'a duyarlı polimerler omurga yapılarında iyonlaşabilen gruplar içeren polielektrolit yapıdadırlar. Bulundukları ortamın pH'ındaki bir değişikliğe tepki olarak hacimlerini değiştirebilme yeteneğine sahiptirler. Çevresel pH değişikliklerine tepki olarak protonları kabul edebilir veya serbest bırakabilirler. Çok küçük pH değişikliklerini (10-⁵ pH kadar) dakikalar içinde tespit edebilmekte ve yüksek hassasiyetle önemli ölçüde şişebilmektedirler [67-68]. pH'a duyarlı bir hidrojelin iyonizasyon derecesi (pKa veya pKb), pH'taki değişikliklere göre değişir. Polimer zincirinin net yükündeki bu değişiklik, hidrojelin elektrostatik itici kuvvetler nedeniyle hacim deformasyonuna uğramasına neden olmakta ve bu durum büyük bir ozmotik şişme kuvveti yaratmaktadır [4, 34]. Süreci yöneten ana fenomen, sulu ortamdaki pH değişimlerinden dolayı hidrojen iyonlarını ayrıştırma ve ilişkilendirme yeteneğidir. Bu protonasyondeprotonasyon tersine çevrilebilir olduğundan, hidrojel şişmesi-büzülmesi ortamdaki çözeltinin pH'ı değişitrilerek kolayca tersine çevrilebilir [34- 36].

Ph'a duyarlı akıllı hidrojeller, geniş ölçüm aralıkları nedeniyle pH algılamasına bağlı olarak geliştirilen sistemler için umut vericidir [67-68]. pH'a duyarlı hidrojel tabanlı sensörlerin küçültülebilir olması ve mikro sistemlerle birleştirilebilmesi [69-70] ilaç sanınım sistemleri, epidermal yara izleme, ilaç salma kemoterapisi, mide ve bağırsağa ilaç dağıtımı gibi biyomedikal uygulamalar için önemli bir kullanım potansiyeli oluşturmaktadır. pH'a duyarlı hidrojellerin yara durumunu izleme ve aynı anda ilacı salma kabiliyeti yakın zamanda Bahram ve ark. [71] tarafından rapor edilmiştir. Çalışmada, pH'a duyarlı hidrojel, antibiyotik ajanları serbest bırakmış ve pH saptamasını bir gösterge şeklinde kullanarak yara bölgelerinin bakteriyel enfeksiyonları izlenmiştir (Şekil 6). Şekil 6'da şematize edilen pH'a duyarlı hidrojel, radikal kopolimerizasyon voluyla poli(N-izopropilakrilamid-koakrilik asit) üretilmistir. Hidrojel, yaranın 14 gün boyunca sahip olacağı pH (6.7-7.9) aralığına bağlı olarak, farklı oranda salınımı yapılacak olan sığır serum albümini (BSA), vasküler endotelyal büyüme faktörü ve epitermal büyüme faktörü ile yüklenmiştir. Sistemde, büyüme faktörlerinin serbest bırakılması, yara pH'ındaki bir artışla artacak şekilde ayarlanmıştır. Büyüme faktörleri ile yüklenen hidrojel, murin eksizyonel yara modelinde test edilmiş ve geleneksel sürekli salım büyüme faktörü tedavisine kıyasla yara iyilesmesinde bir artış gösterdiği görülmüştür. Bakteriyel enfeksiyonları tespit etmek için hidrojel doğruluğu, ticari sistemlerle karşılaştırılabilir niteliktedir. Çalışmada akıllı telefonlardan yara koşullarının okunması ve takibi için faydalanılmıştır.



Şekil 6. Yaraları izlemek ve iyileştirmek için kullanılan yara örtüsünün şeması ve pH'a duyarlı ilaç salma sistemi [71]
Figure 6. Diagram of dressing and pH sensitive drug delivery system used to monitor and heal wounds [71]

3.5. S1v1 kristalli hidrojeller (Liquid crystalline hydrogels)

Sıvı kristal elastomerler (LCE'ler), tersinir mezomorfik-izotropik faz geçişlerine maruz kalabilen, ana zincir veya yan zincirinde sıvı kristal birimleri içeren elastik polimer ağlardır. Sıvı kristal alanlar tipik olarak birbirlerine göre rasgele yönlendirilir ve bu nedenle sıvı kristal çoklu alanlar olarak isimlendirilir. Bir sıvı kristal elastomer ağının oluşumu sırasında dışarıdan harici bir manyetik alan, germe kuvveti vb. uygulanarak sıvı kristal alanlar belirli bir yönde hizalanabilirler [37-38]. Polimer zincirlerinin hizalandığı bu durum "sıvı kristalin monodomen" olarak adlandırılır. Bu yapılar zincirlerin gerdirilmiş hali olarak düşünülebilir. Polimer belli bir sıcaklık değerinin üzerinde ısıtıldığında zincir anizotropisi azalarak büzülme gerçekleşir [39, 72]. Polimer belli bir sıcaklık değerinin altına soğutulduğunda ise orijinal anizotropik duruma gelir ve uzar.

Sıvı kristal elastomerler ilgi çekici şekil değiştirme davranışlarına sahiptir. Ancak geçiş sıcaklıklarının ayarlanması ve sentezlenmesindeki zorluklar, LCE'lere alternatif malzeme arayışlarına neden olmuştur. 2008'de Mather ve ark.[73] yarı kristal bir polimer ağının benzer bir davranış sergilediğini gösteren önemli bir keşif bildirmiştir. Lendlein ve ark. [74] ise 2010 yılında yayımladıkları çalışmada, iki farklı erime geçiş sıcaklığına sahip yarı kristal bir ağın, sabit bir dış stresin varlığında, farklı şekiller arasında (orijinal şekil, ısıtıldıktan sonra ve soğutulduktan sonra uygulanan çekme kuvvetine bağlı olarak malzemenin kazandığı diğer şekiller arasında) geçiş yapabilen üçlü bir sistem bildirmiştir.

Sıvı kristal hidrojeller, biyo-iskeleler, kütle taşıma sistemleri, yumuşak robotik ve optik alanlar gibi uygulamalarda farklı ayarlanabilir özellikleri sayesinde dikkat çekmektedir [75-77]. Zhang ve ark. [78] hidroksipropil selüloz (HPC), termal duyarlı Poli(akrilamit-ko-akrilik asit) (PACA) ve karbon nanotüplerin (CNT) avantajlarını entegre ederek E-cilt için istenen bir selüloz hidrojel modelini üretmişlerdir. Araştırmacılar tarafından; HPC'nin fotonik sıvı kristal yapı oluşturabildiği ve katkı maddeleri ile parlak yapısal renk gösterebildiği, CNT'lerin yapısal rengin doygunluğunu arttırdığı ve PACA'nın polimerizasyondan sonra HPC monte edilmiş yapıyı bulabildiği rapor edilmiştir. Kompozit hidrojelin HPC ve PACA yapı iskelesi sayesinde, sıcaklık değişimleri, mekanik basınç ve gerilim dahil olmak üzere farklı uyaranlar altında hacmini veya dahili nanoyapıyı değiştirebildiği ve bunları görünür renk anahtarlarına dönüştürdüğü ifade edilmiştir. İletken CNT'ler sayesinde, hidrojelin dahili nanoyapılarla değişen direnci elektrik sinyali çıktısı şeklinde alınabilmiştir. Böylece, E-derilerden oluşan kompozit hidrojeller, elektrik sinyalleri yoluyla çoklu uyaranları nicel olarak geri beslemekle kalmayıp,

aynı zamanda uyaran bölgenin konumunu da renk değişimi yoluyla görsel olarak belirleyebilecektir. Bu özellikler, iletken selüloz sıvı kristal hidrojelin, çok işlevli E-derinin tasarımında ve imalatında yeni bir çığır açabileceğini göstermektedir. E-cilt, uyaranlar altında bu ikili yanıt veren mekanizması nedeniyle, sağlık hizmetlerinde ve değişken cihazlarda büyük bir kullanım sahiptir.

Şekil 7'de Bukalemundan esinlenilen ve selüloz sıvı kristal hidrojel kullanılarak üretilen çok işlevli bir E-deri örneği verilmiştir. Bukalemun derisi, periyodik guanin nanokristal dizileri içerisindeki kontrol yoluyla rengini değiştirme yeteneğine sahiptir [78]. Bu özelliği taklit etmek için, periyodik nanoyapılar kazandırılarak oluşturulan ve akıllı tepki veren polimerlere, ışık yayılımını modüle edebilen akıllı yapısal renk hidrojelleri eklenmiş ve istenilen renk değiştirme özelliği elde edilmiştir [79-80].



Şekil 7. lletken selüloz yapısal renkli hidrojelin şemaları. a) Bukalemunun renk değişimi. b) Nano yapının şeması ve iletken selüloz yapısal renkli hidrojelin bileşimi [78]

Figure 7. Schematics of the conductive cellulose structural colored hydrogel. a) The color change of the chameleon. b) Diagram of nanostructure and composition of conductive cellulose structural colored hydrogel [78]

4. ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER (SHAPE MEMORY POLYMERS)

Şekil hafızalı malzemeler, harici bir uyaranla şekillerini değiştirebilen ve dış uyaran kaldırıldığında ve/veya doğru uyaran uygulandığında önceden tanımlanmış orijinal şekillerini geri kazanma yeteneğine sahip olan malzemelerdir [81-82]. Şekil hafızalı polimerler, şekil değişikliklerini mikroskobik veya makroskopik olarak gerçekleştirebilirler. Şekil değişikliği üretim esnasında aldıkları şekil ile uyarılma sonrası aldıkları şekil arasında değişmektedir. Bu değişiklik genellikle birkaç dönüşüm çevrimi ile sınırlıdır [29]. Polimerlerin yanı sıra seramikler ve metal alaşımlar da şekil hafıza özelliğine sahiptir. Ancak şekil değiştirme ve tekrar orijinal şeklini geri kazanma mekanizmaları birbirinden oldukça farklı şekilde gerçekleşmektedir [81]. Şekil hafızalı alaşımlarda uyaranlar ısı ve manyetik alanla sınırlıyken, şekil hafızalı polimerlerde bunlara ek olarak soğutma, ışık ve kimyasallar da kullanılabilmektedir [83-85].

Genel olarak, şekil hafızalı polimerler dendiğinde ilk akla gelen tek yönlü şekil hafızalı polimerler olsa da, polimerlerde şekil hafıza etkisi "tek yönlü, çift yönlü ya da çok yönlü" olabilmektedir. Tek yönlü şekil hafızalı polimerler iki aktif fazdan oluşmakta ve bir fazdan diğerine geçişi aktive edebilecek bir dış uyaran gerekmektedir. Bu iki fazın biri polimerin başlangıç şeklini ezberleyebilen sabitlik fazı, diğeri ise geçici şekli sabitlemeye izin veren "anahtar fazı" olarak işlev görmektedir. İki faz arasındaki geçiş, dış uyaran tarafından düzenlenen bir "programlama" ve "düzelme/iyileşme" aşamasından oluşur. Programlama aşaması, sabitlik şeklinden geçici şekli düzeltirken, iyileşme aşaması malzemeyi geçici şekilden sabit şekline geri çevirmektedir [86].

Behl ve ark. [81] termal olarak indüklenen şekil hafızalı polimerlerde, sıcaklığın etkisiyle "programlama" ve "düzelme/iyileşme" fazları arasındaki geçişi incelemişlerdir. Araştırmacılar, malzemenin geçiş sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta şekillendirilmesi ve soğutulmasının polimer zincirlerinin

kristalleşmesine yol açtığını bulmuşlardır. Şekil 8'de termal olarak indüklenen şekil hafıza etkisinin moleküler mekanizması şematik olarak verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi; en yüksek termal geçiş sıcaklığı (Tperm) ile ilgili alanlar sert segmentler (sert kısım) olarak işlev görmektedir. İkinci en yüksek termal geçiş Ttrans'a sahip alanlardaki zincir bölümleri ise moleküler anahtarlar (bir anahtarlama bölümü) olarak işlevine sahiptir. Malzemenin geçiş sıcaklığının üzerinde şekillendirilmesi ve ardından soğutulması, segmentlerin kristalleşmesine yol açar. Geçici şekil, fiziksel çapraz bağlarla sabitlenir. Malzemeyi geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtmak, kristal yapının yeniden erimesine neden olur ve malzeme orijinal şekline geri döner. Şekil hafıza etkisinde, şekil programlama ve şekil kurtarma aşamalarının gerçekleşmesi için malzemenin esnek bir yapıda olması gerekmektedir.



Şekil 8. Termal olarak indüklenen şekil hafıza etkisinin moleküler mekanizması. Ttrans = Anahtarlama aşamasıyla ilgili termal geçiş sıcaklığı [81]

Figure 8. Molecular mechanism of thermally induced shape memory effect. Ttrans = Thermal transition temperature associated with the switching stage [81]

Polimerik malzemelerde şekil hafızası etkisini üretebilen birçok uyaran vardır. Örneğin; sıcaklıktaki bir değişikliğin neden olduğu şekil değişikliğine termal olarak indüklenen şekil hafızası etkisi denir [87]. Termal olarak indüklenen şekil hafızalı elastik polimerlerde uygun uyaranlara duyarlı moleküler anahtarlar ve ağ noktaları bulunur. Ağ noktaları, polimer ağının kalıcı şeklini belirler ve fiziksel (moleküller arası etkileşimler) veya kimyasal (kovalent bağlar) nitelikte olabilir. Şekil hafızalı polimerlerin en bilinen ticari uygulamaları arasında, kablo endüstrisinde kullanılan ısıyla büzüşebilen borular, ambalaj için kullanılan ısıyla büzüşebilen etiketler ve büzgülü oyuncaklar sayılabilir. Biyomedikal ve havacılık alanlarındaki diğer yüksek katma değerli uygulamalarda kullanımı da aktif olarak araştırılmaktadır [88-90]. Lendlein ve ark. [91] şekil hafızalı polimerlerin performansını incelemişlerdir. Çalışmada, Şekil 9'da gösterildiği gibi çubuk şeklinde kalıcı bir şekle sahip olan malzeme programlama sırasında spiral bir geçici sekle deforme olmuştur. Malzeme 70 °C'lik sıcak havanın etkisi altında, trans anahtarlama sıcaklığına ulaşmış ve kalıcı şeklini geri kazanmıştır. Oligo(«-kaprolakton) dimetakrilatlar ve n-bütil akrilat bazlı polimer ağlarından oluşan sistem, mükemmel şekil hafızası özelliği göstermiştir. Önemli yapısal parametreler olan oligo(«-kaprolakton) dimetakrilatın moleküler ağırlığı ve n-bütil akrilatın komonomer içeriği, ağların makroskopik özelliklerini güçlü bir şekilde etkilemiştir. Şekil hafızalı polimer ağlarının çok yönlülüğü ve potansiyel olarak bileşenlerin biyouyumluluğu farklı alanlarda, özellikle biyomedikal sektöründe sayısız yeni uygulamanın gerçekleştirilmesi için oldukça umut vericidir.



Şekil 9. Polimer ağlarının makroskopik şekil-hafıza etkisini gösteren bir dizi fotoğraf. Kalıcı şekil bir çubuktur, geçici şekil bir spiraldir. Fotoğraflar, 70 °C'de geçiciden kalıcı şekle geçişi göstermektedir [91]. Figure 9. A series of photographs showing the macroscopic shape-memory effect of polymer networks. The permanent shape is a stick, the temporary shape is a spiral. Photos show transition from temporary to permanent form at 70 °C [91].

5. KENDİ KENDİNİ ONARAN/İYİLEŞTİREN POLİMERLER (SELF-HEALING POLYMERS)

Doğal malzemelerde olduğu gibi, insan yapımı malzemelerde de hasarın oluşması kaçınılmaz bir gerçekliktir. Bir sistemin maruz kaldığı hasarın miktarı zamana (yaşlanma gibi yorgunluk hasarı) ve tek seferlik olumsuz durumlara (darbe veya çizilme gibi ani olay hasarı) bağlıdır [92-93]. Bu nedenle hasar, malzemenin orijinal işlevselliğinin zarar görmesine neden olan, moleküler veya makro ölçekte meydana gelebilen istenmeyen değişiklikler olarak tanımlanabilir. Kendi kendini onaran/iyileştiren malzemeler, herhangi bir hasar durumunda özerk veya uyarılmış onarım kavramını uygulayarak yapıların veya sistemlerin ömrünü uzatmayı amaçlar. Bu nedenle, kendi kendini onaran/iyileştiren malzemeler, herhangi bir hasar durumunda kendi kendini otomatik olarak onarma/iyileştirme özelliğine sahip uzun ömürlü mühendislik malzemeleri olarak tanımlanabilir. Kendi kendini onaran/iyileştiren malzemeler, biyolojik sistemlerdeki kendi kendini onarma özelliğinden yola çıkan ve doğadan ilham alan araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [86]. Dry [94] 1996 yılında yayımladığı bir çalışmada, bir beton matrise sıvı yapıştırıcı içeren içi boş cam elyafları dahil etmiş ve böylece hasarı iyileştireme özelliği elde etmiştir. Öncü niteliğinde olan bu çalışmadan sonra hasarı önlemekten ziyade iyileştirebilen polimer kompozitler tasarlama konusuna olan ilgi her geçen gün daha da artmıştır.

Kendi kendini onaran/iyileştiren polimerlerin bir kısmı malzeme özelliklerini tamamen özerk olarak geri kazanabilirken, bir kısmı geri kazanım sürecini başlatmak için ısı, UV ışığı [95] elektrik ve nem aktivasyonu [92] gibi harici bir uyarana ihtiyaç duymaktadır. Malzeme özelliklerini özerk olarak geri kazanabilen kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler içsel ve dışsal olarak kendi kendini iyileştirebilme özelliklerine göre iki kategoride sınıflandırılmaktadır [95-97].

Dışsal olarak kendi kendini iyileştirebilen polimerlerde, iyileştirici ajan (monomer, oligomer, çözücü vb.) izole edilmiş ayrı bir faz (kap, kapsül, lif, damar ağı, nano taşıyıcı vb.) içerisinde sisteme dahil edilmektedir. Malzemenin hasarı iyileştirme yeteneği iyileştirici ajan varlığıyla gerçekleşmektedir [95, 98-99]. Benzer bir mekanizmanın verildiği Şekil 8'den görülebileceği gibi; kompozit matris içerisine, mikrokapsüllü bir iyileştirici ajan ve iyileştirici ajanı polimerize edebilen bir katalizör gömülmüştür. Sistemin temel çalışma mekanizması; hasara bağlı olarak matriste çatlaklar meydana gelir (Şekil 10a), çatlak mikrokapsülleri yırtarak kılcal etki yoluyla iyileştirici maddeyi çatlak düzlemine bırakır (Şekil 10b) ve iyileştirici ajan katalizörle temas ederek reaksiyona girer, çatlak bölgesini kapatan polimerizasyon gerçekleşir (Şekil 10c). Bu dışsal konseptte, ana avantaj, hasar meydana geldiğinde kapsüllerin yırtılması ve içerdiği iyileştirici ajanın serbest bırakılması sonucu lokalize bir tepki sunmasıdır.



Şekil 10. Kapsüllenmiş iyileştirici ajanın çatlağı onarma mekanizması Figure 10. Crack repair mechanism of encapsulated healing agent

Dışsal kendi kendini iyileştirebilen polimerlerde, gömülü sıvı iyileştirme ajanlarına dayanan farklı yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımların üç ana örneği Şekil 11'de verilmiştir [100]. İyileştirici ajanın kapsüllendiği ve katalizörün matris içinde dağıldığı iki ajanlı bir sistem Şekil 11a'da verilmektedir. Hasar meydana geldiğinde, kapsül kırılır ve iyileştirici ajan katalizör ile temas eder sonrasında iyileştirici ajan sertleşir ve çatlağın iki tarafını bir arada tutan bir yapıştırıcı görevi görür. Aynı konsept, bir kapsül tipinin iyileştirici ajanı ve ikinci kapsül tipinin sertleştiriciyi içerdiği ikili kapsülleme sistemleri için de kullanılabilir. Şekil 11b'de hasar durumunda reaksiyonun nem ile gerçekleştiği ve alttaki metalin bariyer koruyucu bir yüzey tabakası oluşturduğu ortamla reaksiyona giren tek ajanlı bir sistem örneği verilmiştir. Şekil 11c'de ise termoplastik bir matris içine kapsüllenmiş bir çözücü eklenmiştir. Hasar sonucu çözücü kapsül dışına çıkmakta ve matris ile reaksiyona girmektedir. Sistem hasarı kapatmak için yeterli hareketliliğe izin veren bir yapıdadır.



Şekil 11. Kapsülleme yolunu kullanan mevcut kavramlar. a) İki bileşenli iyileştirici ajan. b) Tek bileşenli iyileştirici ajan. c) Termoplastik polimerde kapsüllenmiş çözücü [100]

Figure 11. Existing concepts using the encapsulation route. a) Two component healing agent. b) One component healing agent. c) Solvent encapsulated in thermoplastic polymer) [100]

White ve ark. [101] bir epoksi matrisine birinci nesil Grubbs' katalizör parçacıkları ve içinde sıvı iyileştirici ajanlar (sıvı endo-dicyclopentadiene (endo-DCPD)) bulunduran mikrokapsüller yerleştirmiştir. Şekil 12'de gösterildiği gibi; çalışmada hasar giderme adımları, (*i*) herhangi bir hasar anında

mikrokapsüllerin kırılmasıyla sıvı iyileştirici ajanların çatlağa salınması, (*ii*) sıvı iyileştirici ajanların matriste dağılmış olan Grubbs katalizörüyle temas etmesi ve (*iii*) böylece polimerizasyona uğrayarak çatlak yüzeyine yapışan çapraz bağlı bir ağ oluşturarak çatlağı iyileştirmesi şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 12. Sıvı iyileştirici ajan(sıvı endo-dicyclopentadiene (endo-DCPD) ve birinci nesil Grubbs'
katalizörün reaksiyonu sonucunda çapraz bağlı polimer ağ oluşumu [101]Figure 12. Cross-linked polymer network formation as a result of the reaction of liquid curing agent (liquid endo-dicyclopentadiene (endo-
DCPD) and first generation Grubbs' catalyst [101]

İçsel kendi kendini iyileştirebilen polimerlerde ise; hasarı giderme işlemi, malzemenin kendi kimyasal yapısı sayesinde gerçekleşmektedir. İçsel kendi kendini iyileştirebilen polimerler, malzemenin hasarlı alanda yeniden akmasına yol açan geçici bir hareketlilik artışı yoluyla hasarı onarabilen malzemelerdir. Bu tür davranış, polimerlerin belirli moleküler yapılara sahip olmasına ve ısı, UV ışığı [95] elektrik ve nem aktivasyonu [92] gibi belirli uyaranlar altında hasar iyileşmesini sağlayan performansına dayanır. Bu durumda, polimerin geçici olarak lokal hareketliliğine izin veren enerji girişiyle açılan mevcut tersinir bağlar iyileşme sürecini gerçekleştirir. Sonuç olarak, polimer, hasarı iyileştirme olarak bilinen bu süreçte bir hasar bölgesindeki ayna düzlemlerini köprüleme yeteneğine sahiptir. Sonrasında ise kimyasal veya fiziksel bağ kuvvetinin restorasyonu (hasar iyileşmesi) süreci takip eder (Şekil 13). Kendi kendini onaran polimerler, "ikinci nesil" kendi kendini onaran bir malzeme olarak görülebilir. Ancak bu malzemeler hasarlı bir malzemeyi neredeyse ilk haline (hasar görmemiş durumuna) geri yükleme yeteneğine sahiptir [100].



Şekil 13. Dış uyaranlarla içsel kendi kendini onaran bir polimer matrisin şematik gösterimi; a) polimer matris, b) hasarlı polimer matris, c) kendini onaran polimer matris

Figure 13. Schematic representation of an intrinsic self-healing polymer matrix with external stimuli; a) polymer matrix, b) damaged polymer matrix, c) self-healing polymer matrix

Kendi kendini iyileştiren polimer kompozitlerin üretiminde dolgu malzemesi olarak, kullanıldığı ürünlerde boyutsal kararlılığı arttırması, ürünün mekanik özelliklerini (özellikle darbe mukavemeti) geliştirmesi, ısı ve ses yalıtımı sağlaması, matris malzemesi kullanımını azaltarak ürün maliyetlerini azaltması gibi öne çıkan çok yönlü özellikleri nedeniyle son yıllarda mikroküreler ön plana çıkmaktadır [102]. Cam veya plastikten içi boş şekilde üretilen mikrokürelere, uygulanan işlemlerle farklı özelliklerin kazandırılması mümkündür [103]. Mikroküreler kullanılarak üretilen polimer kompozitler, askeri uygulamalar başta olmak üzere, biyoteknoloji, tibbi cihazlar, elektrik-elektronik sanayi, yalıtım sektörü, havacılık ve yüksek hızlı trenler gibi çok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır [104]. Mikroküreler içinde kapsüllenmiş gömülü Grubbs rutenyum katalizörü ve disiklopentadien'den (DCPD) oluşan bir yerinde sistemle kendi kendini iyileştirebilen polyester matrisli bir termoset kompozit üreten Jung [104] hacim oranı arttıkça elastisite modülünün azaldığını ve kırılma tokluğunun maksimuma ulaştığını rapor etmiştir. Şekil 14'te verilen kendi kendini iyileştirme mekanizmasında görüldüğü gibi, mikroküreler bir çatlakla karşılaştıklarında kırılarak açılmakta ve içeriklerini çatlağa salarak matrise gömülü bir katalizör polimerizasyonu başlatmaktadır. DCPD'den çatlak dolgu maddesinin polimerizasyonu iki aşamalı olarak gerçekleşmektedir. DCPD monomeri Grubbs katalizörü ile temas ettiğinde, 1,3-Siklopentadien dimmerinin birinci halkası, dallı poli-disiklopentadien oluşturan halka açılması metatez polimerizasyonu ile çapraz bağlanır. Reaksiyon boyunca, "yaşayan" Grubbs katalizörü aktif olarak kalır.



Şekil 14. Kendi kendini iyileştirme mekanizması: (a) matriste mikroküre, (b) çatlak yayılımı (soldan sağa), (c) iyileştirici içeriğin serbest bırakılması [102-103]

Figure 14. The self-healing mechanism: (a) sphere in matrix,(b) crack propagation (from lefte to right), (c) content release [102-103]

6. İLETKEN POLİMERLER (CONDUCTIVE POLYMERS)

Polimerlerin ısı iletimi metallere oranla oldukça düşüktür. Ancak termal iletkenlik istenen uygulamalarda, iletken dolgu maddeleri kullanılarak termal iletkenlik özellikleri geliştirilmiş yeni malzemeler üretilebilmektedir [105]. Polimerlerde kullanılabilecek iletken dolgu maddeleri arasında grafit, karbon fiberler (CF), karbon nanotüpler (CNT), grafen, altıgen boron nitrür (hBN), metal ve seramik tozları vb. bulunmaktadır [106]. Özellikle karbonlu dolgu maddeleri hem termal hem de elektriksel olarak iletken olduğundan, polimer nanokompozitler, şekil hafızalı polimerler [107], sensörler ve aktüatörler [108] gibi uygulamalar için fonksiyonel malzemeler olarak da tercih edilmektedir. Polimerik kompozitlerin sahip olduğu termal özellikler, başta elektrik-elektronik sanayi olmak üzere bazı uygulamalarda cihazların performansını ve güvenilirliğine etki etmektedir.

Isi iletkenliği elde etmek için, önce dolgu partikülleri ve polimer partikülleri birlikte karıştırılmalı ve sonrasında polimer partiküllerinin ısı ileten dolgu partikülleri ile çevrelendiği özel bir dolgu dispersiyon durumu elde etmek için karışımı preslenerek kalıplanmalıdır. Bu sayede, polimer matrisi içerisine gömülmüş bu dolgu maddeleri, polimer içerisinde ısı ileten yollar oluşturabilmektedir. Yu ve ark. [109] benzer bir yöntemle bakır (Cu) dolgulu termoplastik polistiren (PS) hazırlamışlardır. PS ve Cu önce oda sıcaklığında iyice karıştırılmış ve ardından sıcak preslenerek kalıplanmıştır. PS matrisindeki benzersiz üç boyutlu Cu kabuk ağların izotropik bir yapı sergilediği görülmüştür (Şekil 15). Yapılan bu çalışma, sıcak

preslemenin izotropik termal ve elektriksel iletken kompozitler için basit ve yüksek verimli bir kompozit hazırlama yöntemi olduğunu göstermiştir.

Şekil 15. Cu kaplı PS kompozitinin (a) düşük ve (b) yüksek büyütmeli optik mikroskop görüntüleri [109] *Figure 15.* (a) Low and (b) high magnification optical microscope images of Cu-plated PS composite [109]

Polimerler, elektriksel iletkenlik açısından genel olarak yalıtkandırlar ve yıllar boyunca elektrik yalıtımında kullanılmışlardır. Polimerlerin elektriksel olarak yalıtkan olduğu kanısı, birbirini izleyen tek ve çift bağlardan oluşan konjuge karbon zincirine sahip polimerlerin keşfine kadar devam etmiştir. Konjuge polimerler olarak bilinen bu iletken polimerler, elektriksel iletkenlikleri ve metallerle karsılaştırılabilir özellikleri ile karakterize edilmektedir. Polimerlerin iletkenliği, katkılı yük taşıyıcıların serbest hareketliliğini sağlayan atomlar arasındaki konjuge çift bağlara dayanır. Elektriksel iletkenlik, serbestçe hareket eden yük taşıyıcıları gerektirir. Bu nedenle, elektriksel olarak iletken polimerler, yük taşıyıcıları olarak hizmet eden boşluklar ile konjuge çift bağlar şeklinde geniş bir π -elektron sistemine sahiptir. Aromatik veya heteroaromatik halkalı polimerler ve üçlü bağlara sahip polimerler polikonjuge bağ sistemleri grubuna aittir [21, 24]. İletken polimerler sınıfında, poliasetilen (PAc), polipirol (PPy), politiyofen (PT), poli(3,4-etilendioksitiyofen) (PEDOT), polianilin (PAni), poliselenofen (PSe), polifuran (PFu), poli(para-fenilen) (PPP) ve poli(p-fenilen vinilen) (PPV) gibi polimerler yer almaktadır [2,4]. Bunların arasında poli-3,4-etilendioksitiyofen (PEDOT), polipirol (PPy) ve polianilin (PANI), mükemmel elektriksel ve optik özellikler sunan iyi bilinen iletken polimerlerdir [110]. Şekil 15, diğer katı malzemelere kıyasla polimerlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini göstermektedir [111]. Polimerler kimyasal yapıları ve iletken dolgu (demir, bakır gibi metal tozları, karbon siyahı, grafen, grafen oksit vb.) durumlarına bağlı olarak yalıtkan, yarı iletken veya iletken olarak hareket edebilir. İletken polimerler otomotiv motorlarında, tekstilde, medikal uygulamalarda, robotik sistemlerde, Sensör ve biyosensörlerde, transistörlerde vb. alanlarda yaygın bir kullanıma sahiptir [22-23].



Şekil 15. Bazı malzemelerin iletkenlik ölçeği *Figure 15.* The conductivity scale of some materials

Feiner ve ark. [112] biyomoleküllerin kontrollü salınımı için kullanılmak üzere elektronik çip üretmişlerdir. Elektronik çip araştırmacılar tarafından; (*i*)doku elektriksel aktivitesinin algılanması, (*ii*)hücre ve doku elektriksel stimülasyonu ve (*iii*)doku mikro-çevresinde biyomoleküllerin kontrollü salınımı amacıyla elektrotlar içerecek şekilde tasarlanmıştır. Çip, kardiyak doku büyümesi ve doku montajı için destekleyici bir 3D mikro-ortam sağlamak üzere elektrospun nanofiber bir iskele ile entegre

edilmiştir. Dahili elektronik cihaz (çip), doku fonksiyonunun çevrimiçi olarak izlenmesini sağlar ve gerekirse dokuları etkinleştirmek için müdahale edebilir. Elektroaktif polimerlerin belirlenmiş elektrotlar üzerine dahil edilmesi, doku büyümesini veya konakçı ile entegrasyonu teşvik edebilen proteinlerin ve küçük moleküllerin salınımı üzerinde kontrol sağlar (Şekil 16).



Şekil 16. Mikroelektronik kardiyak yama konseptinin şemaları [112] Figure 16. Schematics of the microelectronic cardiac patch concept [112]

Silvia ve ark. [113] algılamayı ve aktif/pasif aktivasyonu tek bir kompozit malzeme içinde aynı anda birleştirme potansiyeline sahip bir aktüatör üretmişlerdir. Yapının hareketi, Şekil 17'de gösterildiği gibi, bir elektrik akımı uygulanarak veya ortam nemindeki değişikliklerle kontrol edilebilir. Poli(3,4etilendioksitiyofen):polistiren sülfonat (PEDOT:PSS) katmanının higroskopik özellikleri, ortam nemindeki bir değişikliğe (bağıl nem %1.25 - %10 arası) bağlı olarak elektrik direncinde varyasyonlara neden olabilir ve bu durum tersine çevrilebilen algılama yetenekleri sağlar. PEDOT:PSS'nin piezodirençli davranışı, bu malzemenin, içsel algılama ve çalıştırma yeteneklerine sahip aktif biyo-ilhamlı elemanlar olarak gerinim ve dokunma sensörlerinde hassas bir katman olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Ortam nemini emme/desorpsiyona dayalı olarak aktüatörlerin arkasındaki çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 17a'da gösterilmiştir. Şekle göre; aktüatörün çevresiyle dengede olduğu orijinal konumdayken (merkezi), bir elektrik akımı uygulanır ve PEDOT:PSS katmanına (sağda) doğru bir bükülme hareketine neden olan Joule-ısıtma kaynaklı su desorpsiyonuna bağlı olarak PEDOT:PSS katmanı büzülür. Sonrasında, tersine proseste çevresel nem içeriği arttıkça aktüatör, yeni bir denge kurulana kadar suyun emilmesi nedeniyle orijinal konumundan PDMS katmanına doğru eğilir. Şekil 17b' de elektrikle çalışan çiçek biçimli bir aktüatörün çalıştırma hareketi ve karşılık gelen termal görüntüler verilmiştir. Şekil 17c'den de görülebileceği gibi; elektrotlar arasına bir voltaj uygulandığında, desen her bir taç yaprağı (petal) boyunca akımın akışını yönlendirir ve yapının katlanmasını sağlar.





Takamatsu ve ark. [114] kalın örme tekstiller üzerinde iletken polimerlerin modellenmesine izin veren bir çalışma yapmıştır. Araştırmacılar; bu sayede sağlık hizmetlerini izlemede kullanılabilecek giyilebilir ve insan vücudu ile uyumlu basit ve güvenilir elektronik cihazların üretilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu işlem, ticari olarak temin edilebilen yüksek iletkenliğe sahip polimer PEDOT:PSS ve daha iyi cilt temasını destekleyen bir iyonik sıvı jel kullanarak, kutanöz elektrotların (cutaneous electrodes) imalatına uygulanmıştır. Üretilen malzemenin performansı insan kalbinin elektrofizyolojik kayıtlarında değerlendirilmiştir. Ölçümler, tekstil elektrotların cilt ile düşük empedanslı bir temas oluşturduğunu ve hareket sırasında bile elektrofizyolojik sinyali yüksek doğrulukla yakalayabildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, tekstiller üzerinde çeşitli biyomedikal cihazların basit bir şekilde üretilmesinin önünü açmaktadır. Çalışmanın üretim aşamaları Şekil 18'de verilmiştir. PDMS, ilk olarak istenen modelin ana hatlarını tanımlayan bir poliimid master üzerinde biriktirilir. Tekstil daha sonra poliimid film üzerine yerleştirilir ve PDMS kademeli olarak tekstil kütlesine aktarılır. Kısa bir termal tavlamadan sonra, PEDOT:PSS solüsyonu tekstilin korumasız bölgesi üzerine fırça ile kaplanır ve kurutulur.



Şekil 18. Japon kimono boyama yönteminden esinlenerek tekstiller üzerinde PEDOT:PSS'nin modellenmesi için süreç akışı [114] Figure 18. Process flow for modeling PEDOT:PSS on textiles inspired by the Japanese kimono dyeing method) [114]

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Polimer malzemeler, geçmişte çoğunlukla statik yapısal parçalar olarak kullanılıyordu. Günümüzde malzeme teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, dış koşullara tepki olarak özel işlevler sergileyebilen gelişmiş akıllı malzemeler şeklinde de farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Akıllı polimerler şeklinde isimlendirilen bu tür malzemeler çevresel uyaranlara (ısı, ışık, sıcaklık, pH, mekanik, manyetik ve elektriksel uyaranlar vb.) karşı tepki verme yeteneğine sahip malzemelerdir. Bu çalışmada; akıllı polimerler, (*i*)akıllı polimerik jeller, (*ii*)şekil hafızalı polimerler, (*iii*)kendi kendini onaran/iyileştiren polimerler ve (*iv*)iletken polimerler şeklinde dört başlıkta sınıflandırılarak incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Akıllı hidrojeller, çevresel koşullarda küçük dış uyaranlara maruz kalınca, yanıt olarak ani tersinir faz geçişleri sergileyen üç boyutlu ağ yapı özelliğine sahip hidrojellerdir. Akıllı hidrojeller, biyouyumlulukları, fonksiyonel ve esnek yapıları gibi özelliklerinden dolayı, doku mühendisliği protezlerinde, sensör/biyosensörlerde, ilaç/gen dağıtım sistemlerinde, aktüatörlerde büyük bir potansiyel kullanıma sahiptir.
- 2. Şekil hafızalı akıllı polimerler, ışık, ısı, nem, mekanik stres, manyetik alan, elektrik alan vb. gibi bir dış uyarıcı uygulandığında şekil ve renk gibi makroskobik özelliklerini değiştirebilen ve uyarıcı etkisi ortadan kaldırıldığında geçici şeklinden kalıcı şekline geri dönebilen (kalıcı şeklini geri kazanma yeteneğine sahip) polimerler şeklinde tanımlanabilir. Şekil hafızalı akıllı polimerler, sahip olduğu bu özellik nedeniyle, tıbbi uygulamalarda, havacılıkta, tekstilde ve ev ürünlerinde önemli bir kullanım alanına sahiptir.
- 3. Kendi kendini onaran/iyileştiren malzemeler, herhangi bir hasar durumunda kendi kendini otomatik olarak onarma/iyileştirme özelliğine sahip uzun ömürlü mühendislik malzemeleridir. Bu tür malzemeler, hasar oluşumunu algılayan ve hasarın ilerlemesini durdurarak tamir edebilen yapıdadırlar. Bu nedenle hasarın önlenmesinin ve ürünün kullanım ömrünün uzamasının istendiği ilaç dağıtım sistemlerinde, doku-materyal bariyerlerinde, onarıcı tıpta, yara pansuman uygulamalarında ve enerji alanında tercih edilmektedir.

4. İletken polimerler, elektriksel iletkenliğe ve metallerle karşılaştırılabilir özelliklere sahip konjuge karbon zinciri içeren polimerlerdir. Elektriksel iletkenlik, yük taşıyıcı görevi gören boşluklara ve birbirini izleyen tek ve çift bağlardan oluşan konjuge karbon zincirlerine dayanır. İletken polimerler esneklik, biyouyumluluk, üretim ve uygulama kolaylığı gibi avantajları nedeniyle tekstilde, medikal uygulamalarda, robotik sistemlerde, sensör ve biyosensörlerde, transistörlerde vb. alanlarda yaygın bir kullanıma sahiptir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar, Yayın Etiği Komitesi'nin (COPE) belirlediği etik ilkelere uygun olarak tüm etik ilkelere uygun davrandıklarını beyan ederler.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Çalışmada D.M. ve İ.K. yayının hazırlanmasında, literatür araştırmasında ve makalenin yazımında ortak oranda katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Yazarlar çalışmaya verdikleri destek nedeniyle Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederler (Proje No:2021/AP/0012)

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Çalışmada kullanılan tüm verilere, makalenin yazarlarından D.M. üzerinden ulaşılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. R. Aguilar, J. S. Román, J. Eds., *Smart polymers and their applications* (Second edition). Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2019.
- [2] Z. Tüylek, (2019). "Sağlık alanında kullanılan akıllı polimerler," İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi, vol. 7, no. 1, pp. 81-95, 2019.
- [3] S. Bahl, H. Nagar, I. Singh, S. Sehgal, "Smart materials types, properties and applications: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1302-1306, 2020.
- [4] M.R. Aguilar, C. Elvira, A., Gallardo, B. Vázquez, J. S. Román, "Smart Polymers and Their Applications as Biomaterials," *Smart Polymers*, vol. 3, p. 27, 2007.
- [5] H. Meng, G. Li, "A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites," *Polymer*, vol. 54, no. 9, pp. 2199-2221, 2013.
- [6] J. Zhuang, M. R. Gordon, J. Ventura, L. Li, S. Thayumanavan, "Multi-stimuli responsive macromolecules and their assemblies," *Chemical Society Reviews*, vol. 42, no. 17, 7421, 2013.
- [7] K. Peng, I. Tomatsu, A. Kros, "Hydrogel-based drug carriers for controlled release of hydrophobic drugs and proteins," *Journal of Controlled Release*, vol. 152, pp. e72-e74, 2011.
- [8] T. Pretsch, "Review on the Functional Determinants and Durability of Shape Memory Polymers," *Polymers*, vol. 2, no. 3, pp. 120-158, 2010.
- [9] M. Guardia, F. A., Esteve-Turrillas. Eds., *Handbook of smart materials in analytical chemistry*, Volume I. Wiley, 2019.
- [10] İ. Karagöz, Ö. Tuna, "Effect of melt temperature on product properties of injection-molded highdensity polyethylene," *Polymer Bulletin*, vol. 78, pp. 6073–6091, 2021.

- [11] Q. Xu, Y. Liu, S. Su, W. Li, C. Chen, Y. Wu, "Anti-tumor activity of paclitaxel through dualtargeting carrier of cyclic RGD and transferrin conjugated hyperbranched copolymer nanoparticles," *Biomaterials*, vol. 33, no. 5, pp. 1627-1639, 2012.
- [12] D.T. Simon, E. O. Gabrielsson, K. Tybrandt, M. Berggren, "Organic Bioelectronics: Bridging the Signaling Gap between Biology and Technology," *Chemical Reviews*, vol. 116, no. 21, pp. 13009-13041, 2016.
- [13] K. Peng, I. Tomatsu, A. Kros, "Hydrogel-based drug carriers for controlled release of hydrophobic drugs and proteins," *Journal of Controlled Release*, vol. 152, pp. e72-e74, 2011.
- M. Burnworth, L. Tang, J. R. Kumpfer, A.J. Duncan, F. L. Beyer, G. L. Fiore, S. J. Rowan, C. Weder,
 "Optically healable supramolecular polymers," *Nature*, vol. 472, no. 7343, pp. 334-337, 2011.
- [15] M. Nakahata, Y. Takashima, H. Yamaguchi, A. Harada, "Redox-responsive self-healing materials formed from host–guest polymers," *Nature Communications*, vol. 2, no. 1, p. 511, 2011.
- [16] M.W. Urban, D. Davydovich, Y. Yang, T. Demir, Y. Zhang, L. Casabianca, "Key-and-lock commodity self-healing copolymers," *Science*, vol. 362, no. 6411, pp. 220-225, 2018.
- [17] P. A. O'Connell, G. B. McKenna, "Rheological Measurements of the Thermoviscoelastic Response of Ultrathin Polymer Films," *Science*, vol. 307, no. 5716, pp. 1760-1763, 2005.
- [18] A. A. Tsyganenko, K. S. Smirnov, "Vibrational spectroscopy of molecules and macromolecules on surfaces," *Vibrational Spectroscopy*, vol. 9, no. 3, pp. 308-309, 1995.
- [19] S. Kamila. "Introduction, classification and applications of smart materials: an overview," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 10, no. 8, pp. 876-880, 2013.
- [20] B. Aïssa, D. Therriault, E. Haddad, W. Jamroz, "Self-Healing Materials Systems: Overview of Major Approaches and Recent Developed Technologies," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, pp. 1-17, 2012.
- [21] K, Namsheer., C. S. Rout, "Conducting polymers: A comprehensive review on recent advances in synthesis, properties and applications," *RSC Advances*, vol. 11, no. 10, pp. 5659-5697, 2021.
- [22] Y. Li, D. Lu, C. P. Wong, "Intrinsically Conducting Polymers (ICPs)," in *Electrical Conductive Adhesives with Nanotechnologies*, Y. Li, D. Lu, C. P. Wong, Eds. Boston, MA: Springer, 2010. pp-361-424.
- [23] M. Kök, İ. N. Qader, F. Dağdelen, Y. Aydoğdu, "Akıllı Malzemeler üzerine derleme: Araştırmalar ve uygulamaları," *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi,* vol. 6, no. 3, pp. 755-788, 2019.
- [24] Y. Li, D. Lu, C. P. Wong, Eds., Intrinsically Conducting Polymers (ICPs). Boston, MA: Springer, 2010.
- [25] A. Ryan, "Azoreductases in drug metabolism: Azoreductases in drug metabolism," *British Journal of Pharmacology*, vol. 174, no. 14, pp. 2161-2173, 2017.
- [26] O. Soga, C. F. van Nostrum, W. E. Hennink, "Poly(N -(2-hydroxypropyl) Methacrylamide Mono/Di Lactate): A New Class of Biodegradable Polymers with Tuneable Thermosensitivity," *Biomacromolecules*, vol. 5, no.3, pp. 818-821, 2004.
- [27] E. M. Ahmed, "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review," *Journal of Advanced Research*, vol. 6, no. 2, pp. 105-121, 2015.
- [28] A. Kumar, A. Srivastava, I. Y. Galaev, B. Mattiasson, "Smart polymers: Physical forms and bioengineering applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 32, no. 10, pp. 1205-1237, 2007.
- [29] Q. Zhao, H. J. Qi, T. Xie, "Recent progress in shape memory polymer: New behavior, enabling materials, and mechanistic understanding," *Progress in Polymer Science*, vol. 49-50, pp. 79-120, 2015.
- [30] J. L. Drury, D. J. Mooney, "Hydrogels for tissue engineering: Scaffold design variables and applications," *Biomaterials*, vol. 24, no. 24, pp. 4337-4351, 2003.
- [31] B. G. Chung, K. H. Lee, A. Khademhosseini, S. H. Lee, "Microfluidic fabrication of microengineered hydrogels and their application in tissue engineering," *Lab Chip*, vol. 12, no. 1, pp. 45-59, 2012.
- [32] Y. Qiu, K. Park, "Environment-sensitive hydrogels for drug delivery," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 53, no. 3, pp. 321-339, 2001.
- [33] M. Nakayama, T. Okano, T. Miyazaki, F. Kohori, K. Sakai, M. Yokoyama, "Molecular design of biodegradable polymeric micelles for temperature-responsive drug release," *Journal of Controlled*

Release, vol. 115, no. 1, pp. 46-56, 2006.

- [34] H. L. Lim, Y. Hwang, M. Kar, S. Varghese, "Smart hydrogels as functional biomimetic systems," *Biomater. Sci.*, vol. 2, no. 5, pp. 603-618, 2014.
- [35] X. Zhang, D. Wu, C. C. Chu, "Synthesis and characterization of partially biodegradable, temperature and pH sensitive Dex–MA/PNIPAAm hydrogels," *Biomaterials*, vol. 25, no. 19, pp. 4719-4730, 2004.
- [36] P. Gupta, K. Vermani, S. Garg, "Hydrogels: From controlled release to pH-responsive drug delivery," *Drug Discovery Today*, vol. 7, no. 10, pp. 569-579, 2002.
- [37] S. Krause, F. Zander, G. Bergmann, H. Brandt, H. Wertmer, H. Finkelmann, "Nematic main-chain elastomers: Coupling and orientational behavior," *Comptes Rendus Chimie*, vol. 12, no. 1-2, pp. 85-104, 2009.
- [38] J. Scheinpflug, M. Pfeiffenberger, A. Damerau, F. Schwarz, M. Textor, A. Lang, F. Schulze, "Journey into Bone Models: A Review," *Genes*, vol. 9, no. 5, p. 247, 2018.
- [39] M. Gümüşderelioğlu, "Yumuşak ve Akıllı Polimerler," *Bilim ve Teknik Dergisi*, pp. 44-49, 2010.
- [40] M. Heskins, J. E. Guillet, "Solution Properties of Poly(N-isopropylacrylamide)," Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry, vol. 2, no. 8, pp. 1441-1455, 1968.
- [41] D.A. Davis, A. Hamilton, J. Yang, L. D. Cremar, D. Van Gough, S. L. Potisek, M. T. Ong, P.V. Braun, T. J. Martínez, S. R. White, J. S. Moore, N. R. Sottos, "Force-induced activation of covalent bonds in mechanoresponsive polymeric materials," *Nature*, vol. 459, no. 7243, pp. 68-72, 2009.
- [42] M. Irie, "Properties and applications of photoresponsive polymers," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 62, no. 8, pp. 1495-1502, 1990.
- [43] S. Dai, P. Ravi, K. C. Tam, "pH-Responsive polymers: Synthesis, properties and applications," *Soft Matter*, vol. 4, no. 3, p. 435, 2008.
- [44] L. Jingcheng, V. S. Reddy, W. A. D. M. Jayathilaka, A. Chinnappan, S. Ramakrishna, R. Ghosh, "Intelligent Polymers, Fibers and Applications," *Polymers*, vol. 13, no. 9, p. 1427, 2021.
- [45] M. Wei, Y. Gao, X. Li, M. J. Serpe, "Stimuli-responsive polymers and their applications," *Polymer Chemistry*, vol. 8, no. 1, pp. 127-143, 2017.
- [46] A. K. Bajpai, S. K. Shukla, S. Bhanu, S. Kankane, "Responsive polymers in controlled drug delivery," *Progress in Polymer Science*, vol. 33, no. 11, pp. 1088-1118, 2008.
- [47] D. Parasuraman, M. J. Serpe, "Poly(N -Isopropylacrylamide) Microgels for Organic Dye Removal from Water," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 3, no. 7, pp. 2732-2737, 2011.
- [48] M. Ma, L. Guo, D. G. Anderson, R. Langer, "Bio-Inspired Polymer Composite Actuator and Generator Driven by Water Gradients," *Science*, vol. 339, no. 6116, pp. 186-189, 2013.
- [49] L. A. Connal, Q. Li, J. F. Quinn, E. Tjipto, F. Caruso, G. G. Qiao, "pH-Responsive Poly(acrylic acid) Core Cross-Linked Star Polymers: Morphology Transitions in Solution and Multilayer Thin Films," *Macromolecules*, vol. 41, no. 7, pp. 2620-2626, 2008.
- 50] J. Kim, M. J. Serpe, L. A. Lyon, "Hydrogel Microparticles as Dynamically Tunable Microlenses," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 126, no. 31, pp. 9512-9513, 2004.
- [51] F. Liu,M. W. Urban, "Dual Temperature and pH Responsiveness of Poly(2-(N , N dimethylamino)ethyl methacrylate- co-N -butyl acrylate) Colloidal Dispersions and Their Films," *Macromolecules*, vol. 41, no. 17, pp. 6531-6539, 2008.
- [52] Q. Zhang, L. Lei, S. Zhu, Gas-Responsive Polymers," *ACS Macro Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 515-522, 2017.
- [53] J. F. Gohy, Y. Zhao, "Photo-responsive block copolymer micelles: Design and behavior," *Chemical Society Reviews*, vol. 42, no. 17, p. 7117, 2013.
- [54] F. D. Jochum, P. Theato, "Temperature- and light-responsive smart polymer materials," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, no.17, pp. 7468-7483, 2013.
- [55] P. D. Thornton, R. J. Mart, R. V. Ulijn, "Enzyme-Responsive Polymer Hydrogel Particles for Controlled Release," *Advanced Materials*, vol. 19, no. 9, pp. 1252-1256, 2007.
- [56] R. V. Ulijn, "Enzyme-responsive materials: A new class of smart biomaterials," Journal of Materials

Chemistry, vol. 16, no. 23, p. 2217, 2006.

- [57] T. Miyata, N. Asami, T. Uragami, "A reversibly antigen-responsive hydrogel," *Nature*, vol. 399, no. 6738, pp. 766-769, 1999.
- [58] Y. Zhao, "Light-Responsive Block Copolymer Micelles," *Macromolecules*, vol. 45, no. 9, pp. 3647-3657, 2012.
- [59] G. Charlet, G. Delmas, "Thermodynamic properties of polyolefin solutions at high temperature:
 1. Lower critical solubility temperatures of polyethylene, polypropylene and ethylene-propylene copolymers in hydrocarbon solvents," *Polymer*, vol. 22, no. 9, pp. 1181-1189, 1981.
- [60] H. Feil, Y. H. Bae, J. Feijen, S. W. Kim, "Effect of comonomer hydrophilicity and ionization on the lower critical solution temperature of N-isopropylacrylamide copolymers," *Macromolecules*, vol. 26, no. 10, pp. 2496-2500, 1993.
- [61] H. G. Schild, "Poly(N-isopropylacrylamide): Experiment, theory and application," *Progress in Polymer Science*, vol. 17, no. 2, pp. 163-249, 1992.
- [62] P. Kujawa, F. M. Winnik, "Volumetric Studies of Aqueous Polymer Solutions Using Pressure Perturbation Calorimetry: A New Look at the Temperature-Induced Phase Transition of Poly(N isopropylacrylamide) in Water and D2O," *Macromolecules*, vol. 34, no. 12, pp. 4130-4135, 2001.
- [63] D. Crespy, R. M. Rossi, "Temperature-responsive polymers with LCST in the physiological range and their applications in textiles," *Polymer International*, vol. 56, no. 12, pp. 1461-1468, 2007.
- [64] R. Liu, M. Fraylich, B. R. Saunders, Thermoresponsive copolymers: From fundamental studies to applications," *Colloid and Polymer Science*, vol. 287, no. 6, pp. 627-643, 2009.
- [65] M. Cao, Y. Wang, X. Hu, H. Gong, R. Li, H. Cox, J. Zhang, T. A. Waigh, H. Xu, J. R. Lu, "Reversible Thermoresponsive Peptide–PNIPAM Hydrogels for Controlled Drug Delivery," *Biomacromolecules*, vol. 20, no. 9, pp. 3601-3610, 2019.
- [66] S. C. Song, S. B. Lee, J. I. Jin, Y. S. Sohn, "A New Class of Biodegradable Thermosensitive Polymers.
 I. Synthesis and Characterization of Poly(organophosphazenes) with Methoxy-Poly(ethylene glycol) and Amino Acid Esters as Side Groups," *Macromolecules*, vol. 32, no. 7, pp. 2188-2193, 1999.
- [67] R. S. Riaz, M. Elsherif, R. Moreddu, I. Rashid, M. U. Hassan, A. K. Yetisen, H. Butt, "Anthocyanin-Functionalized Contact Lens Sensors for Ocular pH Monitoring," ACS Omega, vol. 4, no. 26, pp. 21792-21798, 2019.
- [68] Y. Zhao, M. Lei, S. X. Liu, Q. Zhao, "Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 261, pp. 226-232, 2018.
- 69] N. Jiang, R. Ahmed, A. A. Rifat, J. Guo, Y. Yin, Y. Montelongo, H. Butt, A. K. Yetisen, "Functionalized Flexible Soft Polymer Optical Fibers for Laser Photomedicine," *Advanced Optical Materials*, vol. 6, no. 3, p. 1701118, 2018.
- [70] A. K. Yetisen, N. Jiang, A. Fallahi, Y. Montelongo, G. U. Ruiz-Esparza, A. Tamayol, Y. S. Zhang, I. Mahmood, S. Yang, K. S. Kim, H. Butt, A. Khademhosseini, S. Yun, "Glucose-Sensitive Hydrogel Optical Fibers Functionalized with Phenylboronic Acid," *Advanced Materials*, vol. 29, no. 15, p. 1606380, 2017.
- [71] B. Mirani, E. Pagan, B. Currie, M. A. Siddiqui, R. Hosseinzadeh, P. Mostofalu, Y. S. Zhang, A. Ghahary, M. Akbari, "An Advanced Multifunctional Hydrogel-Based Dressing for Wound Monitoring and Drug Delivery," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 6, no. 19, p. 1700718, 2017.
- [72] T. Ikeda, J. Mamiya, Y. Yu, "Photomechanics of Liquid-Crystalline Elastomers and Other Polymers," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 46, no. 4, pp. 506-528, 2007.
- [73] T. Chung, A. Romo-Uribe, P. T. Mather, "Two-Way Reversible Shape Memory in a Semicrystalline Network," *Macromolecules*, vol. 41, no. 1, pp. 184-192, 2008.
- [74] J. Zotzmann, M. Behl, D. Hofmann, A. Lendlein, "Reversible Triple-Shape Effect of Polymer Networks Containing Polypentadecalactone- and Poly(ε-caprolactone)-Segments," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 31, pp. 3424-3429, 2010.
- [75] F. Kleinschmidt, M. Hickl, K. Saalwächter, C. Schmidt, H. Finkelmann, "Lamellar Liquid Single Crystal Hydrogels: Synthesis and Investigation of Anisotropic Water Diffusion and Swelling,"

Macromolecules, vol. 38, no. 23, pp. 9772-9782, 2005.

- [76] S. A. Willis, G. R. Dennis, G. Zheng, W. S. Price, "Preparation and physical properties of a macroscopically aligned lyotropic hexagonal phase templated hydrogel," *Reactive and Functional Polymers*, vol. 73, no. 7, pp. 911-922, 2013.
- [77] H. Xing, J. Li, Y. Shi, J. Guo, J. Wei, "Thermally Driven Photonic Actuator Based on Silica Opal Photonic Crystal with Liquid Crystal Elastomer," ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 8, no. 14, pp. 9440-9445, 2016.
- [78] Z. Zhang, Z. Chen, Y. Wang, Y. Zhao, "Bioinspired conductive cellulose liquid-crystal hydrogels as multifunctional electrical skins," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 31, pp. 18310-18316, 2020.
- [79] G. H. Lee, S. H. Han, J. B. Kim, J. H. Kim, J. M. Lee, S. H. Kim, "Colloidal Photonic Inks for Mechanochromic Films and Patterns with Structural Colors of High Saturation," *Chemistry of Materials*, vol. 31, no. 19, pp. 8154-8162. 2019.
- [80] H. Yi, S. Lee, H. Ko, D. Lee, W. Bae, T. Kim, D. S. Hwang, H. E. Jeong, "Ultra-Adaptable and Wearable Photonic Skin Based on a Shape-Memory, Responsive Cellulose Derivative," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 34, p. 1902720, 2019.
- [81] A. Lendlein, S. Kelch, "Shape-Memory Polymers," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 41, no. 12, p. 2034, 2002.
- [82] X. Wu, W. Huang, Y. Zhao, Z. Ding, C. Tang, J. Zhang, "Mechanisms of the Shape Memory Effect in Polymeric Materials," *Polymers*, vol. 5, no. 4, pp. 1169-1202, 2013.
- [83] W. M. Huang, Y. Zhao, C. C. Wang, Z. Ding, H. Purnawali, C. Tang, J. L. Zhang, "Thermo/chemoresponsive shape memory effect in polymers: A sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization," *Journal of Polymer Research*, vol. 19, no. 9, p. 9952, 2012.
- [84] S. Miyazaki, Y. Q. Fu, W. M. Huang, Eds., *Thin Film Shape Memory Alloys: Fundamentals and Device Applications*. Cambridge University Press, 2009.
- [85] L. Sun, W. M. Huang, Z. Ding, Y. Zhao, C. C. Wang, H. Purnawali, C. Tang, "Stimulus-responsive shape memory materials: A review," *Materials & Design*, vol. 33, pp. 577-640, 2012.
- [86] L. Peponi, M. P. Arrieta, A. Mujica-Garcia, D. López, "Smart Polymers", in *Modification of Polymer Properties*, C. F. Jasso-Gastinel, J. M. Kenny, Eds. New York: William Andrew Publishing, 2017, pp-131-154.
- [87] M. Behl, M. Y. Razzaq, A. Lendlein, "Multifunctional Shape-Memory Polymers," Advanced Materials, vol. 22, no. 31, pp. 3388-3410, 2010.
- [88] I. K. Kuder, A. F. Arrieta, W. E. Raither, P. Ermanni, "Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 63, pp. 33-55, 2013.
- [89] C. Wischke, A. Lendlein, "Shape-Memory Polymers as Drug Carriers—A Multifunctional System," *Pharmaceutical Research*, vol. 27, no. 4, pp. 527-529, 2010.
- [90] L. Zhang, H. Du, L. Liu, Y. Liu, J. Leng, "Analysis and design of smart mandrels using shape memory polymers," *Composites Part B: Engineering*, vol. 59, pp. 230-237, 2010.
- [91] A. Lendlein, A. M. Schmidt, R. Langer, "AB-polymer networks based on oligo(ε-caprolactone) segments showing shape-memory properties," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 98, no. 3, pp. 842-847, 2001.
- [92] H. Fischer, "Self-repairing material systems—a dream or a reality," *Natural Science*, vol. 02, no. 08, pp. 873-901, 2010.
- [93] S. J. García, H. R. Fischer, S. van der Zwaag, "A critical appraisal of the potential of self healing polymeric coatings," *Progress in Organic Coatings*, vol. 72, no. 3, pp. 211-221, 2011.
- [94] C. Dry, "Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials," *Composite Structures*, vol. 35, no. 3, pp. 263-269, 1996.
- [95] N. Zhong, W. Post, "Self-repair of structural and functional composites with intrinsically selfhealing polymer matrices: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 69, pp. 226-239, 2015.

- [96] M. D. Hager, P. Greil, C. Leyens, S. van der Zwaag, U. S. Schubert, "Self-Healing Materials," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 47, pp. 5424-5430, 2010.
- [97] X. K. D. Hillewaere, F. E. Du Prez, "Fifteen chemistries for autonomous external self-healing polymers and composites," *Progress in Polymer Science*, vol. 49-50, pp. 121-153, 2015.
- [98] N. K. Guimard, K. K. Oehlenschlaeger, J. Zhou, S. Hilf, F. G. Schmidt, C. B. Kowollik, "Current Trends in the Field of Self-Healing Materials," *Macromolecular Chemistry and Physics*, vol. 213, no. 2, pp. 131-143, 2012.
- [99] T. Nesterova, K. D. Johansen, S. Kill, "Synthesis of durable microcapsules for self-healing anticorrosive coatings: A comparison of selected methods," *Progress in Organic Coatings*, vol. 70, pp. 342-352, 2011.
- [100] M. den Brabander, H.R. Fischer, S.J. Garcia, "Self-Healing Polymeric Systems: Concepts and Applications", in *Smart Polymers and their Applications*, A. M. Rosa and S. R. Julio, Eds. Sawston: Woodhead Publishing, 2019, pp-379-409.
- [101] S. R. White, N. R. Sottos, P. H. Geubelle, J. S. Moore, M. R. Kessler, S. R. Sriram, E. N. Brown, S. Viswanathan, "Autonomic healing of polymer composites," *Nature*, vol. 409, no. 6822, pp. 794-797, 2001.
- [102] E. N. Brown, N. R. Sottos, S. R. White, "Fracture testing of a self-healing polymer composite," *Experimental Mechanics*, vol. 42, pp. 372–379, 2002.
- [103] E. N. Brown, N. R. Sottos, "Performance of embedded microspheres for self-healing polymer composites," Society for Experimental Mechanics IX International Congress on Experimental, 2000, pp. 563-566.
- [104] D. Jung, "Performance and properties of embedded microspheres for self-repairing applications,"
 M. S. thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- [105] İ. Karagöz, "Termoplastiklerin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri" Ph.D. thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, Göztepe, İstanbul, 2014.
- [106] H. Chen, V. V. Ginzburg, J. Yang, Y. Yang, W. Liu, Y. Huang, L. Du, B. Chen, "Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 59, pp. 41-85, 2016.
- [107] H. Lu, Y. Yao, W. M. Huang, D. Hui, "Noncovalently functionalized carbon fiber by grafted selfassembled graphene oxide and the synergistic effect on polymeric shape memory nanocomposites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 67, pp. 290-295, 2014.
- [108] C. S. Boland, U. Khan, G. Ryan, S. Barwich, R. Charifou, A. Harvey, C. Backes, Z. Li, M. S. Ferreira, M. E. Möbius, R. J. Young, J. N. Coleman, "Sensitive electromechanical sensors using viscoelastic graphene-polymer nanocomposites," *Science*, vol. 354, no. 6317, pp. 1257-1260, 2016.
- [109] S. Yu, J. Lee, T. H. Han, C. Park, Y. Kwon, S. M. Hong, C. M. Koo, "Copper Shell Networks in Polymer Composites for Efficient Thermal Conduction," *Applied Materials & Interfaces*, vol. 5, pp. 11618-11622, 2013.
- [110] J. R. Reynolds, B. C. Thompson, T. A. Skotheim, *Handbook of Conducting Polymers*. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [111] A. Puiggalí-Jou, L. J. del Valle, C. Alemán, "Drug delivery systems based on intrinsically conducting polymers," *Journal of Controlled Release*, vol. 309, pp. 244-264, 2019.
- [112] R. Feiner, L. Engel, S. Fleischer, M. Malki, I. Gal, A. Shapira, Y. Shacham-Diamand, T. Dvir, "Engineered hybrid cardiac patches with multifunctional electronics for online monitoring and regulation of tissue function," *Nature Materials*, vol. 15, no. 6, pp. 679-685, 2016.
- [113] S. Taccola, F. Greco, E. Sinibaldi, A. Mondini, B. Mazzolai, V. Mattoli, "Toward a New Generation of Electrically Controllable Hygromorphic Soft Actuators," *Advanced Materials*, vol. 27, no. 10, pp. 1668-1675.
- [114] S. Takamatsu, T. Lonjaret, D. Crisp, J. M. Badier, G. G. Malliaras, E. Ismailova, (2015). "Direct patterning of organic conductors on knitted textiles for long-term electrocardiography," *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, p. 15003, 2015.


HAVACILIKTAKİ VİDEO VERİ YOLU STANDARDININ AKILLI TAŞITLAR İÇİN KULLANIM OLASILIĞI ÜZERİNE BİR İNCELEME

^{1*,2}Aslıhan PAMUK^(D), ³Ufuk SAKARYA^(D)

^{1*}Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, TÜRKİYE ²Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, TÜRKİYE ³Yıldız Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektroniği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

¹aslihan.pamuk@tai.com.tr, ²aslihanpamukk@gmail.com, ³usakarya@yildiz.edu.tr

Önemli Katkılar (Highlights)

- Havacılıkta kullanılan video veri yolunun akıllı taşıtlar için kullanım olasılığı
- ARINC 818 video veri yolunun kısaca tanıtılması
- Akıllı taşıtlarda sensör ve kameraların sayısının artması ile birlikte iletişimde yüksek hız gereksinimi
- ARINC 818 veri yolunun akıllı taşıtlar üzerinde kullanımının değerlendirilmesi



HAVACILIKTAKİ VİDEO VERİ YOLU STANDARDININ AKILLI TAŞITLAR İÇİN KULLANIM OLASILIĞI ÜZERİNE BİR İNCELEME



^{1*}Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, TÜRKİYE ²Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, TÜRKİYE ³Yıldız Teknik Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi, Havacılık Elektrik ve Elektroniği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

¹aslihan.pamuk@tai.com.tr, ²aslihanpamukk@gmail.com, ³usakarya@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 16.11.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 31.12.2022)

ÖZ: Gerçek zamanlı sistemlerdeki en önemli sorunlardan birisi algılayıcılardan toplanan verinin yeterli hızda komuta ve kontrol sistemine taşınamamasıdır. Bu işlem de veri yolları vasıtası ile olmaktadır. Bu makalede sayısal haberleşme içerisinde havacılıkta kullanılan video veri yolu standardının kara ulaşımındaki akıllı taşıtlar için kullanım olasılığı üzerine bir incelemede bulunulmaktadır. Bu inceleme yapılırken sadece teknik anlamda bir incelemede bulunulmaktadır. Bu makaledeki ana motivasyon; kara ulaşımında akıllı taşıt sistemleri geliştiren kişilerin, havacılık alanındaki gelişmelerden haberdar edilerek farkındalık oluşturulmasıdır. Bir ulaşım alanındaki ulaşım araçlarının yetenekleri yeri geldiğinde diğer bir ulaşım alanındaki araçlara esin kaynağı olabilmektedir. Havacılık alanında çoklu algılayıcıların kullanımı ve bunların gerçek zamanda iletilmesi üzerine çok uzun zamandır çalışmalar yer almaktadır. Özellikle hız konusu ortaya konduğunda hava araçlarının hız gereksinimlerinden doğan iletişimin de hızlı olması gereklilikleri bu alanda birçok çalışmanın yapılmasına neden olmuştur. Bu makalede, havacılıkta kullanılan video veri yolu standardı teknik anlamda genel hatları ile tanıtıldıktan sonra otomotivde olası kullanımı üzerine yorumlar sunulmaktadır. Gelecekte akıllı taşıtlar için sensör ve kameraların artması ile birlikte veri iletim hızının isterlerinin daha da artması durumu oluşabilir. Otonom araçlarda aynı havacılıktaki gibi sensörlerden ve kameralardan gelen bilginin hem hızlı hem de güvenilir bir şekilde iletilmesi çok önemlidir. Havacılıktaki video veri yolunun sahip olduğu özelliklerin otomotiv sektörünün ihtiyaçları özelinde incelenmesinin geleceğin akıllı taşıtlarının veri yolları tasarımında önemli olabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı Ulaşım Sistemleri, Havacılıkta Video Veri Yolu, Çoklu Sensörler

A Review On the Possibility of Using the Video Data Bus Standard in Aviation for Smart Vehicles

ABSTRACT: One of the most important problems in real time systems is that the data collected from the sensors cannot be transferred from the sensors to the command and control system at a sufficient speed. This process is done via data bus. In this article, a review is made on the possibility of using the video data bus standard used in aviation in digital communication for smart vehicles in land transportation. While this review is being done, only a technical review is made. The main motivation in this article; it is to raise awareness by informing the people who develop smart vehicle systems in land transportation about the developments in the field of aviation. The capabilities of transportation vehicles in one transportation area can be a source of inspiration for vehicles in another transportation area when appropriate. There have been studies on the use of multiple sensors and their real-time transmission in the aviation field for a long time. Especially when the speed issue is brought forward, the necessity of fast communication arising from the speed requirements of aircraft has led to many studies in this field. In this article, after

introducing the video data bus standard used in aviation in technical terms, comments on its possible use in automotive are presented. In the future, with the increase of sensors and cameras for smart vehicles, the demands of data transmission speed may increase even more. In autonomous vehicles, just as in aviation, it is very important to transmit information from sensors and cameras both quickly and reliably. It is envisaged that examining the features of the video bus in aviation, specific to the needs of the automotive industry, will be important in the design of the busses of the smart vehicles of the future.

Keywords: Intelligent Transportation Systems, Video Data Bus In Aviation, Multi-Sensors

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ulaşım konusu hiç kuşkusuz insanlık tarihi ile beraber en önemli sektörlerden birisidir. Ulaşım ayrıca, hizmet sektörünün de haberleşme ile beraber en önemli unsurlarından da birisidir. Kara, deniz ve hava ulaşım alanlarındaki ulaşım araçlarının yetenekleri yeri geldiğinde diğer bir ulaşım alanındaki araçlara esin kaynağı olabilmektedir. Genelde her bir ulaşım alanının kendi koşulları nedeni ile kendi zorlukları olmaktadır. Zorluklara istinaden de gereklilikler ortaya çıkmakta ve bunun sonucunda da o alanda çözümler ortaya konmaktadır. Dünya savaşlarında çok büyük yıkımların olmasına rağmen çok büyük buluşların da bu savaşlar esnasında bulunması tesadüf değildir. Yeni bir açılım yapmanın en önemli motivasyonu hiç kuşkusuz gerekliliktir.

Günümüzde yapay zekanın hızlı bir şekilde ilerleyişi ile artık daha çok hayallerde düşlediğimiz bir çok durumun gerçekleşme ihtimali artmaya başlamıştır. Kara üzerinde yaşayan canlılar olarak bizleri de en çok ilgilendiren ulaşım cinsi olan kara ulaşımı da bu gelişmelerden etkilenmektedir. Akıllı ulaşım sistemleri içerisinde otonom kara taşıtlarının da giderek öneminin artması öngörülebilir. Otonom ve hareketli bir sistemin üç önemli unsuru bulunmaktadır. Bu üç önemli unsur:

• Gövde/Vücut (Body): Hareketi ve enerjiyi sağlayan tüm aksamlar/yapılar. İnsan ile benzetim kurulacak olunursa; insan vücudu, kas sistemi, sindirim sistemi, metabolizma, v.b.

• Algılama (Sensing): Kendini ve etrafını algılamasını sağlayacak araçlar/algılayıcılar (sensors). İnsan ile benzetim kurulacak olunursa; duyu organları.

• Komuta ve kontrol (Command and control): Otonom sistemin komutasını ve kontrolünü sağlayan donanımlar ki genelde günümüzde sayısal elektronik devreler ile oluşturulan donanımlardır. İnsan ile benzetim kurulacak olunursa; sinir sistemi (beyin, beyincik, omurilik ve sinirler).

Otonom ve hareketli bir sistemin üç unsurunun da çok önemli olmasına rağmen, bu makalenin konusu gerçeği algılama ile komuta kontrol arasındaki haberleşmeye odaklanılacaktır. Otonom bir sistemde komuta ve kontrol sistemi kendi kendine verileri toplayıp karar verebilen bir sistemdir. Bir gövdeyi komuta ve kontrol etmek için o gövdeye ait dinamik ve statik yapının modellenmesi ve bu modellere göre kontrol edilmesi bir çözüm yoludur. Bu işlem gerçekleştirilirken hem gövdenin durum değişkenlerinin bilinmesi hem de o an ki durumundaki çevresel değişkenlerin bilinmesi doğru karar almak için çok önemlidir. Algılayıcılar vasıtası ile alınan verilerin gerçek zamanda işlenerek karar verilmesi dinamik bir sistemin en zor problemlerinden birisidir. Gerçek zamanda çalışan bir sistem için sistem bütünlüğü içerisindeki her bir parçanın olabildiğince hız isterlerini/gerekliliklerini karşılaması gerekmektedir. Bu alandaki en önemli sorunlardan birisi, algılayıcılardan toplanan verinin gerçek zamanda işlene de veri yolları vasıtası ile yapılmaktadır.

Sayısal elektronik kullanılmadan önce telli veya telsiz şeklinde analog olarak kanallar üzerinden veri iletimi gerçekleşmekteydi. Bu alandaki en bilindik uygulamalardan birisi genlik modülasyonu (Amplitude Modulation, AM) radyolardır. Günümüzde analog ve/veya sayısal elektronik temelli haberleşme sistemleri bir çok uygulamada kullanılmaktadır [1].

Bu makalede sayısal haberleşme içerisinde havacılıkta kullanılan video veri yolu standardının – ARINC 818 [2], Aviyonik Dijital Video Yolu (Avionic Digital Video Bus, ADVB), -(Great River Technology, 2021) kara ulaşımındaki akıllı taşıtlar için kullanım olasılığı üzerine bir incelemede bulunulmaktadır. Bu inceleme yapılırken sadece teknik anlamda bir incelemede bulunulmaktadır. İşin hukuki boyutu da dahil

diğer alanlarına değinilmemiştir. Bu makaledeki ana motivasyon; kara ulaşımında akıllı taşıt sistemleri geliştiren kişilerin, havacılık alanındaki gelişmelerden haberdar edilerek farkındalık oluşturulmasıdır. Havacılıkta kullanılan video veri yolu standardının teknik anlamda genel hatları ortaya konularak bir bilgilendirme yapılacaktır. Daha önce de belirtildiği gibi bir ulaşım alanındaki ulaşım araçlarının yetenekleri yeri geldiğinde diğer bir ulaşım alanındaki araçlara esin kaynağı olabilmektedir. Havacılık alanında çoklu algılayıcıların kullanımı ve bunların gerçek zamanda iletilmesi üzerine çok uzun zamandır çalışmalar yer almaktadır [3]. Özellikle hız konusu ortaya konduğunda hava araçlarının hız gereksinimlerinden doğan iletişimin de hızlı olması gereklilikleri veya başka bir deyiş ile algılayıcıların örnekleme zaman aralıklarının kısa olması durumu bu alanda birçok çalışmanın yapılmasına neden olmuştur. Bir başka bakış açısı ile havacılık alanı doğası gereği ortaya çıkan bu tip isterler nedeni ile bazı konuları çalışmaya kara alanındaki taşıtları çalışan araştırmalardan daha önce çalışmaya başlaması doğaldır. Bu noktada yeni bir açılım yapımanın önemli bir motivasyonunun gereklilik olduğunu unutmamak gerekir. Bu neden ile bu makalede havacılık için çok önemli bir veri yolu olan video veri yolu standardının kara ulaşımındaki akıllı taşıtları için kullanım olasılığı üzerine odaklanılmıştır.

Makalenin ileriki bölüm planı şu şekildedir: Gelecek bölümde ARINC 818 teknik anlamda genel hatları ile tanıtılacaktır. Üçüncü bölümde ise otomotivde kullanılan veri yollarından bahsedilecektir. Son bölümde ise ARINC 818 standardının otomotivde olası kullanımı üzerine yorumlar sunulacaktır.

2. ARINC 818 (ARINC 818)

ARINC 818, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, sıkıştırılmamış dijital video iletimi için geliştirilmiş bir video arayüzü ve protokol standardıdır. Yüksek performanslı dijital videonun zorlu gereksinimlerini karşılamak ve görev kritik sistemler için Aeronautical Radio Incorporated (ARINC) ve havacılık topluluğu tarafından 2007 yılında yayınlanmıştır (Great River Technology, 2021). Ticari ve askeri sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Resmi olarak yayınlanmadan önce hem Airbus A400M projesinde hem de Boeing 787 Dreamliner projesinde kritik alt video sistemleri için ARINC 818 standardını benimsemiştir [4]. Başlangıçta kokpit ekranları için tasarlanan bu standart, yüksek bant genişliği, güvenirliliği, entegrasyon sırasındaki esnekliği açısından kızılötesi ve optik kameralar gibi yüksek hız gereksinimi duyulan sensör ve kameralarda da kullanılmaya başlanmıştır [5].

Hava araçlarında giderek artan miktarda bilginin bir şekilde kokpite aktarılması ihtiyacı doğmuştur. Bu bilgileri servis etmenin bir yolu görsel olarak sunmaktır. Görsel olarak sunulan bu bilgiler kokpitteki ekranlar vasıtası ile pilota sunulmaktadır. Bu bilgiler ekranlara gelmeden önce karmaşık bir video sisteminden geçmektedir. Bu video sistemleri havacılıkta birçok alanda önemli rol oynamaktadır. Bu uygulamalar arasında taksi ve kalkış yardımı, kargo yükleme, hedef takibi, seyrüsefer, çarpışmadan kaçınma gibi uygulamalar bulunmaktadır. Ayrıca aşağıdaki gibi alt sistemleri içermektedir.

- Kızılötesi ve optik sensörler
- Optik kameralar
- Radar
- Uçuş kayıt cihazları
- Harita sistemleri
- Sentetik görüntü
- Görüntü füzyon sistemleri
- Başüstü gösterge sistemi (Head-Up Displays, HUD)
- Çok fonksiyonlu ekranlar
- Video yoğunlaştırıcılar



ARINC 818 standardından önce, aviyonik video iletimi için herhangi bir standart bulunmamaktaydı. Bundan dolayı her yeni hava aracı için kokpit tasarımı, ekranlar ve video sistemlerinin gerektirdiği özel formatlar kullanılmaktaydı. Bu da beraberinde kullanılan ekranlar ve diğer video sistemlerini daha maliyetli bir hale getirmekteydi. Yüksek maliyet, hız, esneklik, yüksek bant genişliği, güvenirlilik gibi gereksinimlerden dolayı aviyonik video iletimi için yeni bir standart ihtiyacı ortaya çıkmıştır. ARINC 818 komitesi tarafından Digital Visual Interface (DVI), Gigabit Ethernet (GigE) ve Fiber Kanal-Ses Video (Fibre Channel-Audio Video, FC-AV) dahil olmak üzere bu standart için çeşitli teknoloji seçenekleri gözden geçirilmiştir. Düşük gecikme süresi, hız seçenekleri, veri bütünlüğü, gömülü veriler, C-130 aviyonik modernizasyon programı ve F/A-18E Super Hornet gibi askeri uygulamalarda da kendini kanıtlaması sebebiyle ARINC 818 başlangıç noktası olarak Fiber Kanal-Ses Video standardını benimsemiştir [6]. Fiber Kanal-Ses Video standardı çok geniş endüstri ve uygulama alanını kapsasa da ARINC 818 özellikle aviyonik video ihtiyaçlarına odaklanmaktadır. Bu nedenle ARINC 818 standardı, Fiber Kanal-Ses Video standardına göre daha basitleştirilmiş bir yapıya sahiptir.

2.1. ARINC 818 ve Diğer Veri Yollarının Karşılaştırılması (Comparison of ARINC 818 and Other Data Buses)

ARINC 818 komitesi, bu standart için çeşitli video veri yollarını araştırmıştır. Araştırılan video veri yollarının özellikleri aşağıdaki gibidir.

Camera Link: Camera Link, genellikle yapay görme ve endüstriyel uygulamalar için kullanılan seri ve paralel haberleşme protokolüdür. Bu protokol Ulusal Yarıiletkenler "Kanal Link" arayüzüne dayanan bir protokoldür. Camera Link 2.0, bakır üzerinde 850 Mbps'ye kadar veri hızlarını destekleyebilirken, Camera Link HS, fiber ve çoklu kanalların eklenmesiyle daha yüksek hızları ulaşabilmektedir. Camera Link protokolünün aviyonik uygulamalardaki en büyük eksikliği DO-254 gibi sertifikasyon eksikliği problemidir [7]. Aynı zamanda fiziksel katman olarak 19 telli kablo kullanılması nedeniyle kablaj ağırlığı ve sınırlı çalışma uzunluğu oluşmasından dolayı aviyonik uygulamalarda tercih edilmemektedir.

Ethernet: Ethernet, ev ve işyerlerinde çok yaygın olarak kullanılan hızlı ve düşük maliyetli bir ağ standardıdır. Hem bakır hem de fiber üzerinde 10 Gbps'ye kadar hızları destekleyebilen bir protokoldür. Aviyonik video sistemlerinde düşük gecikmeli video durumu çok kritik bir öneme sahiptir. Ethernetin, deterministik iletim sürelerinin olmamasından dolayı aviyonik video sistemlerinde kullanımı tercih edilmemektedir [7]. Havacılıktaki Aviyonik Tam Çift Yönlü Anahtarlamalı Ethernet (Avionics Full-Duplex Ethernet, AFDX) ARINC 664 ismiyle standartlaşan protokol de ethernete dayanmaktadır [8]. Bu

standart deterministik bir yapıya sahiptir, bununla birlikte veri iletim hızı 100 Mbps'ye kadar sınırlıdır. Yüksek bant genişliği ve yüksek çözünürlük gereksinimlerinden dolayı aviyonik video iletim sistemlerinde kullanılması uygun olmamaktadır.

DVI (Digital Visual Interface): DVI, sıvı kristal ekran (Liquid-Crystal Display, LCD) ve djital projektörler gibi video cihazlarının görüntü kalitesinin arttırılması için endüstri standartlarında tasarlanmış bir standarttır. Sıkıştırılmamış dijital video verisinin taşınmasını sağlamaktadır.

Firewire: IEEE 1394 standardına dayalıdır ve yüksek veri aktarım hızından dolayı gerçek zamanlı veri transferi yapabilen video cihazları, kameralar ve harici disk gibi cihazlarda kullanılmaktadır. ARINC 818 komitesi, DVI ve Firewire standartlarını da gözden geçirdi. Fiziksel katman, mesafe, hız ve kararlılık gibi özelliklerden dolayı aviyonik video iletimi için geliştirilecek olan standartta başlangıç olarak bu standartları tercih etmedi [4].

Fiber Kanal Ses Video: Fiber Kanal-Ses Video standardının resmi tanımı American National Standards Institute (ANSI) 356-2002 olarak bilinmektedir [7]. Bu standart, ses ve video bilgilerinin fiber kanal üzerinden taşınmasını ve fiber kanala bağlı dijital segmentlerin diğer analog ve sayısal ekipmanlarla birlikte çalışmasını belirtmektedir. Fiber Kanal-Ses Video standardı çok geniş endüstri uygulamalarını kapsamaktadır. Aviyonik uygulamalarda ise C-130 aviyonik modernizasyon programı ve F/A-18E Super Hornet projesinde düşük gecikme süresi, hız seçenekleri, veri bütünlüğü, gömülü veriler gibi özelliklerinden dolayı kendini kanıtlamış bir standarttır [9]. ARINC 818 komitesi, düşük gecikme süresi, hız seçenekleri, veri bütünlüğü, görüntüleme zamanlaması gereksinimleri ve Fiber Kanal-Ses Video standardının kendini kanıtlaması sebebiyle başlangıç noktası olarak Fiber Kanal-Ses Video standardını seçmiştir [4].

2.2. ARINC 818 Özellikleri (ARINC 818 Features)

Yüksek Bant Genişliği: Bir hava platformunun ekranlarına gerçek zamanlı görüntü füzyon işlemlerinin, örneğin semboloji ya da imleç bilgisinin gerçek zamanlı video ya da harita görüntülerinin üzerine yerleştirilmesi, yapılabilmesi için görüntülerin sıkıştırılmamış olması gerekmekteydi. Sıkıştırılmamış video için de yüksek bant genişliği gerekmektedir. ARINC 818 standardının ilk zamanlarında fiber kanal protokolü ile 1.0625, 2.125, 4.25 ve 8.5 Gbps hızları desteklemekteydi. Daha yüksek hızlara ihtiyaç duyulduğundan dolayı günümüzde 12.75, 14.025 ve 28.05 Gbps bağlantı hızları da desteklenmektedir [10].

Düşük Gecikme Süresi: ARINC 818'in en önemli özelliklerinden biri sıkıştırılmamış videoyu çok düşük gecikmelerle iletebilmesidir. Düşük gecikme gerçek zamanlı kokpit ekranlarında ve başüstü göstergelerde oldukça büyük bir öneme sahiptir. Özellikle başüstü göstergelerde, başüstü gösterge görüntüsü ile gerçek dünya arka planı arasındaki farklılıklar pilotun baş dönmesine sebep olabilmektedir [11]. Görüntülerin düşük gecikme ile pilota iletilmesi hem pilotun görev icrası için hem de ergonomi gibi gereksinimlerden olayı önemli olmaktadır. ARINC 818 standardında kare hızları ile ilgili herhangi bir sınırlama yoktur ve yüksek kare hızlarında bile daha düşük gecikmeler gözlemlenmektedir [10].

Fiziksel Katman: Büyük uçaklarda video kaynakları ve ekranlar arasındaki mesafe ortalama olarak 50 metre olabilmektedir [4]. Bant genişliği, mesafe, ağırlık ve elektromanyetik girişim kabiliyetlerinden dolayı video kaynakları ve ekranlar arasında fiziksel katman olarak fiber optik kablo tercih edilmektedir.

Kanal Bağlama: Daha yüksek bant genişliğine sahip uygulamalarda video akışını taşıyabilmek için birden fazla kanalın kullanılması bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durum kanal bağlama olarak adlandırılmaktadır. Genellikle uygulamalarda giriş, verici cihazda iki veya daha fazla ARINC 818 çerçevesine bölünür ve görüntüleme veya kayıt için alıcıda yeniden birleştirilir.

Esneklik ve Birlikte Çalışılabilirlik: Aviyonik görüntü sistemlerinde farklı çözünürlükler, gri tonlamalar, piksel formatları ve kare hızlarının olması nedeniyle ARINC 818 standardının esnek olması uygulama kolaylığı ve birlikte çalışabilirlik açısından oldukça önemli olmaktadır.

Hata Denetimi ve Veri Bütünlüğü: ARINC 818, fiber kanal çerçevelerini (paket) içermektedir. Bu standart hata kontrolü ve görüntü doğrulama için Döngüsel Artıklık Denetimi (Cyclic Redundancy Check, CRC) kullanması nedeniyle yüksek veri bütünlüğü sağlamaktadır [10].

2.3. ARINC 818-2 (ARINC 818-2)

ARINC 818 standardı, 2013 yılında standardın yenilenmesi, bazı hataların düzeltilmesi ve yeni özellikler eklenmesi için ARINC 818-2 olarak güncellenmiştir. ARINC 818-2, ARINC 818-1 uygulamalarıyla birlikte yedi yıllık bir deneyime sahip olmaktadır ve sıkıştırma, şifreleme ve daha yüksek hız seçenekleri sağlarken standardizasyonu da arttırmaktadır. ARINC 818-2 standardına eklenen yeni özellikler:

Kanal Birleştirme: Bağlantı bant genişliği sınırlamalarının üstesinden gelmek için ARINC 818-2 paralel olarak birden çok bağlantıyı desteklemektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için video çerçevesi daha küçük parçalara bölünerek ve iki veya daha fazla bağlantı üzerinden iletimi gerçekleştirilir.

Anahtarlama: ARINC 818 ilk olarak noktadan noktaya bir protokol olarak tasarlanmasına rağmen, ARINC 818'in yeni uygulamalarının birden çok ekranı veya kanalı olduğundan zaman içerisinde anahtarlama daha önemli bir konu haline gelmiştir. Anahtarlama, yalnızca çerçeveler arasında gerçekleşmektedir.

Alan Sıralı Renk Sistemi: ARINC 818-2 ile birlikte alan sıralı renk sistemini destekleyen video format kodu standart içerisine eklenmiştir [12]. Alan sıralı renk sisteminde tipik olarak her bir renk bileşeni ayrı bir konteyner içerisinde gönderilmektedir. Örneğin RGB modunda ilk olarak R, sonrasında G ardından da B gönderilir.

Sadece Veri Bağlantıları (Data-Only Links): Komut ve kontrol kanallarında (durum ya da dokunmatik ekran koordinatları) kullanılan sadece veri bağlantılarını içermektedir.

Sıkıştırma ve Şifreleme: ARINC 818 başlangıçta yalnızca sıkıştırılmamış video ve ses taşıyacak şekilde tasarlanmasına rağmen, yüksek çözünürlüklü sensörler, yüksek bant genişliği ihtiyacı ve yalnızca veri bağlantıları gibi uygulamalardan dolayı sıkıştırma ve şifreleme özelliği ARINC 818-2 içerisine eklenmiştir.

Çift Yönlü Kontrol: Güncellenen ARINC 818-2 protokolünde, bir yönde yüksek hızlı video iletimi yapılırken diğer yönde de veri iletimi yapılabilmektedir. Dönüş yolları (return path) dokunmatik ekranlı geniş alan ekranlarda ve yüksek çözünürlüklü sensörlerde yeni kullanılmaya başlanmıştır [11]. Bunlar tipik olarak komuta ve kontrol kanallarıdır. Örnek olarak bir sensörün odak veya beyaz dengesini düzeltme işlemleri verilebilir.

ARINC 818-1, 1.0625 Gbps (fiber kanal 1x) ile 8.5 Gbps (fiber kanal 8x) hızları arasını desteklerken, bu hızlar ARINC 818-2'de güncellenerek, standardın daha yüksek hızları desteklemesi sağlanmıştır. ARINC 818-2 ile birlikte 1.0625 Gbps'den (fiber kanal 1x) 28.05 Gbps (fiber kanal 32x) fiber kanal hızına kadar bağlantı hızları desteklenmektedir [11].

2.4. ARINC 818-3 (ARINC 818-3)

ARINC 818-2, dünya genelinde aviyonik kokpit ekranı uygulamalarında tüm modern cihazlar için tercih edilen video veri yolu olmaya devam etmektedir. ARINC 818 aynı zamanda güvenirlilik, hata düzeltme ve zamanlamanın kritik olduğu kameralar ve sensörler için de kullanılabilmektedir.

Kokpit ekranları, kameralar, sensörler ve diğer cihazlar için artan çözünürlükler, kare hızları ve veri gereksinimleri yüksek bant genişliği ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle 2018 yılında ARINC 818 komitesine özelliklerin güncellenmesi, bazı hataların düzeltilmesi ve yeni özellikler eklenmesi için bir teklif gönderilmiştir. ARINC 818-3 standardının eğer kabul edilir ise bu eklemeler ile birlikte; 4K ve 8K ekranlar, penceresiz kokpitler, sanal gerçeklik, uçak çevresindeki yüksek bant genişliği sensörleri ve kameralar gibi teknolojilere izin vermesi beklenmektedir [13](Alexander & Grunwald, 2019). Aynı zamanda ARINC 818-3 standardına eklenebilecek en önemli özellik 10 Gbps üzerindeki hızlarda 64B/66B kodlamanın olmasıdır [13].

	VERİ İLETİM HIZI	FİZİKSEL (DONANIM) ARAYÜZ	VERİ İLETİM MESAFESİ
ARINC 818-1	1x, 2x, 4x, 8x Fiber Kanal; 8.5 Gbps'ye kadar hız	1 bakır çifti ya da fiber	Bakır < 15 m Fiber < 500 m
ARINC 818-2	5.0 , 6.375 (6x), 12.75 (12x), 14.025 (16x), 21.0375 (24x), 28.05 (32x) Gbps	1 bakır çifti (koaksiyel) ya da fiber	Bakır < 50 m Fiber < 500 m
Camera Link	1.6 Gbps Çift 4.7 Gbps	5 ile 10 bakır çifti	<10 m
DVI	4 Gbps Çift 8Gbps	4 bakır çifti	5 m
FireWire	800 Mbps	1 bakır çifti	5 m
GigE	1.0 Gbps ya da 10.0 Gbps	4 bakır çifti ya da fiber	Bakır < 15 m Fiber < 500m

Çizelge 1. ARINC 818 ve diğer veri yollarının karşılaştırılması *Table 1.* Comparison of ARINC 818 and other data buses

3. ARINC 818 PROTOKOL YAPISI (ARINC 818 PROTOCOL STRUCTURE)

3.1. ADVB Paket Yap1s1 (ADVB Packet Structure)

ARINC 818 standardı, bir kanal içerisinde temel taşıma mekanizmasını bir ADVB çerçevesi ile sağlamaktadır. Video çerçeveleri ile olası bir karışıklığı ortadan kaldırmak amacıyla bu paketlere yalnızca çerçeveler demek yerine ADVB çerçeveleri olarak tanımlanmaktadır [9]. Bir ADVB çerçevesinin yapısı Şekil 2 ile gösterilmektedir.



Figure 2. ADVB Packet Structure

Bir ADVB çerçevesinin başlangıcı, bir başlangıç çerçevesi (Start of Frame, SoF) tarafından sinyallenir ve bir bitiş çerçevesi (End of Frame, EoF) ile sonlandırılır. Her ADVB çerçevesi altı adet 32 bitlik kelimeden oluşan bir çerçeve başlığına (frame header) sahiptir. ADVB başlığı içerisinde kaynak (Source_ID), hedef (Destination_ID), dizi içerisinde ADVB çerçevelerinin konumu (SEQ_CNT) gibi bilgiler bulunmaktadır. ADVB çerçevesi içerisinde yük (Payload), konteyner (Container) ya da nesne (Object) olarak ifade edilen kısım ise video, video parametreleri veya yardımcı veriler içermektedir. Yükün boyutu değişkenlik gösterebilmektedir ancak maksimum 2112 byte ile sınırlı olmaktadır. Veri bütünlüğünü sağlamak için hata kodlaması da bu ADVB paket yapısı içerisinde yer almaktadır. SoF ile CRC arasındaki veriler için hesaplanan 32 bitlik CRC hesaplaması bulunmaktadır.

ADVB Konteyner Yap1s1 (ADVB Container Structure)

ARINC 818, bir konteynerı video (görüntü kısmı) ve sesi taşımak için kullanılan bir dizi ADVB çerçevesi olarak tanımlamaktadır [99]. Nesne olarak da bir konteyner içerisinde bulunan belirli veri türleri olarak tanımlamaktadır. Konteyner içerisinde belirli ADVB çerçeveleri nesnelerin bir parçası olmaktadır. Nesne tipleri Çizelge 2 ile gösterilmektedir.

Çizelge 2. ADVB konteyner yapısı <i>Table 2.</i> ADVB container structure		
Object 0	Yardımcı Veriler	
Object 1	Ses Verisi	
Object 2	Video Verisi	
Object 3	Video Verisi- Interlaced format çift alan	

ADVB'de Object 0; o konteyner ile ilgili verileri içeren tek bir ADVB çerçevesidir. Eğer ses bilgisi içeriyorsa Object 1 içerisinde yer almaktadır. Object 2 ve Object 3 ise video yükü içermektedir. Geçişli (Interlaced) formatlarda Object 2 tek alan yükü için Object 3 ise çift alan yükü için kullanılmaktadır. Progressive (tek geçişli) video formatı için yalnızca Object 2 gereklidir. ADVB konteyner yapısı tek geçişli formattaki bir video için Şekil 3 ile gösterilmektedir.





4. OTOMOTİVDE KULLANILAN VERİ YOLLARI (BUSES USED IN AUTOMOTIVE)

Elektroniğin gelişmesine bağlı olarak otomotiv endüstrisinde çok çeşitli sensörlerin kullanımı artış göstermektedir. Otomobillerde radar Light Detection and Ranging (LIDAR), kızılötesi, motor/krank devir, manifold hava sıcaklık, kütle hava akış, yakıt, yakıt sıcaklık, anti blok sistemi (ABS), vuruntu, hız, gaz kelebeği, park sensörü gibi çeşitli algılayıcılar ve ölçerler kullanılabilmektedir [14]. Aynı zamanda akıllı sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte akıllı taşıtların sayısı gün geçtikçe çoğalmaktadır. Uçaklarda var olan "Otomatik Pilot" uygulamasından esinlenerek kara ulaşım platformlarında akıllı taşıtlar ortaya çıkmaya başlamıştır [14]. Akıllı taşıtlarda, yol çizgilerini anlama, trafik levhalarını anlama, trafik ışıklarını anlama, kişi ve canlı cansız nesne algılama, kaza uyarısı yapma gibi alt sistemler büyük önem kazanmaktadır [15]. Buna bağlı olarak akıllı taşıtlarda radar sensör, lidar sensör, ultrasonik sensör ve normal/kızılötesi kamera kullanımı artış göstermektedir.

Çok çeşitli sensörler ve kameralar otomobil içerisinde çeşitli veri yolları üzerinden veri aktarımı yapmaktadır. Otomobillerde kullanılan veri yolu sistemlerine örnek olarak

- Controller Area Network (CAN) Bus [16]
- Local Interconnect Network (LIN) Bus [17]
- Media Oriented System Transport (MOST) Bus [18]
- FlexRay [19]

verilebilir.

Zaman tetiklemeli bir seri veri yolu olan CAN, otomotiv sektöründe kullanılmak üzere Robert Bosch tarafından 1983 yılında kablo karmaşıklığını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir [16]. Veri iletim hızı 5 Kbps ile 1 Mbps arasında değişmektedir. 40 m veri yolu uzunluğuna kadar 1 Mbps'lik yüksek veri hızı sağlayabilmektedir. Aynı zamanda uzaktan ileti desteği olan bu veri yolu çok yüksek sağlamlık ve güvenirlilik sağlamaktadır [20].

LIN veri yolu, bir alternatif olarak geliştirilmiş olup ucuz ve daha az hata çıkarması amaçlanmıştır [21]. MOST veri yolu ise daha çok otomobil içerisinde bulunan medya ve eğlence araçlarının bağlanması amacıyla kurulmuş bir ağdır [22]. Özellikle x-by-wire uygulamaları için tasarlanan FlexRay, geleceğin otomobillerinde kullanılması planlanmaktadır. FlexRay 10 Mbps kapasiteli iki kanalı sayesinde hızlı ve güvenilir bir haberleşme standardıdır. FlexRay sistemi üzerinde çalışmalar halen devam etmektedir [23].

5. ARINC 818'ÎN OTOMOTÎVDE OLASI KULLANIMI (POSSIBLE USE OF ARINC 818 IN AUTOMOTIVE)

Otomotiv sektöründe sensörlerin gelişmesiyle birlikte otonom araçların sayısı gün geçtikçe artış göstermektedir. Bu akıllı araçlar üzerinde çok fazla sayıda çeşitli sensörler ve kameralar bulunmaktadır. Geleceğin akıllı araçlarında başarılı bir otonom sürüş için daha fazla sensör ve kamera ihtiyacı ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte bütün sensörlerin ve kameraların bilgileri çok hızlı ve güvenilir bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Her bir sensör verisinin iletimi otomobil üzerinde bulunan CAN, MOST ve LIN veri yolları aracığıyla yapılmaktadır. Günümüzde otomobillerde kullanılan en yaygın veri yolu olan CAN, en fazla 1 Mbps veri iletim hızını desteklemektedir. Her ne kadar 10 Mbps veri iletim hızını destekleyen FlexRay veri yolu üzerinde çalışmalara devam edilse de sağladığı veri iletim hızının akıllı araçlarda gelecekte oluşacak isterleri/gereksinimleri tam olarak karşılayıp karşılamayacağı sorusu önemli bir sorudur. Gün geçtikçe teknolojide yeni açılımlar ile karşı karşıya gelebilmekteyiz. Özellikle sensör ve yapay zeka teknolojilerindeki yenilikler bizleri gitgide büyük veri ile yüzleştirmektedir. Büyük bir veri ile kısıtlı zamanda çözümler bulmak genel bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Gelecekte akıllı kara taşıtları için sensör ve kameraların artması ile birlikte veri iletim hızının isterlerinin daha da artması durumu oluşabilir. ARINC 818, 28.05 Gbps'ye kadar veri iletim hızını desteklemektedir. Bu veri yolunun hızlı, güvenilir, esnek, kararlı olması gibi çok fazla avantajları bulunmaktadır. Fiziksel katman olarak fiber optik kablo kullanılmasından dolayı araç üzerindeki kablaj konusunda da bir avantaj olabilir. ARINC 818 veri yolunun sahip olduğu özelliklerin otomotiv sektörünün ihtiyaçları özelinde incelenmesinin geleceğin akıllı taşıtlarının veri yolları tasarımında önemli olabileceği öngörülmektedir.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSIONS)

ARINC 818, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, sıkıştırılmamış dijital video iletimi için geliştirilmiş bir video arayüzü ve protokol standardıdır. Her ne kadar başlangıçta bu standart kokpit ekranları için tasarlanmış olsa da yüksek bant genişliği, güvenirliliği, entegrasyon sırasındaki esnekliği açısından kızılötesi ve optik kameralar gibi yüksek hız gereksinimi duyulan sensör ve kameralarda da kullanılmaya başlanmıştır. Otomotiv sektöründe sensörlerin gelişmesiyle birlikte hem otonom araçların sayısı artmakta hem de bu akıllı araçlar içerisinde çok fazla sayıda çeşitli sensörler ve kameraların kullanımı artış göstermektedir. Otomotivde kullanılan mevcut veri yolları (CAN, MOST, LIN, FlexRay) maksimum olarak 10 Mbps veri iletim hızını desteklemektedir. Gelecekte akıllı taşıtlar için sensör ve kameraların artması ile birlikte veri iletim hızını isterlerinin daha da artması durumu oluşabilir. Otonom araçlarda aynı havacılıktaki gibi sensörlerden ve kameralardan gelen bilginin hem hızlı hem de güvenilir bir şekilde iletilmesi çok önemlidir. ARINC 818, 28.05 Gbps'ye kadar veri iletim hızını desteklemektedir ve hızlı, güvenilir, esnek, kararlı olması gibi çok fazla avantajları bulunmaktadır. ARINC 818 veri yolunun sahip olduğu özelliklerin otomotiv sektörünün ihtiyaçları özelinde incelenmesinin geleceğin akıllı taşıtlarının veri yolları tasarımında önemli olabileceği öngörülmektedir.

Etik Standartlar Bildirimi (Declaration of Ethical Standards)

Yazarlar tüm etik yönergelere uygun bir şekilde çalışmayı hazırlamıştır.

Yazar Katkı Beyannamesi (Credit Authorship Contribution Statement)

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Çıkar Çatışması Beyannamesi (Declaration of Competing Interest)

Çalışma kapsamında herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Destek / Teşekkür (Funding / Acknowledgements)

Çalışma herhangi bir destek almamıştır. Teşekkür edilecek bir kurum veya kişi bulunmamaktadır.

Veri Kullanılabilirliği (Data Availability)

Araştırma verileri herhangi bir veri havuzunun kullanımına açılmamıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- P. Devgan, V. Urick, J. McKinney and K. Williams, "Hybrid Analog-Digital Fiber Optic Network for Aircraft Communication and Control," 2007 IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Technology Conference, 2007, pp. 17-18.
- [2] TECHWAY, "ARINC 818", TECHWAY, 2021. [Online]. Available: <u>https://www.arinc818.com</u>, [Accessed Sept. 04, 2022].
- [3] T. Ricker, "Avionics Bus Technology: Which Bus Should I Get On?", 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017.
- [4] T. Keller, "ARINC 818 Avionics Digital Video Bus", *Great River Technology*, 2013. [Online]. Available: <u>https://www.arinc818.com</u>, [Accessed Sept. 04, 2022].
- [5] T. Keller and P. Grunwald, "ARINC 818 Add Capabilities for High-Speed Sensors and Systems", SPIE Defence + Security, 2014.
- [6] K. Bisson, "Arinc-818 testing for avionics applications" 2007 IEEE Autotestcon, 2007, pp. 321-326.
- [7] P. Grunwald, "Why ARINC 818?," 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017, pp. 1-4.
- [8] J. Villegas, S. Fortes, V. Escaño, C. Baena, B. Colomer and R. Barco, "Verification and Validation Framework for AFDX Avionics Networks," *in IEEE Access*, vol. 10, pp. 66743-66756, 2022.
- [9] J. Alexander and T. Keller, "Using ARINC 818 avionics digital video bus (ADVB) for military displays", Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007.
- [10] M. Zimmerman, "High bandwith, real-time video transport with ARINC 818", SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 2017.
- [11] P. Grunwald, "What's new in ARINC 818 supplement 2," 2013 IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2013, pp. 2B2-1-2B2-7.
- [12] P. Grunwald, "ARINC 818 specification revisions enable new avionics architectures", SPIE Defence + Security, 2014.
- [13] J. Alexander and P. Grunwald, "ARINC 818 Revision 3," 2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2019, pp. 1-8.
- [14] KIA, "Araçlardaki Sensörler Nelerdir? Sensör Çeşitleri ve Görevleri", *KIA*, 2021. [Online], Available: <u>https://www.kia.com/tr/faydalibilgiler/haberler/Teknoloji/arac-sensorleri-nelerdir.html</u>, [Accessed Sept. 04, 2022].
- [15] H. Gökozan and M. Taştan, "Akıllı Taşıtlar ve Kontrol Sistemleri Smart Vehicles and Control Systems", International Vocational Science Symposium, IVSS, 2018.
- [16] H.A. Thompson, H. Benitez-Perez, D. Lee, D.N. Ramos-Hernandez, P.J. Fleming and C.G. Legge, "A CANbus-based safety-critical distributed aeroengine control systems architecture

demonstrator", Microprocessors and Microsystems, Volume 23, Issue 6, pp 345-355, 1999.

- [17] A. Vaskova, M. Portela-Garcia, M. Garcia-Valderas, C. Lopez-Ongil and M. Sonza Reorda, "Hardening of serial communication protocols for potentially critical systems in automotive applications: LIN bus," 2013 IEEE 19th International On-Line Testing Symposium (IOLTS), 2013, pp. 13-18.
- [18] S. Lee, B. -S. Cho, Y. -J. Choi and K. -R. Baek, "Implementation of MOST/CAN network protocol," 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011, pp. 5974-5977.
- [19] P. -S. Murvay and B. Groza, "Efficient Physical Layer Key Agreement for FlexRay Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 9, pp. 9767-9780, Sept. 2020.
- [20] Ö. Kayan, "Can-Bus Protokolü", July, 2016. [Online]. Available: http://omerkayan.blogspot.com/2016/07/can-bus-protokolu.html, [Accessed Sept. 04, 2022].
- [21] D.G. Vrachkov and D.G Todorov, "Remote real-time tracking of vehicle data from LIN-bus over the Internet", 2018 IEEE 27th International Scientific Conference Electronics, ET 2018 -Proceedings, 2016, pp. 19–21.
- [22] R. N. Tuncay and Ö. Üstün, "Otomotiv Elektroniğindeki Gelişmeler", IX. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, 2004, pp. 27-28.
- [23] A. Demirci, E. Schmidt, E. Yürüklü and U. Karakaya, "Flexray Araçiçi Haberleşme Ağlarının Deneysel Başarım Değerlendirmesi", 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 2010.